

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса естественно-математического направления
общеобразовательной школы

В двух частях

ЧАСТЬ 1

11

Рекомендовано Министерством образования и науки
Республики Казахстан



Алматы «Атамұра» 2020

УДК 373.167.1

ББК 22.3 я 72

Ф 50

Учебник подготовлен в соответствии с Типовой учебной программой по предмету «Физика» для 10-11 классов уровня общего среднего образования по обновленному содержанию, утвержденной Министерством образования и науки РК.

Авторы: Р. Башарулы, К. Ш. Шункеев, Л. Н. Мясникова,
Н. Н. Жантурина, А. А. Бармина, З. К. Аймаганбетова
Под общей редакцией Р. Башарулы

Условные обозначения:



– вопросы



– упражнения для самостоятельного решения



– уровневые задания



– задание (теоретические, практические, экспериментальные исследования)



– дополнительный материал



– углубленный материал

Ф 50 **Физика:** Учеб. для 11 кл. естеств.-математ. направл. общеобразоват. шк. В 2 ч. Ч. 1 /Р. Башарулы, К. Ш. Шункеев, Л. Н. Мясникова, Н. Н. Жантурина, А. А. Бармина, З. К. Аймаганбетова. – Алматы: Атамұра, 2020. – 208 с.

ISBN 978-601-331-734-2

Часть 1. – 2020. – 208 с.

ISBN 978-601-331-735-9

УДК 373.167.1

ББК 22.3 я 72

ISBN 978-601-331-735-9 (часть 1)

ISBN 978-601-331-734-2

© Башарулы Р., Шункеев К. Ш.,
Мясникова Л. Н., Жантурина Н. Н.,
Бармина А. А., Аймаганбетова З. К., 2020
© «Атамұра», 2020

ВВЕДЕНИЕ

Дорогие учащиеся!

В этом учебном году вы завершаете всеобщее обязательное образование и вступаете на самостоятельный жизненный путь. Этот путь интересен и тернист. В связи с этим нам хотелось бы напомнить три кратких, но сакрально емких напутствия, которые помогут вам в преодолении трудностей на этом долгом пути.

Во-первых, старайтесь следовать в жизни мудрому совету Конфуция – великого учителя Востока: *«Кто повторяет старое и узнает новое, тот может быть предводителем»*. Это напутствие имеет прямое отношение и к глубокому усвоению предмета физики. Ведь 80% материала данного учебника основывается на ваших знаниях, полученных по физике в средних классах, новый материал составляет не более 20%. Поэтому вам следует в обязательном порядке восстановить пробелы в своих знаниях, повторив пройденный материал. Это даст гарантию более легкого и успешного изучения материала данного учебника.

Во-вторых, извлеките для себя из мудрейших слов великого учителя Запада Аристотеля самые важные житейские выводы: *«Ум заключается не только в знании, но и в умении применять знание на деле»*. Это изречение также имеет прямое отношение и к глубокому изучению физики. Физика – это фундаментальная разносторонняя наука, поэтому только тот человек, который владеет и теорией, и практическими методами ее применения, может стать высококвалифицированным специалистом.

В-третьих, образовательный и учебно-воспитательный процессы будут по-новому организованы на основе коллективного обучения по принципу: *«Один – за всех, все – за одного»*. Те люди, которые скорее осознают глубину этого гуманистического принципа и будут реализовывать его в жизни, станут самыми успешными членами современного общества. Поэтому и вы, следуя этому принципу, старайтесь делиться своими знаниями и практическими навыками друг с другом. Такое коллективное взаимообучение станет гарантией интенсивного приобретения и знания, и практических навыков на высоком уровне, обеспечив каждому из вас достойное завершение средней школы.





Авторы

Глава 1



МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  исследовать гармонические колебания $[x(t), v(t), a(t)]$ экспериментально, аналитически и графически;
-  описывать условия возникновения свободных и вынужденных колебаний;
-  проводить аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями;
-  исследовать графические зависимости заряда и силы тока от времени посредством компьютерного моделирования.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
тербелістер	колебания	oscillation
механикалық тербелістер	механические колебания	mechanical oscillation
гармоникалық тербелістер	гармонические колебания	harmonic oscillation
серіппелі маятник	пружинный маятник	spring pendulum
математикалық маятник	математический маятник	mathematical pendulum
электрмагниттік тербелістер	электромагнитные колебания	electromagnetic oscillation
еркін тербелістер	свободные колебания	free oscillation
еріксіз тербелістер	вынужденные колебания	forced oscillation
тербелмелі контур	колебательный контур	oscillatory circuit

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «колебания», «механические колебания», «гармонические колебания», «пружинный маятник», «математический маятник», «электромагнитные колебания», «свободные колебания», «вынужденные колебания», «колебательный контур».

§ 1.1

Уравнения и графики гармонических колебаний

1. Колебаниями называются движения или процессы, обладающие в той или иной степени повторяемостью во времени.

Колебательные движения часто встречаются в природе и технике. Например, совершают колебания ветви деревьев, маятники часов, струны гитары, грузы на пружине, крылья насекомых во время полета, земная кора во время землетрясения, переменный электрический ток и т.д.

Колебательные явления различной физической природы подчиняются общим закономерностям. Различные колебательные процессы описываются одинаковыми характеристиками и одинаковыми уравнениями.

2. В физике особенно выделяют колебания двух видов – механические и электромагнитные и их электромеханические комбинации, поскольку они чрезвычайно актуальны для жизнедеятельности человека.

Механические колебания, как и колебательные процессы любой другой физической природы, могут быть *свободными* и *вынужденными*. Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил системы после того, как система была выведена из состояния равновесия. Колебания груза на пружине или колебания математического маятника являются *свободными колебаниями* (рис. 1.1.1). Колебания, происходящие под действием внешних периодически изменяющихся сил, называются *вынужденными*.

Уравнение движения тела, совершающего колебания, задается с помощью некоторой периодической функции времени: $x = f(t)$.

3. Простым видом свободных колебаний являются гармонические колебания.

Гармоническими колебаниями называются колебания, при которых физическая величина, характеризующая то или иное колебание, изменяется с течением времени по синусоидальному (или косинусоидальному) закону.

Дифференциальное уравнение свободных гармонических механических колебаний имеет один и тот же вид для любых колебаний:

$$x'' + \omega_0^2 x = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0. \quad (1.1)$$

Решением этого уравнения является смещение x , которое определяется как периодическая функция от времени по закону синуса или косинуса:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{или} \quad x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.2)$$

где x – смещение тела от положения равновесия; A – амплитуда колебаний, т.е.

максимальное смещение тела от положения равновесия; ω_0 – циклическая (круговая) частота колебаний; φ_0 – начальная фаза колебания в момент времени $t = 0$; $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебания в момент времени t . Фаза колебаний определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы (значение координаты, скорости и ускорения) в любой момент времени t . Так как синус (косинус) изменяется в пределах от $+1$ до -1 , то x может принимать значения от $+A$ до $-A$.

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через равный промежуток времени, называемый **периодом колебания** (T):

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (1.3)$$

Единицей измерения периода T в системе СИ является **секунда** (c).

Зная период, можно определить частоту колебаний, т.е. число полных колебаний за единицу времени:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.4)$$

В системе СИ единицей измерения частоты является **Герц** ($Гц$).

Сравнивая (1.3) и (1.4), получим циклическую частоту ω_0 , измеряемую в рад/с:

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

4. Примерами простых колебательных систем могут служить математический и пружинный маятники (рис 1.1.1).

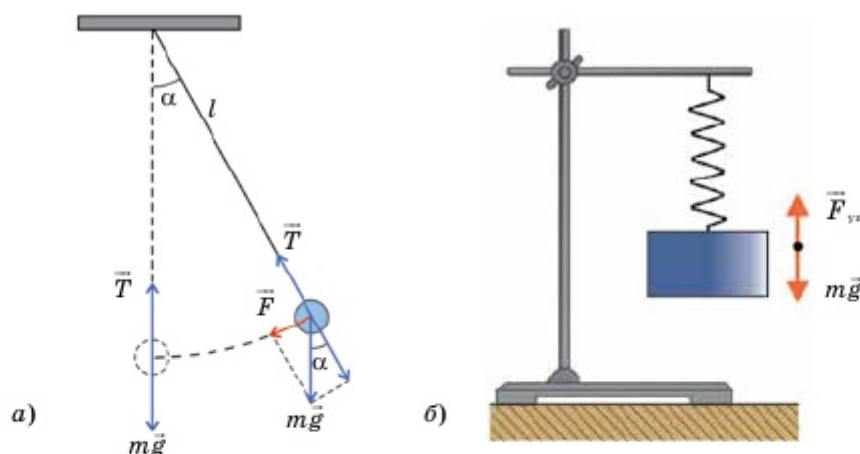


Рис. 1.1.1. Математический и пружинный маятники

Математическим маятником называется материальная точка, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити. Это идеальная модель. В реальности можно эту модель заменить телом небольших размеров, подвешенным на тонкой и нерастяжимой невесомой нити длиной l (рис 1.1.1, а).

Круговая частота математического маятника равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

а период колебаний определяется *экспериментальной формулой Галилея*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

На математический маятник действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила натяжения нити \vec{T} (рис. 1.1.1, а). Результирующая этих сил \vec{F} и является той силой, под действием которой маятник совершает свободные гармонические колебания. При этом угол отклонения α не должен превышать 5° .

Пружинным маятником называют груз массой m , прикрепленный к пружине жесткостью k , второй конец которой закреплен неподвижно (рис. 1.1.1, б).

Круговая частота колебаний груза равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

а период колебаний определяется согласно (1.3) *экспериментальной формуле Гюйгенса*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

где k – коэффициент жесткости пружины; m – масса пружины.

5. Найдем, как зависят от времени *скорость* и *ускорение* тела, совершающего колебания. Проекция скорости на ось OX определяется как производная координаты $x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ по времени t :

$$v_x(t) = x'(t) = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (1.5)$$

Проекция ускорения на ось OX есть производная скорости по времени:

$$a_x(t) = v'(t) = x''(t) = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (1.6)$$

Сравнивая выражения (1.2), (1.5) и (1.6), делаем вывод, что амплитуды скорости и ускорения соответственно равны $A\omega_0$ и $A\omega_0^2$. Фаза скорости (1.5) отличается

от фазы смещения (1.2) на $\pi/2$, а фаза ускорения (1.6) отличается от фазы смещения (1.2) на π .

На рис. 1.1.2 представлены графики зависимости смещения x , проекций скорости v_x и ускорения a_x от времени t . Как видно из графика, при максимальном смещении ($x = \pm A$) скорость равна нулю.

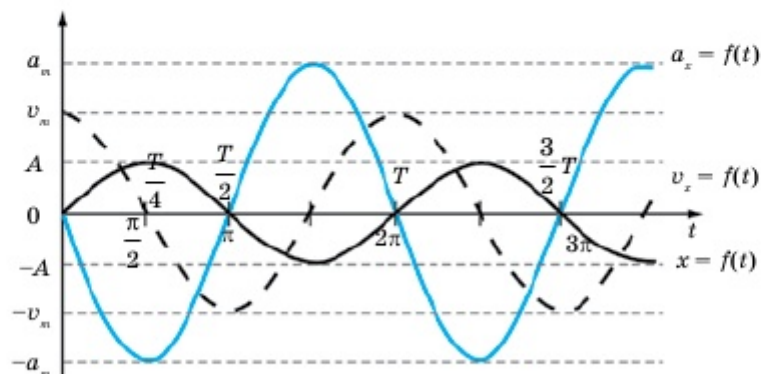


Рис. 1.1.2. Графики зависимости $x(t)$, $v_x(t)$ и $a_x(t)$

Скорость колебаний тела максимальна и равна амплитуде скорости (v_m) в момент прохождения через положение равновесия ($x = 0$).

Ускорение равно нулю при прохождении телом положения равновесия и достигает наибольшего значения, равного амплитуде ускорения a_m при наибольших смещениях.

Дополнительный материал


 Маятник Фуко является математическим маятником, плоскость колебаний которого медленно поворачивается относительно земной поверхности в сторону, противоположную направлению вращения Земли. Первая публичная демонстрация была осуществлена в марте 1851 года в Париже. Под куполом Пантеона Жан Бернар Леон Фуко подвесил металлический шар массой 28 кг с прикрепленным к нему острием на стальной проволоке длиной 67 м (рис. 1.1.3). Крепление маятника позволяло ему свободно колебаться во всех направлениях, под точкой крепления было сделано круговое ограждение диаметром 6 м, по краю огражде-



Рис. 1.1.3

ния была насыпана песчаная дорожка таким образом, чтобы маятник при своем движении мог, пересекая ее, прочерчивать на песке отметки. Чтобы избежать бокового толчка при пуске маятника, его отвели в сторону и привязали веревкой, после чего веревку пережгли. Период колебания маятника при такой длине подвеса составлял 16,4 секунды, при каждом колебании отклонение от предыдущего пересечения песчаной дорожки составляло около 3 мм, за час плоскость колебаний маятника поворачивалась более чем на 11° по часовой стрелке, то есть примерно за 32 часа совершала полный оборот и возвращалась в прежнее положение.



Вопросы

1. Какие процессы называются колебаниями? Свободными колебаниями? Вынужденными колебаниями? Гармоническими колебаниями?
2. Каким дифференциальным уравнением описываются свободные гармонические механические колебания? Как записывается решение этого дифференциального уравнения? Какими величинами характеризуется гармоническое колебание?
3. Какими уравнениями описываются смещение, скорость и ускорение гармонического колебания? Как они представлены графически? В чем заключаются сходство и отличие этих графиков?
4. Что называется пружинным маятником и математическим маятником? Какими формулами характеризуются периоды этих маятников? Какие выводы вытекают из этих формул?
5. Как, используя математический маятник, убедиться, что ускорение свободного падения в разных местах земной поверхности различно?



Задание (теоретический анализ)

Опираясь на изученное выше, сделайте анализ графиков зависимости перемещения x , проекции скорости v_x , проекции ускорения a от времени t . Сравнивая их самые большие значения и фазы, определите, в чем заключается особенность колебаний x , v_x и a_x ; какие параметры при этих колебаниях остаются неизменными? Напишите уравнения периодического колебания значений x , v_x и a_x .



Задание (экспериментальное исследование)

1. Определите неизвестную массу тела m_1 , имея секундомер, пружину и другое тело известной массы m_2 .
2. Составьте алгоритм сравнения масс двух различных тел, подвешивая эти тела к пружине и измеряя частоты этих тел.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Два математических маятника, длины которых отличаются на 16 см, совершают за одно и то же время: один – 10 колебаний, другой – 6 колебаний. Определите длины l_1 и l_2 маятников.

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$\Delta l = 16$ см	0,16 м	Если за время t совершается n колебаний, то период колебаний:
$n_1 = 10$		
$n_2 = 6$		
$l_1 = ?$ $l_2 = ?$		

$$T = \frac{t}{n}.$$

Из условия задачи следует, что число колебаний совершается за одно и то же время, поэтому:

$$n_1 T_1 = n_2 T_2, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – соответственно периоды колебаний первого и второго маятников.

Период колебаний математического маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, где l – длина математического маятника; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения. Тогда

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g}} \text{ и } T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}. \quad (2)$$

Подставив формулы (2) в выражение (1) и учитывая, что $l_2 - l_1 = \Delta l$, получим

$$\begin{cases} n_1 \sqrt{l_1} = n_2 \sqrt{l_2}, \\ l_2 - l_1 = \Delta l. \end{cases}$$

Решив эту систему уравнений, найдем искомые длины маятников:

$$l_1 = \frac{n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \Delta l; \quad l_2 = \frac{n_1^2}{n_1^2 - n_2^2} \Delta l.$$

$$l_1 = \frac{6^2}{10^2 - 6^2} \cdot 0,16 = 0,09 \text{ (м)}; \quad l_2 = \frac{10^2}{10^2 - 6^2} \cdot 0,16 = 0,25 \text{ (м)}.$$

О т в е т: $l_1 = 9$ (см); $l_2 = 25$ (см).

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 1.1.1. Материальная точка совершает гармонические колебания по закону $x = A \cos \omega t$ с периодом 6 с и начальной фазой, равной нулю. Определите, за какое время, считая от начала движения, точка сместится от положения равновесия наполовину амплитуды. (*Ответ: 1 с.*)
- 1.1.2. На сколько отстанут за сутки маятниковые часы, поднятые на высоту самой высокой точки Казахстана – пика Хан Танири (6995 м)? Телебашни «Коктобе» (371,5 м)? (*Ответ: 94,8 с; 5 с.*)
- 1.1.3. Какую часть периода груз пружинного маятника находится в пределах 3,09 мм от положения равновесия, если амплитуда его колебаний равна 1 см? Колебания маятника начинаются с максимального растяжения пружины. (*Ответ: 1/5.*)

Уровень В

- 1.1.4. На какую часть длины надо уменьшить длину математического маятника, чтобы период колебаний маятника на высоте пика Хан Танири (6995 м) был равен периоду его колебаний на поверхности Земли? (*Ответ: $2 \cdot 10^{-3}$.*)
- 1.1.5. Груз массой 500 г совершает колебания на пружине жесткостью 200 Н/м. Амплитуда колебаний составляет 10 см. Найдите полную механическую энергию колебаний и наибольшую скорость движения груза. (*Ответ: 1 Дж; 2 м/с.*)
- 1.1.6. Математический маятник совершает 50 колебаний за 70 с. Определите период колебаний этого маятника после того, как его нить укоротили в 4 раза. (*Ответ: 0,7 с.*)
- 1.1.7. Как изменится период колебаний маятника при перенесении его с Земли на Луну? Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а радиус Земли в 3,7 раза больше радиуса Луны. (*Ответ: увеличится примерно в 2,4 раза.*)

Уровень С

- 1.1.8. К пружине подвешена чашка весов с гирями. Период вертикальных колебаний чашки равен 0,15 с. После того как на чашку положили добавочные гири, период вертикальных колебаний стал равен 0,25 с. На сколько сместилась точка равновесия пружинного маятника после добавления гирь? (*Ответ: 9,9 мм.*)
- 1.1.9. К двум пружинам по очереди подвешивают один и тот же груз. Период колебаний груза на первой пружине равен 0,3 с, а на второй – 0,4 с. Определите период колебаний груза, подвешенного к этим пружинам, соединенным последовательно. (*Ответ: 0,5 с.*)
- 1.1.10. Пружинный маятник колеблется с периодом 3,14 с. Найдите модуль ускорения груза при его отклонении от положения равновесия на 0,25 м. (*Ответ: 1 м/с².*)

§ 1.2

Свободные и вынужденные электромагнитные колебания

1. Электромагнитные колебания были открыты в известной мере случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали изучать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволоочной катушки, обнаружили, что стальные спицы внутри катушки намагничиваются. В этом ничего странного не было: электрический ток и должен намагничивать стальной сердечник катушки. Удивительным было то, что нельзя было установить, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой – южным. Повторяя опыт примерно в одних и тех же условиях, получали в одних случаях один результат, а в других – другой. Объяснить это явление оказалось возможным после открытия электромагнитных колебаний, возникающих в цепи переменного тока, названной *колебательным контуром*, состоящим из конденсатора емкостью C и катушки индуктивностью L (рис. 1.2.1).

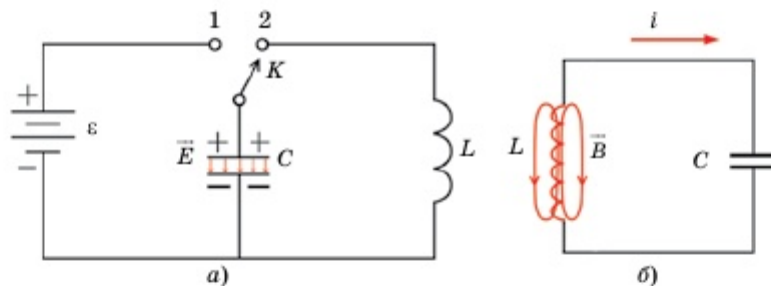


Рис. 1.2.1. Идеальный колебательный контур ($R = 0$)

Если мы подключим конденсатор колебательного контура к источнику постоянного тока через ключ K к точке 1 (рис. 1.2.1, а), то конденсатор заряжается. Если после зарядки конденсатора ключ подключим к точке 2, то конденсатор начинает разряжаться, т.е. по цепи течет ток противоположных зарядов (рис. 1.2.1, б). Когда ток зарядов прекращается, обкладки конденсатора вновь перезаряжаются, поменяв лишь знак зарядов. После этого конденсатор снова разряжается. Таким образом, возникают электромагнитные колебания заряда q , напряженности электрического поля \vec{E} конденсатора и индукции магнитного поля \vec{B} катушки.

Электромагнитными колебаниями называют *взаимосвязанные колебания электрической напряженности (\vec{E}) и магнитной индукции (\vec{B}) единого электромагнитного поля*.

Заряд q конденсатора в контуре изменяется периодически по закону:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1.7)$$

где q_m – амплитудное значение колебаний заряда конденсатора с циклической частотой ω_0 ;

эта частота называется *собственной частотой контура* и определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.8)$$

Следовательно, период равен:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1.9)$$

Последнее выражение называют *формулой Томсона*.

Сила тока в колебательном контуре определяется как производная заряда по времени:

$$i = q' = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.10)$$

где $I_m = \omega_0 q_m$ – амплитудное значение силы тока. Напряжение на конденсаторе:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1.11)$$

где $U_m = \frac{q_m}{C}$ – амплитудное значение напряжения; C – емкость конденсатора.

Из анализа выражений (1.7) и (1.10) следует, что колебания силы тока i опережают по фазе колебания заряда q на $\frac{\pi}{2}$: если сила тока достигнет максимального значения, то заряд конденсатора, как и напряжение, обращается в ноль, и наоборот.

Вспомним формулу для вычисления *емкости плоского конденсатора*:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (1.12)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; S – площадь обкладки конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

2. Обычно электромагнитные колебания происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования самым подходящим прибором является *электронный осциллограф* (рис. 1.2.2).



Рис. 1.2.2. Электронный осциллограф



Рис. 1.2.3. Осциллограмма колебаний напряжения

В электронно-лучевой трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при бомбардировке его электронами. На горизонтально отклоняющиеся пластины трубки подается переменное напряжение развертки U «пилообразной» формы (рис. 1.2.3). Сравнительно медленно напряжение нарастает, а потом очень резко уменьшается. Электрическое поле между пластинами заставляет электронный луч пробегать экран в горизонтальном направлении с постоянной скоростью и затем почти мгновенно возвращаться назад. После этого весь процесс повторяется. Если присоединить вертикально отклоняющиеся пластины трубки к конденсатору, то колебания напряжения при его разрядке вызовут колебания луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временная «развертка» колебаний (рис. 1.2.3). Эти колебания являются свободными электромагнитными колебаниями, так как рассматриваемый нами колебательный контур (рис. 1.2.1) не имеет электрического сопротивления ($R = 0$) и является идеальным контуром. Колебания, возникающие в идеальном колебательном контуре, являются свободными электромагнитными колебаниями.

Свободными электромагнитными колебаниями называют колебания, возникающие в системе за счет расходования накопленной собственной энергии.

В реальном случае (рис. 1.2.4) электрическое сопротивление колебательного контура не равно нулю ($R \neq 0$). Из-за этого колебания, возникающие в таком контуре, являются затухающими. Но и вынужденные электромагнитные колебания получить также нетрудно. Для этого нужно подключить колебательный контур к периодической электродвижущей силе ЭДС ($\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t$).

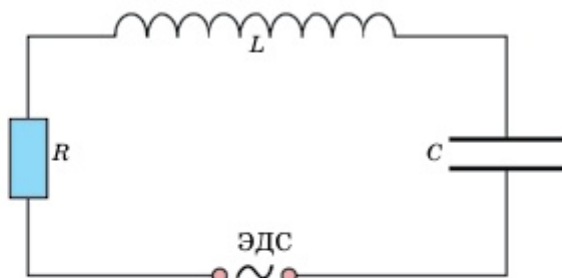


Рис. 1.2.4. Реальный колебательный контур ($R \neq 0$)

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют колебания, возникающие в системе за счет расходования энергии от внешнего источника.

3. Значения электрической энергии при зарядке конденсатора и магнитной энергии, возникающей в катушке при прохождении электрического тока, периодически изменяются. Рассмотрим, почему в контуре возникают колебания значений этих энергий. Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое

время к батарее с помощью переключателя (рис. 1.2.5, а). При этом электрическое поле между обкладками заряженного конденсатора получит энергию, определяемую формулой:

$$W_{эл} = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (1.13)$$

где q_m – заряд конденсатора; C – его емкость. Между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов U_m .

Переведем переключатель в положение 2 (рис. 1.2.5, б). Конденсатор начнет разряжаться, и в цепи появится электрический ток. Сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно. Это обусловлено явлением самоиндукции. При появлении тока возникает переменное магнитное поле в катушке, которое в свою очередь порождает вихревое электрическое поле в проводнике. Вихревое электрическое поле при нарастании магнитного поля действует против тока и препятствует его мгновенному увеличению.

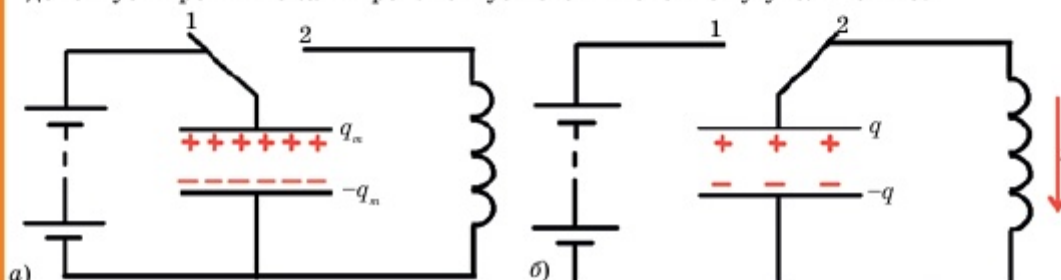


Рис. 1.2.5. Схема колебательного контура

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля в катушке, которая определяется формулой:

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (1.14)$$

где i – сила переменного тока; L – индуктивность катушки.

Полная энергия W электромагнитного поля контура при частично разряженном конденсаторе равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \quad (1.15)$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же магнитного поля тока, согласно закону сохранения энергии, будет максимальной. В этот момент сила тока также достигает максимального значения I_m .

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает вихревое электрическое поле, которое поддерживает ток.

В результате конденсатор перезаряжается (на обкладках разноименные заряды меняются местами) до тех пор, пока сила тока, уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

После этого конденсатор вновь станет разряжаться и вышеописанные процессы снова повторяются. Если бы не было потерь энергии, то эти процессы продолжались бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояние системы в точности повторялось бы. *Полная энергия* при этом сохранялась бы, и ее значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (1.16)$$

Однако в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R , что ведет к постепенному превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника за счет тепла, выделяемого по закону Джоуля – Ленца ($Q = I^2Rt$).



Вопросы

1. Как были открыты электромагнитные колебания? Какие колебания называются электромагнитными?
2. Какова роль колебательного контура? По каким формулам определяются частота и период электромагнитных колебаний в контуре? По какому закону изменяются сила тока и напряжения в колебательном контуре? Как их определяют?
3. Какие колебания называются свободными и вынужденными электромагнитными колебаниями? Как их получают? С помощью какого прибора их наблюдают?
4. Как происходит процесс превращения энергии при электромагнитных колебаниях?
5. Как определяются максимальные энергии электрического и магнитного полей? Чему равна полная энергия электромагнитного колебания, возбуждаемого в колебательном контуре?



Задание (экспериментальное исследование)

Проанализируйте графические зависимости заряда и силы тока от времени в электрических цепях в программе Excel (см. приложение 1).

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Конденсатор емкостью 40 нФ зарядили до напряжения 100 В и замкнули на катушку индуктивностью 0,1 мГн. Считая сопротивление контура ничтожно малым, определите амплитуду силы тока в данном колебательном контуре.

<p>Д а н о: $C = 40 \text{ нФ}$ $U_m = 100 \text{ В}$ $L = 0,1 \text{ мГн}$ $I_m = ?$</p>	<p>СИ $4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ 10^{-4} Гн</p>	<p>Р е ш е н и е: Поскольку сопротивление контура пренебрежимо мало и в колебательном контуре внешние ЭДС отсутствуют, то в контуре совершаются незатухающие свободные колебания. Уравнение свободных гармонических колебаний заряда в контуре: $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.</p>
--	---	--

Сила тока в колебательном контуре: $i = q' = -\omega_0 q_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$, где амплитудное значение силы тока

$$I_m = \omega_0 q_m. \quad (1)$$

Так как $U_m = \frac{q_m}{C}$, то $q_m = CU_m$. Подставив это выражение в формулу (1) и учитывая формулу для собственной частоты $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получим искомое амплитудное значение силы тока:

$$I_m = \frac{1}{\sqrt{LC}} CU_m, \text{ или } I_m = U_m \sqrt{\frac{C}{L}}, I_m = 100 \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-8}}{10^{-4}}} = 2 \text{ (А)}.$$

О т в е т: $I_m = 2 \text{ (А)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 1.2.1. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 1 мкФ и катушки индуктивности. Считая сопротивление контура ничтожно малым, определите, какой должна быть индуктивность катушки, чтобы настроить контур на частоту 2 кГц. (*Ответ:* 6,34 мГн.)
- 1.2.2. Максимальный заряд на обкладках конденсатора колебательного контура равен 2 мкКл, а амплитудное значение силы тока в контуре составляет 4 мА. Пренебрегая потерями на нагревание проводников, определите период колебаний. (*Ответ:* $\pi \cdot 10^{-8}$ с.)
- 1.2.3. Уравнение изменения силы тока в колебательном контуре со временем примет вид: $i = -0,01 \sin 200 \pi t$ (А). Принимая, что емкость конденсатора равна 507 нФ, определите период электромагнитных колебаний; индуктивность катушки; максимальную энергию магнитного поля. (*Ответ:* 0,01 с; 5 Гн; 0,25 мДж.)
- 1.2.4. Определите период колебаний колебательного контура, если максимальный заряд конденсатора в процессе колебаний равен $2 \cdot 10^{-8}$ Кл, а максимальный ток в катушке – 1 А. (*Ответ:* 125,6 нс.)
- 1.2.5. Найдите период колебаний энергии конденсатора в идеальном колебательном контуре, если амплитуда тока в контуре составляет 31,4 мА, а амплитуда заряда конденсатора составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Кл. (*Ответ:* 40 мкс.)

Уровень В

- 1.2.6. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 4 мГн и плоского конденсатора, состоящего из двух пластинок в виде дисков радиусом 1 см, расположенных на расстоянии 0,278 мм друг от друга. Определите период собственных колебаний контура. Каков будет период колебаний, если конденсатор заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4$. (Ответ: 1,256 мкс; 2,512 мкс.)
- 1.2.7. Контур состоит из катушки индуктивности и трех одинаковых, последовательно соединенных конденсаторов. Период колебаний в контуре равен 10 мкс. Каким станет период колебаний контура, если последовательное соединение конденсатора заменить параллельным? (Ответ: 30 мкс.)
- 1.2.8. В колебательном контуре параллельно конденсатору емкостью C присоединили другой конденсатор, емкость которого составляет $8C$. В результате частота электромагнитных колебаний изменилась на 200 Гц. Найдите первоначальную частоту колебаний. (Ответ: 300 Гц.)

Уровень С

- 1.2.9. Найдите отношение энергии магнитного поля к энергии электрического поля для момента времени $\frac{T}{12}$, считая, что процессы происходят в идеальном колебательном контуре. (Ответ: 3.)

§ 1.3**Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями**

Механические колебания (например, колебания математического маятника) имеют сходство с электромагнитными колебаниями, возникающими в электрическом контуре. В двух указанных случаях физическая природа колеблющихся величин разная, но их изменения происходят по одинаковым законам.

При механических колебаниях периодически изменяются координата тела x (в случае математического маятника – высота) и проекция его скорости v_x , а при электромагнитных колебаниях изменяются заряд q конденсатора и сила тока i в цепи. В связи с этим полезно провести аналогию механических и электромагнитных колебаний. Таким образом, сравнивая значения величин, характеризующих механические и электромагнитные колебания, приведенные в *таблице 1.3.1*, можно условно установить аналогию между ними.

1) В начальный момент $t = 0$ отклонение математического маятника от положения равновесия максимальное h_m . В данный момент скорость маятника равна нулю, следовательно, его кинетическая энергия также равна нулю $W_k = 0$, а потенциальная энергия максимальна и равна $W_n = mgh_m$. В колебательном контуре в момент времени $t = 0$ конденсатор максимально заряжен q_m , следовательно,

между его обкладками возникнет электрическое поле с максимальной энергией

$$W_{\text{эл}} = \frac{1}{2C} q_m^2.$$

В этом случае можно провести аналогию между потенциальной энергией маятника и электрической энергией колебательного контура (конденсатора), а также между начальной координатой x (высотой) маятника и зарядом q на обкладках конденсатора.

2) Через промежуток времени, равный $t = \frac{1}{4} T$, маятник проходит положение равновесия (высота $h = 0$, следовательно, $W_{\text{п}} = 0$) с максимальной скоростью v_m , при этом кинетическая энергия достигает максимума $W_{\text{к}} = \frac{1}{2} m v_m^2$. За четверть периода в колебательном контуре конденсатор полностью разряжается, а энергия электрического поля уменьшается до нуля, в то же время энергия магнитного поля достигает своего максимального значения $W_{\text{м}} = \frac{1}{2} L I_m^2$.

В этом случае можно провести аналогию между индуктивностью контура L и массой тела m при механических колебаниях, а также между механической кинетической энергией тела и энергией магнитного поля катушки.

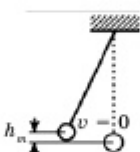
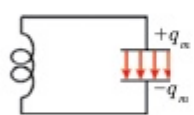

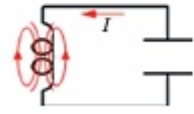
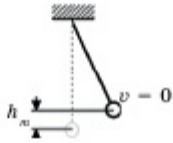
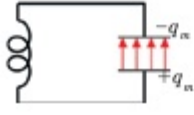

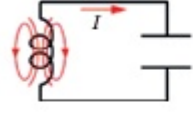
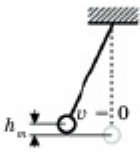
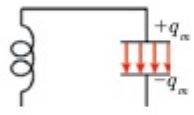
3) В момент, когда $t = \frac{1}{2} T$, маятник достигает своего крайнего правого положения (высота максимальна). При максимальной высоте $W_{\text{п}} = mgh_m$ и $W_{\text{к}} = 0$, т.е. вся запасенная энергия тела опять преобразуется в потенциальную энергию. В этот период с $t = \frac{1}{4} T$ до $t = \frac{1}{2} T$ сила тока в контуре будет убывать, что повлечет за собой ослабление магнитного поля катушки. Конденсатор начнет перезаряжаться, возникнет электрическое поле, стремящееся ослабить ток, который в итоге станет равным нулю (соответственно, энергия магнитного поля уменьшается до нуля $W_{\text{м}} = 0$), а заряд на обкладках конденсатора и энергия электрического поля достигнут максимума $W_{\text{эл}} = \frac{1}{2C} q_m^2$.

4) В момент времени, когда $t = \frac{3}{4} T$, тело начинает двигаться в обратном направлении и переходит в состояние равновесия. Точно так же процесс в электрической цепи аналогично повторяется в обратном направлении $\left(W_{\text{п}} = 0, W_{\text{к}} = \frac{1}{2} m v_m^2; W_{\text{эл}} = 0, W_{\text{м}} = \frac{1}{2} L I_m^2 \right)$.

5) Когда $t = T$, обе системы возвращаются в исходное состояние. Колебательный процесс повторяется.

Таблица 1.3.1

Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями

Время	Механические колебания маятника	Электромагнитные колебания в колебательном контуре
$t = 0$	 $W_n = mgh_{max}$ $W_k = 0$	 $W_{эл} = \frac{1}{2C}q_m^2$ $W_m = 0$
$t = \frac{1}{4}T$	 $W_n = 0$ $W_k = \frac{1}{2}mv_{max}^2$	 $W_{эл} = 0$ $W_m = \frac{1}{2}LI_m^2$
$t = \frac{1}{2}T$	 $W_n = mgh_{max}$ $W_k = 0$	 $W_{эл} = \frac{1}{2C}q_m^2$ $W_m = 0$
$t = \frac{3}{4}T$	 $W_n = 0$ $W_k = \frac{1}{2}mv_{max}^2$	 $W_{эл} = 0$ $W_m = \frac{1}{2}LI_m^2$
$t = T$	 $W_n = mgh_{max}$ $W_k = 0$	 $W_{эл} = \frac{1}{2C}q_m^2$ $W_m = 0$

В таблице 1.3.2 приведены величины, характеризующие аналогию между механическими и электромагнитными колебаниями.

Таблица 1.3.2

Аналогии между величинами, характеризующими механические и электромагнитные колебания

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Координата x	Заряд q
Амплитуда A	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 $W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля конденсатора $W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия груза $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки $W_{\text{м}} = \frac{Li^2}{2}$



Вопросы

1. В чем проявляется аналогия между электромагнитными колебаниями в контуре и колебаниями математического маятника?
2. Между какими величинами существует аналогия в механических и электромагнитных колебаниях? Какому общему закону подчиняется такая аналогия между величинами, характеризующими механические и электромагнитные колебания? Написав формулы, приведите примеры.
3. За счет какого явления электрический ток в колебательном контуре не исчезает сразу, когда напряжение на конденсаторе становится равным нулю?
4. Какую физическую величину в колебательном контуре можно сопоставить с силой трения в процессе механических колебаний?



Задание (теоретический анализ)

1. Напишите аналогию между колебаниями пружинного маятника и электромагнитными колебаниями колебательного контура для следующих интервалов времени:

- 1) $\frac{1}{4}T < t < \frac{1}{2}T$; 2) $\frac{1}{2}T < t < \frac{3}{4}T$.

2. Напишите формулы для определения мгновенных значений заряда q и смещения x для случая затухающих электрических и механических колебаний. Начертите графики зависимости заряда и перемещения от времени для слабозатухающих колебаний.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 1

- **Колебаниями** называются движения или процессы, обладающие в той или иной степени повторяемостью во времени.
- **Механическими колебаниями** называют движения тел, повторяющиеся точно (или приблизительно) через одинаковые промежутки времени.
- **Гармоническими колебаниями** называются колебания, при которых физическая величина, характеризующая то или иное колебание, изменяется с течением времени по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ или } x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

- **Пружинным маятником** называют груз массы m , прикрепленный к пружине жесткостью k , второй конец которой закреплен неподвижно. Период пружинного маятника определяется по формуле Гюйгенса: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.
- **Математическим маятником** называют материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити. Период математического маятника определяется по формуле Галилея: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.
- **Электромагнитными колебаниями** называют взаимосвязанные колебания электрической напряженности (\vec{E}) и магнитной индукции (\vec{B}) единого электромагнитного поля.
- **Период электромагнитного колебания** определяется формулой Томсона:

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

- **Колебательный контур** – это электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности L и конденсатора емкостью C .
- **Свободными колебаниями** называют колебания, возникающие в системе за счет расходования накопленной собственной энергии.
- **Вынужденными электромагнитными колебаниями** называют колебания, возникающие в системе за счет расходования энергии от внешнего источника.

Глава 2

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  *исследовать принцип работы генератора переменного тока, используя модель генератора;*
-  *характеризовать переменный ток, используя такие физические величины, как период, частота, максимальное и эффективное/действующее значения напряжения, тока, электродвижущая сила;*
-  *представлять синусоидальный переменный ток или напряжение в виде гармонических функций;*
-  *описывать сдвиг фаз только при активной нагрузке (резистор) в цепи переменного тока;*
-  *описывать сдвиг фаз при реактивной нагрузке (катушка, конденсатор) в цепи переменного тока;*
-  *рассчитывать последовательную электрическую цепь переменного тока, содержащую R, L, C ;*
-  *объяснять физический смысл понятий «активная» и «реактивная мощность переменного тока»;*
-  *определять коэффициент мощности путем построения векторной диаграммы;*
-  *объяснять условие резонанса и называть сферы его применения;*
-  *рассчитывать резонансную частоту;*
-  *анализировать принцип работы трансформатора на основе уравнения мощности;*
-  *объяснять экономические преимущества переменного тока высокого напряжения при подаче электрической энергии;*
-  *экспериментально определять число витков в обмотках трансформатора;*
-  *оценивать преимущества и недостатки источников электроэнергии в Казахстане.*

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
генератор	генератор	generator
айнымалы электр тогы	переменный электрический ток	alternating electric current
активті кедергі	активное сопротивление	ohmic resistance
сыйымдылық кедергісі	емкостное сопротивление	capacitive resistance
лездік қуат	мгновенная мощность	instantaneous power
активті қуат	активная мощность	active power
реактивті қуат	реактивная мощность	reactive power
толық қуат	полная мощность	total power
электр резонансы	электрический резонанс	electric resonance
сапалылық	добротность	quality factor
трансформатор	трансформатор	transformer
электр энергетикасы	электроэнергетика	electrical power engineering
жылу электр станциясы	тепловая электростанция	thermal power plant
су электр станциясы	гидроэлектростанция	hydroelectric power plant
атом электр станциясы	атомная электростанция	nuclear power plant

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «генератор», «переменный электрический ток», «активное сопротивление», «емкостное сопротивление», «мгновенная мощность», «активная мощность», «реактивная мощность», «полная мощность», «электрический резонанс», «добротность», «трансформатор», «электроэнергетика», «тепловая электростанция», «гидроэлектростанция», «атомная электростанция».

§ 2.1

Генератор переменного тока

1. Генераторами переменного тока называют устройства, преобразующие энергию того или иного вида в электрическую энергию.

В истории развития источников электрического тока различают следующие их виды.

Гальванический элемент – химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока (рис. 2.1.1, а).

Электростатическая машина (рис. 2.1.1, б) преобразует механическую энергию, используя явление электростатической индукции, при этом на полюсах машины (лейденских банках) накапливаются электрические заряды, разность потенциалов на разрядниках достигает нескольких сотен тысяч вольт.

Солнечная батарея (рис. 2.1.1, в) – объединение фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) – полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в электромагнитную, которая в свою очередь трансформируется в постоянный электрический ток, в отличие от солнечных коллекторов, производящих нагрев материала-теплоносителя.

Термобатарея преобразует тепловую энергию в электрическую (рис. 2.1.1, г). В термобатареях используется несколько термопар, подключенных последовательно или параллельно.

Область применения источников электрического тока различна и определяется их характеристиками. Так, например, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но они не способны создать в цепи сколько-нибудь значимую силу тока. Гальванические же элементы, наоборот, могут дать большой ток, но продолжительность их работы невелика.



Рис. 2.1.1. Виды источников электрического тока

2. В современной энергетике применяют **индукционные генераторы переменного тока**, в которых используется явление электромагнитной индукции. Такие генераторы позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении. Простейшая модель генератора переменного тока – *рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле* вокруг своей оси, где индуцируется электрический ток (рис. 2.1.2).



Рис. 2.1.2. Модель источника индукционного тока

В настоящее время имеется много различных типов индукционных источников тока. Но все они состоят из одних и тех же основных частей, таких как:

- 1) **статор** – неподвижное устройство, создающее магнитное поле. Это может быть либо постоянный магнит, либо электромагнит;
- 2) **ротор** – обмотка, в которой индуцируется ЭДС;
- 3) **кольца со щетками** – неподвижное устройство, с помощью которого снимают с вращающихся частей индукционный ток или подают ток питания электромагнитам.

3. Электромеханический источник переменного тока работает по принципу получения индукционного тока в плоском контуре при его вращении в магнитном поле. Неподвижная часть генератора, аналогичная магниту, называется **статором**, а вращающаяся, т.е. рамка, – **ротором** (рис. 2.1.2 и 2.1.3).

В мощных промышленных генераторах (рис. 2.1.3) вместо постоянного магнита используется электромагнит. Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции \vec{B} .

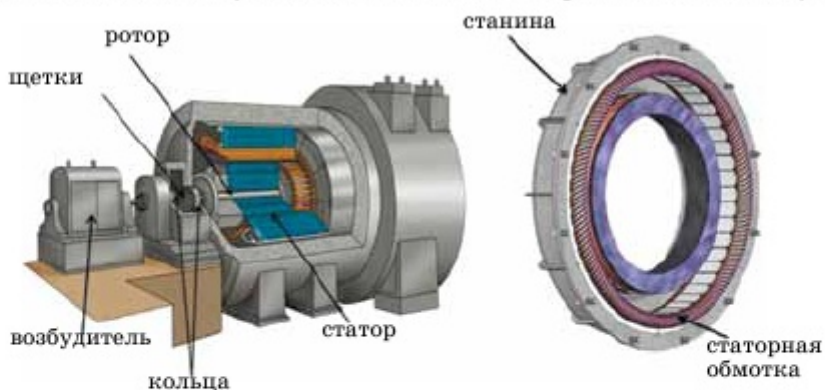


Рис. 2.1.3. Промышленный генератор переменного тока

Статор промышленного генератора представляет собой стальную **станину** цилиндрической формы (**станина** – это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые укладывается толстый медный провод. Именно в них и индуцируется переменный электрический ток при изменении

пронизывающего их магнитного потока. Магнитное поле создается **ротором**. Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток; а через скользящие контакты – подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Ток к этой обмотке подводится через **щетки и кольца** от постороннего источника постоянного тока, называемого **возбудителем**.

На рис. 2.1.3 представлена полная схема генератора переменного тока. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора, периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.



Вопросы

1. Какова роль источников электрического тока в жизнедеятельности человека?
2. Каковы отличительные черты принципов работы различных видов источников электрического тока?
3. Из каких частей состоят индукционные генераторы? В чем заключается их роль?
4. Какова принципиальная разница между статором и ротором? Какую роль они выполняют?



Задание (практическое исследование)

Используя школьную модель генератора, исследуйте принцип работы генератора переменного тока.



Задание (теоретический анализ)

Поясните, почему турбогенераторы, вырабатывающие ток стандартной частоты (50 Гц), имеют, как правило, одну пару полюсов, а гидрогенераторы – во много раз больше.

§ 2.2

Переменный ток

1. Переменным электрическим током называется ток, периодически изменяющийся со временем по величине и направлению.

Процесс получения переменного тока основан на процессах, в результате

которых образуются вынужденные электромагнитные колебания. В этом мы можем убедиться с помощью опыта, описанного ниже. Поместим в постоянное и однородное магнитное поле виток проволоки $abcd$ (рис. 2.2.1).

При вращении этого витка вокруг оси OO' магнитный поток, пронизывающий его площадь, будет постоянно меняться как по величине, так и по направлению (см. также рис. 2.2.1). Вследствие этого, согласно закону электромагнитной индукции, в витке возникает переменная по величине и направлению ЭДС индукции.

Когда плоскость вращающегося витка становится перпендикулярна силовым линиям магнитного поля (рис. 2.2.1, а), пронизывающий ее магнитный поток наибольший ($\Phi = \Phi_{max}$), скорость же изменения этого потока равна нулю ($\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0$), так как при прохождении через это положение проводники витка ab и cd скользят вдоль силовых линий поля, не пересекая их. Следовательно, абсолютная величина ЭДС индукции, возникающая в витке, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока, будет равна нулю:

$$\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \varepsilon_i = 0. \quad (2.1)$$

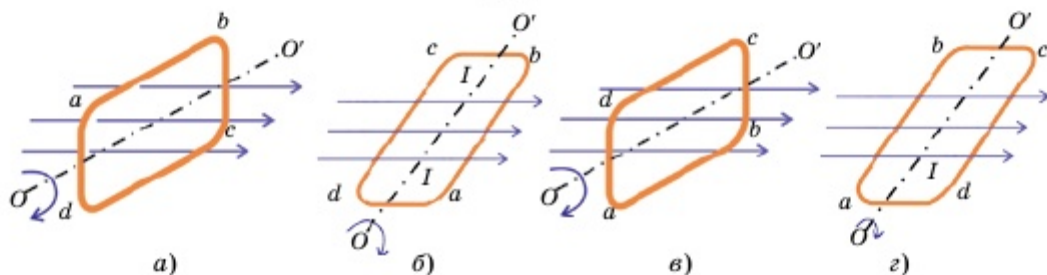


Рис. 2.2.1. Индуцирование переменного тока в витке

Когда же плоскость витка параллельна силовым линиям поля (рис. 2.2.1, б – вид сверху), поток, пронизывающий ее, равен нулю ($\Phi = 0$), скорость же изменения его при прохождении через это положение наибольшая ($\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = max$), так как в этом случае проводники витка ab и cd движутся перпендикулярно к силовым линиям поля. ЭДС, возникающая в этом случае в витке, имеет наибольшее значение. В части ab витка ЭДС будет направлена от чертежа к наблюдателю, а в части cd , наоборот, от наблюдателя за чертеж. В этом случае абсолютная величина ЭДС принимает максимальное значение:

$$\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \varepsilon_{max}. \quad (2.2)$$

При дальнейшем вращении витка ЭДС, сохраняя неизменным свое направление, будет уменьшаться до тех пор, пока опять не станет равной нулю (рис. 2.2.1, в), т.е. в том положении, когда величина магнитного потока будет наибольшей ($\Phi = \Phi_{max}$), а скорость его изменения – наименьшей. Следовательно, абсолютная величина ЭДС также равна нулю:

$$\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \varepsilon_i = 0. \quad (2.3)$$

При дальнейшем вращении витка (рис. 2.2.1, z – вид сверху) скорость изменения потока, пронизывающего виток, будет увеличиваться; следовательно, ЭДС по абсолютной величине будет возрастать. Но так как теперь виток движется навстречу магнитным силовым линиям другой стороной плоскости, то направление в нем ЭДС изменяется на противоположное (в части ab ЭДС направлена от наблюдателя за чертеж, а в части cd – из-за чертежа к наблюдателю). В этом случае абсолютная величина ЭДС вновь принимает максимальное значение:

$$\left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \varepsilon_{max}. \quad (2.4)$$

При последующих оборотах витка все эти явления будут повторяться вновь.

Таким образом, *максимальная величина ЭДС индукции во вращающемся витке за один его оборот изменяется от минус ε_{max} до плюс ε_{max} . Следовательно, в соответствии с изменяющейся ЭДС в витке индуцируется переменный электрический ток.*

2. Для того чтобы пронаблюдать за происходящими изменениями ЭДС непосредственно, разомкнем виток и присоединим его концы к осциллографу. При вращении витка в магнитном поле осциллограф запишет все изменения тока, по которым можно будет судить и об изменениях ЭДС индукции в витке.

На рис. 2.2.2 изображен график изменения ЭДС индукции в витке за время совершения одного полного оборота. Вверху показаны последовательные положения витка в магнитном поле, а внизу – значения ЭДС индукции в витке. Направление силовых линий магнитного потока, пронизывающего виток, показано стрелками. Жирные кружочки изображают сечение витка плоскостью чертежа с указанием направления тока в нем. Маленькими буквами a и d обозначено расположение витка, аналогичного витку, указанному на рис. 2.2.1.

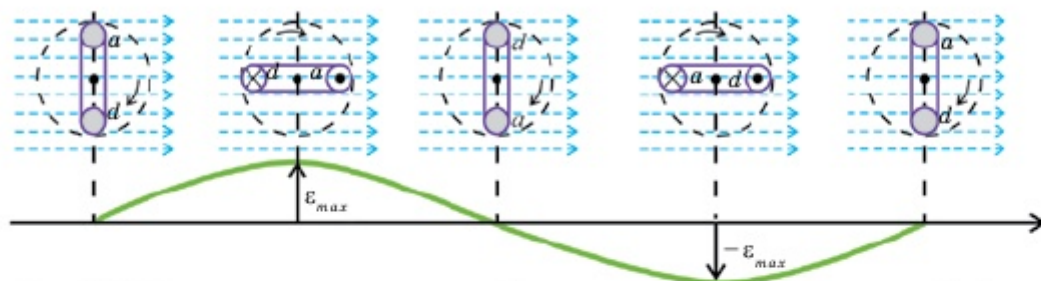


Рис. 2.2.2. График изменения переменной индукционной ЭДС за один полный оборот

Как показывает осциллограмма, ток, возникающий в витке при равномерном его вращении в однородном магнитном поле, изменяется синусоидально. Поэтому такой ток называют *переменным синусоидальным током*.

3. Вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения (или ЭДС), изменяются с циклической частотой по закону синуса или косинуса:

<i>Напряжение</i>	<i>ЭДС</i>	
$u = U_m \sin \omega t;$	$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t;$	
$u = U_m \cos \omega t;$	$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t;$	(2.5)

где U_m – амплитуда напряжения; ε_m – амплитуда ЭДС; ω – циклическая частота; t – время.

Если в цепи напряжение меняется с циклической частотой ω , то и сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Однако *колебания силы тока в цепи не обязательно должны совпадать с колебаниями напряжения*. Поэтому в общем случае мгновенное значение силы тока будет определяться по формуле:

$$\begin{aligned} \text{Сила тока: } i &= I_m \sin(\omega t + \varphi_c); \\ i &= I_m \cos(\omega t + \varphi_c); \end{aligned} \quad (2.6)$$

где I_m – амплитуда силы тока; ω – циклическая частота; φ_c – сдвиг фаз.

4. Рассмотрим еще две основные характеристики переменного тока – *период и частоту*.

Периодом переменного тока T называют промежуток времени, в течение которого ЭДС (или напряжение, или сила тока) совершает одно полное колебание.

Частотой переменного тока ν называется число колебаний переменного тока за одну секунду.

Стандартная частота переменного тока, применяемого в промышленности и осветительной сети в Республике Казахстан, *равна 50 Гц*. Частота в 50 Гц означает, что на протяжении 1 секунды ток 50 раз течет в одну сторону и 50 раз – в другую.



Дополнительный материал

В мире наиболее распространены два основных стандарта напряжения и частоты. Одним из них является *американский стандарт*: 100–127 В и 60 Гц, совместно с вилками А и В. Другой стандарт – *европейский*: 220–240 В и 50 Гц, вилки типов С–М. Большинство стран приняло один из этих двух стандартов, хотя иногда встречаются переходные, или уникальные стандарты.



Вопросы

1. На каком явлении основан процесс получения переменного электрического тока и как этот процесс описывается?
2. Какие параметры характеризуют переменный ток? Как они представляются аналитически и графически?
3. Как известно, график зависимости ЭДС от времени при равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле представляет собой синусоиду. Как изменится график, если частота вращения рамки удвоится?
4. Каким образом можно получить переменный ток в неподвижной рамке?



Задание (теоретическое исследование)

Исходя из электронной проводимости металлической проволоочной рамы, вращающейся в магнитном поле, опишите роль силы Лоренца в индуцировании переменного электрического тока в ней.

**Задание (практическое исследование)**

Подготовьте доклад в виде реферата или презентации о типах вилок/розеток, применяемых в мире. Обратите внимание на типы розеток, используемых в странах, наиболее посещаемых туристами из Казахстана.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Рамка, содержащая 600 витков, равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией 25 мТл относительно неподвижной оси, перпендикулярной линиям магнитной индукции, совершая 360 об/мин. Площадь поперечного сечения рамки равна 100 см². Определите максимальную ЭДС индукции вращающейся рамки; время одного оборота рамки.

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$N = 600$		Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в рамке, содержащей N витков:
$B = 25 \text{ мТл}$	$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$	$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$
$\nu = 360 \text{ мин}^{-1}$	6 с^{-1}	где магнитный поток через один виток
$S = 100 \text{ см}^2$	10^{-2} м^2	$\Phi = BS \cos \omega t = BS \cos 2\pi\nu t, \quad (2)$
$\varepsilon_{i \text{ max}} - ?$		
$T - ?$		

учли, что $\omega = 2\pi\nu$. Подставив выражение (2) в формулу (1), получим

$$\varepsilon_i = -N \frac{d(BS \cos 2\pi\nu t)}{dt} = 2\pi\nu NBS \sin 2\pi\nu t,$$

$\varepsilon_i = \varepsilon_{i \text{ max}}$ при $\sin 2\pi\nu t = 1$. Тогда искомая максимальная ЭДС индукции вращающейся рамки

$$\varepsilon_{i \text{ max}} = 2\pi\nu NBS,$$

$$\varepsilon_{i \text{ max}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 600 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2} = 5,65 \text{ (В)}.$$

Время одного оборота – период $T = \frac{1}{\nu}$, следовательно,

$$T = \frac{1}{6} = 0,167 \text{ (с)}.$$

О т в е т: $\varepsilon_{i \text{ max}} = 5,65 \text{ (В)}$; $T = 0,167 \text{ (с)}$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 2.2.1. Напряжение на концах участка цепи, по которому течет переменный ток, изменяется с течением времени по закону $u = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$. В момент времени $t = \frac{T}{12}$ мгновенное напряжение $u = 10 \text{ В}$. Определите амплитуду

напряжения U_0 , круговую частоту ω и частоту ν , если период колебаний равен 0,01 с. Начертите график изменения напряжения в зависимости от времени. (Ответ: 11,5 В; 628 рад/с; 100 Гц.)

2.2.2. Определите максимальный поток магнитной индукции через прямоугольную рамку, которая вращается в однородном магнитном поле со скоростью 5 об/с. Амплитуда наводимой в рамке ЭДС равна 3,14 В. (Ответ: 0,1 Вб.)

2.2.3. Определите число оборотов в единицу времени прямоугольной рамки, вращающейся в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого составляет 1 Тл, если амплитуда наведенной в рамке ЭДС равна 6,28 В. Площадь рамки – 100 см², число витков рамки – 10. (Ответ: 10 об/с.)

Уровень В

2.2.4. Чему равно число витков в круглом проводящем контуре радиусом 20 см, вращающемся в однородном магнитном поле индукцией 0,25 Тл с частотой 10 с⁻¹, если амплитудное значение ЭДС равно 19,7 В? (Ответ: 10 витков.)

2.2.5. В магнитном поле индукцией 0,2 Тл вращается с частотой 4 с⁻¹ квадратная рамка со стороной 2 см. Найдите действующую ЭДС, возникающую в ней. (Ответ: 2 мВ.)

§ 2.3

Активное и реактивное сопротивления в цепи переменного тока

1. Рассмотрим процессы, происходящие в проводнике, включенном в цепь переменного тока. Если индуктивность проводника настолько мала, что индукционные электрические поля оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с внешним электрическим полем, то движение электрических зарядов в проводнике определяется действием только внешнего электрического поля, напряженность которого пропорциональна напряжению на концах проводника. Исходя из этих условий, расскажем, как изменяются параметры цепи переменного тока, когда в нее подключают отдельно *резистор*, *катушку* и *конденсатор*.

2. **Резистор в цепи переменного тока.** При изменении напряжения на концах проводника по гармоническому закону $u = U_m \cos \omega t$ напряженность \vec{E} электрического поля в проводнике изменяется по такому же закону. Под действием переменного электрического поля в проводнике возникает переменный электрический ток, частота и фаза колебаний которого совпадают с частотой и фазой колебаний напряжения; мгновенное значение силы такого тока равно:

$$i = I_m \cos \omega t.$$

Колебания силы тока в цепи являются вынужденными электрическими колебаниями, возникающими под действием приложенного переменного напряжения. Следовательно, амплитуда силы тока будет пропорциональна амплитуде напряжения:

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad (2.7)$$

где R – электрическое сопротивление проводника.

При совпадении фазы колебаний силы тока и напряжения мгновенная мощность переменного тока равна:

$$p = iu = I_m U_m \cos^2 \omega t. \quad (2.8)$$

Среднее значение функции $\cos^2 \omega t$, как это видно из построенного графика, за период равно 0,5 (рис. 2.3.1), поэтому среднее значение мощности равно:

$$P_{\text{cp}} = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2}. \quad (2.9)$$

Для того чтобы формула для расчета мощности переменного тока совпадала по форме с аналогичной формулой для постоянного тока ($P = I^2 R$), вводятся понятия действующих значений силы тока и напряжения.

Действующим значением силы переменного электрического тока называют величину, которая в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.10)$$

При действующем значении силы тока средняя мощность, выделяющаяся в проводнике в цепи переменного тока, равна мощности, выделяющейся в том же проводнике в цепи постоянного тока.

Действующее значение переменного напряжения в $\sqrt{2}$ раза меньше его амплитудного значения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.11)$$

Средняя мощность переменного тока при совпадении фаз колебаний силы тока и напряжения равна произведению действующих значений силы тока и напряжения:

$$P = IU. \quad (2.12)$$

Заметим, что обычно электроизмерительные приборы для цепей переменного тока показывают действующие значения измеряемых величин.

Активным сопротивлением R называется физическая величина, определяемая отношением среднего значения мощности P переменного тока, поглощаемой на участке электрической цепи, к квадрату действующего значения силы электрического тока I на этом участке:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (2.13)$$

Средняя мощность, выделяющаяся на участке цепи переменного тока, равна произведению квадрата действующего значения силы электрического тока на активное сопротивление R данного участка цепи:

$$P = I^2 R. \quad (2.14)$$

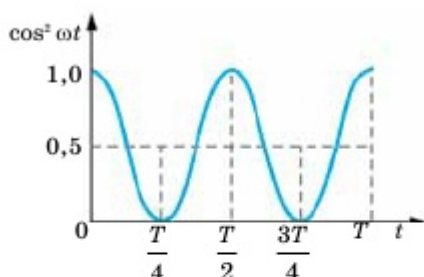


Рис. 2.3.1. График функции $\cos^2 \omega t$

При небольших значениях частоты переменного тока активное сопротивление проводника не зависит от частоты и практически совпадает с его электрическим сопротивлением в цепи постоянного тока.

В электрических цепях переменного тока, кроме активного сопротивления, возникают и *реактивные сопротивления*.

Реактивное сопротивление – это сопротивление элемента схемы (катушка или конденсатор), вызванное изменением тока или напряжения из-за индуктивности катушки или емкости конденсатора.

3. Катушка в цепи переменного тока. В любом проводнике, по которому протекает переменный ток, возникает ЭДС самоиндукции. Влияние явления самоиндукции на процессы в цепях переменного тока рассмотрим на упрощенном примере. Пусть в цепь переменного тока включена идеальная катушка с электрическим сопротивлением провода, равным нулю. При изменениях силы тока по гармоническому закону:

$$i = I_m \cos \omega t, \quad (2.15)$$

в катушке возникает ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon = -Li' = I_m L \omega \sin \omega t, \quad (2.16)$$

где L – индуктивность катушки; ω – циклическая частота переменного тока.

Так как электрическое сопротивление катушки равно нулю, то ЭДС самоиндукции в ней в любой момент времени равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному внешним генератором:

$$u = -\varepsilon = -I_m L \omega \sin \omega t. \quad (2.17)$$

Эту формулу можно представить математически тождественной формулой:

$$u = I_m L \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.18)$$

Как видно из формул (2.15) и (2.18), колебания напряжения на концах катушки опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$. Произведение $I_m L \omega$ является амплитудой колебаний напряжения на катушке:

$$U_m = I_m L \omega. \quad (2.19)$$

Введем обозначение $X_L = L\omega$, которое называется *индуктивным сопротивлением*:

$$X_L = \frac{U_m}{I_m} = L\omega. \quad (2.20)$$

При использовании индуктивного сопротивления $X_L = L\omega$ связь амплитуды колебаний напряжения на концах идеальной катушки с амплитудой колебаний силы тока в ней совпадает по форме с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока:

$$I_m = \frac{U}{X_L}. \quad (2.21)$$

Из выражений (2.20) и (2.21) вытекает следующий вывод: индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте переменного тока; поэтому амплитуда

колебаний силы тока в катушке при постоянном значении амплитуды колебаний напряжения обратно пропорциональна частоте: $I_m \sim \frac{1}{\omega}$.

Сдвиг фазы колебаний напряжения на идеальной катушке относительно фазы колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$ приводит к тому, что мощность переменного тока на катушке в течение периода меняет знак; следовательно, среднее значение мощности переменного тока на идеальной катушке за период оказывается равным нулю.

4. Конденсатор в цепи переменного тока. При включении конденсатора в цепь переменного тока процесс его зарядки длится четверть периода. После достижения амплитудного значения напряжение между обкладками конденсатора уменьшается и конденсатор в течение четверти периода разряжается. В следующую четверть периода конденсатор вновь заряжается, но полярность напряжения на его обкладках изменяется на противоположную, далее чередование разрядки и зарядки конденсатора продолжается. Процессы зарядки и разрядки конденсатора чередуются с периодом, равным периоду колебаний приложенного переменного напряжения.

Как и в цепи постоянного тока, через диэлектрик, разделяющий обкладки конденсатора, электрические заряды не проходят. Но в результате периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора по проводам, соединенным с его выводами, течет переменный ток. Лампа накаливания, включенная последовательно с конденсатором в цепь переменного тока, кажется горячей непрерывно, так как человеческий глаз при высокой частоте колебаний силы тока не замечает периодического ослабления свечения нити лампы.

При изменениях напряжения на обкладках конденсатора по гармоническому закону:

$$u = U_m \cos \omega t, \quad (2.22)$$

заряд на его обкладках также изменяется по этому же закону:

$$q = Cu = U_m C \cos \omega t.$$

Колебание силы электрического тока в цепи определяется как производная заряда по времени:

$$i = q' = -U_m \omega C \sin \omega t = U_m \omega C \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.23)$$

Сравнение выражений (2.22) и (2.23) показывает, что колебания напряжения на обкладках конденсатора в цепи переменного тока отстают по фазе от колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$. Произведение $U_m \omega C$ является амплитудой колебаний силы электрического тока:

$$I_m = U_m \omega C. \quad (2.24)$$

Отношение амплитуды колебаний напряжения на конденсаторе к амплитуде колебаний силы электрического тока называют емкостным сопротивлением конденсатора и обозначают знаком X_c :

$$X_c = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{C\omega}. \quad (2.25)$$

Связь между амплитудным значением силы электрического тока и амплитудным значением напряжения по форме совпадает с выражением закона Ома для участка цепи постоянного тока, в котором вместо электрического сопротивления фигурирует емкостное сопротивление конденсатора:

$$I_m = \frac{U_m}{X_c}. \quad (2.26)$$

Емкостное сопротивление конденсатора, как и индуктивное сопротивление катушки, не является постоянной величиной. Оно обратно пропорционально частоте переменного тока. Поэтому амплитуда колебаний силы тока в цепи конденсатора при постоянной амплитуде колебаний напряжения на конденсаторе возрастает прямо пропорционально частоте: $I_m \sim \omega$.

Сдвиг фазы колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$ относительно фазы колебаний напряжения на конденсаторе приводит к тому, что мощность переменного тока на конденсаторе в течение первой половины периода имеет положительный знак, а в течение второй половины – отрицательный. Следовательно, среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период оказывается равным нулю. Физический смысл этого результата заключается в том, что сначала за счет работы внешнего генератора происходит зарядка конденсатора и накопление энергии электрического поля, а затем за счет энергии электрического поля конденсатора создается электрический ток противоположного направления. В результате работа электрического тока за период и средняя мощность становятся равными нулю.



Вопросы

1. Какими физическими величинами характеризуется цепь переменного тока, если в нее включают резистор? Каковы их формулы? Какое сопротивление называется активным?
2. Какими физическими величинами характеризуется цепь переменного тока, если в нее включают катушку? Каковы их формулы? Какие сопротивления называются реактивным и индуктивным?
3. Какими физическими величинами характеризуется цепь переменного тока, если в нее включают конденсатор? Каковы их формулы? Какое сопротивление называется емкостным?
4. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока? Каковы их формулы?
5. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на катушке индуктивности с пренебрежимо малым активным сопротивлением?

**Задание (теоретическое исследование)**

1. Цепь с источником переменного напряжения $u = U_m \cos \omega t$ содержит резистор с активным сопротивлением R ($L \rightarrow 0$; $C \rightarrow 0$). Запишите выражение для мгновенного значения силы тока, проходящего через резистор, амплитудного значения силы тока. Нарисуйте цепь и графики зависимости $I_m(t)$ и $U_m(t)$ для этой цепи. Что можно сказать о фазе колебаний напряжения на резисторе и силы тока в цепи?
2. Цепь с источником переменного напряжения $u = U_m \cos \omega t$ содержит конденсатор с емкостью C ($R \rightarrow 0$; $L \rightarrow 0$). Напишите выражения для силы тока в цепи, амплитудного значения силы тока, напряжения на конденсаторе. Нарисуйте цепь и графики зависимости $I_c(t)$ и $U_c(t)$ для этой цепи. Как сдвинуты по фазе колебания напряжения и силы тока в цепи с конденсатором?
3. Цепь с источником переменного напряжения $u = U_m \cos \omega t$ содержит катушку индуктивностью L ($R \rightarrow 0$; $C \rightarrow 0$). Напишите выражения для мгновенного значения напряжения на катушке и силы тока в цепи, амплитудного значения силы тока. Нарисуйте цепь и графики зависимости $I_L(t)$ и $U_L(t)$ для этой цепи. Как сдвинуты по фазе колебания напряжения и силы тока в цепи с катушкой индуктивности?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Катушка индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь, включена в цепь переменного тока стандартной частоты. При напряжении 220 В сила тока в ней равна 2 А. Найдите индуктивность катушки.

Д а н о: $\nu = 50$ Гц $U = 220$ В $I = 2$ А $L = ?$	Р е ш е н и е: Для нахождения индуктивности воспользуемся формулой индуктивного сопротивления $X_L = \omega L$, где $\omega = 2\pi\nu$, поэтому $X_L = 2\pi\nu L$, откуда $L = \frac{X_L}{2\pi\nu}$.
--	---

Применим закон Ома для цепи переменного тока, в которой имеется только индуктивное сопротивление: $I = \frac{U}{X_L}$, откуда $X_L = \frac{U}{I}$.

Здесь I и U – действующие значения переменного тока. В итоге получаем $L = \frac{U}{2\pi\nu I}$.

Произведем вычисление: $L = \frac{220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2} = 0,35$ (Гн).

О т в е т: $L = 0,35$ (Гн).

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

2.3.1. Катушка индуктивностью 6 мГн с активным сопротивлением 8 Ом подключена

- к источнику переменного тока с циклической частотой 1000 рад/с. Найдите сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения. (*Ответ: $\approx 37^\circ$.*)
- 2.3.2. Конденсатор включен в цепь переменного тока стандартной частоты. Вольтметр, подключенный к этой цепи, показывает напряжение 220 В, а амперметр, включенный в нее, показывает силу тока 2,5 А. Какова емкость конденсатора? (*Ответ: 36 мкФ.*)
- 2.3.3. Индуктивное сопротивление катушки равно 500 Ом, эффективное напряжение сети, в которую включена катушка, – 100 В, частота тока – 1000 Гц. Определите амплитуду тока в цепи и индуктивность катушки. Активным сопротивлением катушки и проводящих проводов пренебречь. (*Ответ: 0,28 А; 0,079 Гн.*)
- 2.3.4. Катушка с ничтожно малым активным сопротивлением включена в цепь переменного тока стандартной частоты. При напряжении 120 В сила тока в этой цепи составляет 2,5 А. Найдите индуктивность катушки L . (*Ответ: 0,15 Гн.*)
- Уровень В**
- 2.3.5. Напишите уравнения, выражающие зависимость напряжения $u = u(t)$ и силы тока $i = i(t)$ от времени t в резисторе сопротивлением 100 Ом, включенном в сеть переменного тока с напряжением 220 В стандартной частоты. (*Ответ: $u(t) = 311 \cos 100 \pi t$; $i(t) = 3,11 \cos 100 \pi t$.*)
- 2.3.6. Во сколько раз уменьшится индуктивное сопротивление катушки, если ее включить в цепь переменного тока с частотой 50 Гц вместо 10 кГц? (*Ответ: в 200 раз.*)
- Уровень С**
- 2.3.7. При включении катушки в цепь постоянного тока с напряжением 21 В сила тока равна 7 А. Если катушку включить в цепь переменного тока с таким же напряжением и частотой 50 Гц, то сила тока в цепи будет равна 3 А. Определите индуктивность катушки. (*Ответ: 0,02 Гн.*)
- 2.3.8. Рамка вращается в магнитном поле и содержит 100 витков медного провода сечением $0,5 \text{ мм}^2$. Длина одного витка равна 40 см. Определите действующее значение тока в проводнике сопротивлением 5,6 Ом, который присоединен к концам рамки, если максимальное значение ЭДС в обмотке рамки 2 В. Удельное сопротивление меди составляет $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. (*Ответ: 0,2 А.*)
- 2.3.9. Рамка площадью 200 см^2 вращается вокруг своей оси с частотой 10 Гц в магнитном поле с индукцией 1 Тл. В начальный момент времени нормаль к плоскости рамки направлена вдоль линий магнитной индукции. Напишите уравнение зависимости ЭДС индукции от времени для данной рамки. (*Ответ: $\varepsilon = 1,256 \sin 62,8 t$.*)
- 2.3.10. Действующее значение напряжения в сети переменного тока с частотой 50 Гц равно 120 В. Определите время, в течение которого горит неоновая лампа в каждом полупериоде, если потенциал зажигания лампы равен 84 В. (*Ответ: 6,7 мс.*)

§ 2.4

Закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока, содержащей активное и реактивное сопротивление

1. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных *резистора, конденсатора и катушки* (рис. 2.4.1). Если к выводам этой электрической цепи приложить электрическое напряжение, изменяющееся по гармоническому закону с частотой ω и амплитудой U_m , то в цепи возникнут вынужденные колебания силы электрического тока с той же частотой и некоторой амплитудой I_m . Установим связь между амплитудами колебаний силы тока и напряжения.

В любой момент времени сумма мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементах цепи равна мгновенному значению приложенного напряжения:

$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (2.27)$$

Во всех последовательно включенных элементах цепи изменения силы электрического тока происходят практически одновременно, так как электромагнитные взаимодействия распространяются со скоростью света. Поэтому можно считать, что колебания силы электрического тока во всех элементах последовательной цепи происходят по закону:

$$i = I_m \cos \omega t. \quad (2.28)$$

Как было показано в § 2.3, колебания напряжения на резисторе совпадают по фазе с колебаниями силы электрического тока, колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе на $\frac{\pi}{2}$ от колебаний силы тока, а колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому уравнение (2.27) можно записать так:

$$u = U_{Rm} \cos \omega t + U_{Lm} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + U_{Cm} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.29)$$

где U_{Rm} , U_{Lm} и U_{Cm} – амплитуды колебаний напряжения на резисторе, катушке и конденсаторе.

2. Рассмотрим метод векторных диаграмм. В данном методе *токи, напряжения и ЭДС*, действующие в цепи, представляются в виде векторов. Модуль вектора равен амплитуде. Угол между векторами численно равен сдвигу фаз ϕ между ними. Обычно один из векторов выбирается в качестве исходного направления, от которого отсчитываются все сдвиги фаз, т.е. направления остальных векторов.

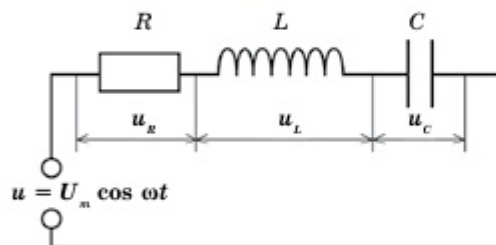


Рис. 2.4.1. Цепь переменного тока

В последовательной цепи удобно в качестве исходного направления выбрать вектор тока \vec{I}_m (рис. 2.4.2), в параллельной цепи – вектор напряжения.

Амплитудные значения векторов напряжений на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе емкости, а также тока представлены в формулах (2.7), (2.19) и (2.24). Вектор напряжения на *резисторе* $\vec{U}_{Rm} = R\vec{I}_m$ параллелен вектору тока \vec{I}_m (сдвиг фаз $\varphi = 0$). Модули векторов, отображающих напряжения на *индуктивности* и *емкости*, соответственно равны $U_{Lm} = \omega LI_m$ и $U_{Cm} = \frac{I_m}{\omega C}$. Вектор \vec{U}_{Lm} повернут относительно вектора \vec{I}_m на угол $+90^\circ$ (против часовой стрелки), а вектор \vec{U}_{Cm} – на угол (-90°) , т.е. по часовой стрелке.

3. Амплитуду колебаний напряжения в цепи переменного тока можно выразить через амплитудные значения напряжения на отдельных ее элементах, воспользовавшись **методом векторных диаграмм**. При построении векторной диаграммы необходимо учитывать, что колебания напряжения на резисторе совпадают по фазе с колебаниями силы электрического тока: поэтому вектор, изображающий амплитуду напряжения \vec{U}_{Rm} , совпадает по направлению с вектором, изображающим амплитуду силы тока \vec{I}_m (рис. 2.4.2). Колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе на $\frac{\pi}{2}$ от колебаний силы тока, поэтому вектор \vec{U}_{Cm} отстает от вектора \vec{I}_m на угол 90° . Колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока по фазе на $\frac{\pi}{2}$, поэтому вектор \vec{U}_{Lm} опережает вектор \vec{I}_m на угол 90° .

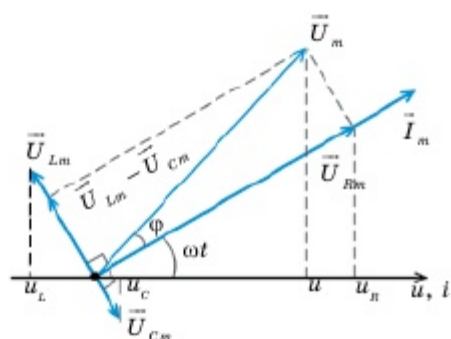


Рис. 2.4.2. Векторные диаграммы

На векторной диаграмме мгновенные значения напряжения на резисторе, конденсаторе и катушке определяются проекциями на горизонтальную ось векторов U_{Rm} , U_{Cm} и U_{Lm} , вращающихся с одинаковой угловой скоростью ω против часовой стрелки. Мгновенное значение напряжения во всей цепи u равно сумме мгновенных значений напряжения u_R , u_L и u_C отдельных элементов цепи, т.е. сумме проекций векторов U_{Rm} , U_{Cm} и U_{Lm} на горизонтальную ось. Следовательно, амплитуду \vec{U}_m полного напряжения можно найти как модуль суммы вышеуказанных векторов:

$$\vec{U}_m = \vec{U}_{Rm} + \vec{U}_{Cm} + \vec{U}_{Lm}. \quad (2.30)$$

Из прямоугольного треугольника (рис. 2.4.2) амплитуду колебаний напряжения U_m на всей цепи определим по теореме Пифагора:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}, \quad (2.31)$$

или

$$U_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2} = I_m \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2.32)$$

Отсюда получим закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока, содержащей активное и реактивное сопротивления:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (2.33)$$

Знаменатель формулы (2.33) представляет собой *полное электрическое сопротивление* последовательной электрической цепи переменного тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (2.34)$$

4. Фаза колебаний полного напряжения равна $(\omega t + \varphi)$ (рис. 2.4.2), следовательно, мгновенное значение полного напряжения последовательной цепи определяется формулой:

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi). \quad (2.35)$$

Сдвиг фазы φ колебаний напряжения относительно фазы колебаний силы электрического тока можно найти из векторной диаграммы:

$$\cos \varphi = \frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{R}{Z} \quad (2.36)$$

или

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (2.37)$$

Угол φ можно определить также по формуле: $\operatorname{tg} \varphi = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) / R$. (2.38)



Вопросы

1. Как записываются уравнения для мгновенных значений силы тока и напряжения в цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные резистор, катушку и конденсатор?
2. Как можно определить амплитудные значения напряжения и силы тока для всей электрической цепи, в которой последовательно соединены резистор, катушка и конденсатор: а) методом векторных диаграмм; б) аналитическим выражением (т.е. формулой)?
3. Как записывается закон Ома для электрической цепи переменного тока, содержащей резистор, катушку и конденсатор?
4. Какая величина называется полным электрическим сопротивлением цепи переменного тока и какой формулой она выражается?
5. Как определяется сдвиг фазы между напряжением и током аналитически и по векторной диаграмме?

**Задание (экспериментальное исследование)**

1. Лампа накаливания включена последовательно с катушкой индуктивности. Принимая, что действующее значение силы переменного тока постоянно, как будет изменяться накал лампы, если уменьшать частоту переменного тока; в катушку вдвигать железный сердечник?
2. Постройте векторную диаграмму для цепи переменного тока, содержащей последовательно включенные конденсатор емкостью C и резистор сопротивлением R . К цепи приложено переменное напряжение $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$. Определите сопротивление этой цепи.
3. Имеется цепь переменного тока, содержащая последовательно включенные резистор сопротивлением R , конденсатор емкостью C и катушку индуктивностью L . К концам этой цепи подается переменное напряжение $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$. Чему равно полное сопротивление этой цепи?
4. В цепь последовательно включены конденсатор переменной емкости и лампа накаливания. Как изменится накал лампы, если при постоянном напряжении увеличить емкость конденсатора?
5. В цепь последовательно включены конденсатор переменной емкости и лампа накаливания. Как и почему изменится накал лампы, если уменьшить емкость конденсатора, параллельно конденсатору включить еще один такой же конденсатор; включить такой же конденсатор последовательно; увеличить частоту переменного тока?



Активное и реактивное сопротивления в цепь переменного тока можно включить и параллельно. Этот случай рассматривается ниже на примере решения задачи.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Конденсатор емкостью 200 мкФ , резистор сопротивлением 100 Ом и катушка индуктивностью 50 мГн соединены параллельно и подключены к источнику с действующим напряжением 220 В (рис. 2.4.3). Найдите амплитуды сил токов I_{Cm} , I_{Rm} и I_{Lm} в параллельных ветвях и амплитуду силы тока I_m в неразветвленной части цепи. Частота переменного тока стандартная. Найдите полное сопротивление цепи Z .

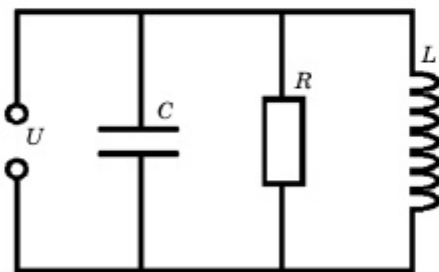


Рис. 2.4.3

Д а н о:	СИ
$C = 200 \text{ мкФ}$	$2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$
$R = 100 \text{ Ом}$	
$L = 50 \text{ мГн}$	$5 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$
$U = 220 \text{ В}$	
$\nu = 50 \text{ Гц}$	

$I_{Cm} - ?$
$I_{Rm} - ?$
$I_{Lm} - ?$
$I_m - ?$
$Z - ?$

Р е ш е н и е:

Поскольку амплитудное напряжение $U_m = U\sqrt{2}$ Ом на всех параллельных участках этой цепи одинаково, то амплитуды сил токов в отдельных параллельных ветвях найти достаточно просто. Для этого воспользуемся законом Ома:

$$I_{Cm} = \frac{U_m}{X_C} = \frac{U\sqrt{2}}{X_C}, \quad (1)$$

где емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), найдем одну из искоемых величин:

$$I_{Cm} = 2\sqrt{2}\pi\nu CU. \quad (3)$$

Аналогичным образом найдем I_{Rm} :

$$I_{Rm} = \frac{U_m}{R} \quad \text{или} \quad I_{Rm} = \frac{U\sqrt{2}}{R}. \quad (4)$$

Теперь таким же образом найдем и I_{Lm} : $I_{Lm} = \frac{U}{X_L} = \frac{U\sqrt{2}}{X_L}$, где индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi\nu L$, поэтому

$$I_{Lm} = \frac{U\sqrt{2}}{2\pi\nu L}. \quad (5)$$

Подчеркнем, что амплитуда силы тока I_m в общей части цепи не равна сумме амплитуд сил токов в ее параллельных участках, ведь сила тока в них достигает максимума в разные моменты времени. Для нахождения I_m построим **векторную диаграмму** (рис. 2.4.4), выбрав в качестве исходного направления вектор \vec{U}_m .

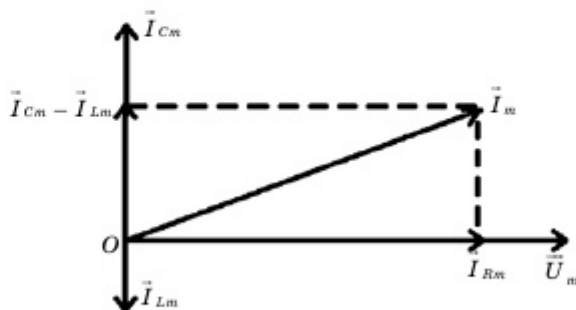


Рис. 2.4.4

Отложим по горизонтали вектор, соответствующий амплитуде силы тока в активном сопротивлении \vec{I}_{Rm} . Именно с этим вектором совпадает вектор \vec{U}_m , соответствующий амплитуде напряжения. Колебания напряжения на конденсаторе отстают от колебаний силы тока на $\frac{\pi}{2}$. Иными словами, колебания силы тока на нем опережают колебания напряжения тоже на $\frac{\pi}{2}$. Значит, они опережают и колебания силы тока в резисторе на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому мы отложим вектор, соответствующий амплитуде силы тока \vec{I}_{Cm} , вертикально вверх. В катушке колебания силы тока отстают по фазе на $\frac{\pi}{2}$ от колебаний напряжения, поэтому вектор, соответствующий \vec{I}_{Lm} , отложим вертикально вниз. Затем произведем сложение векторов, соответствующих \vec{I}_{Rm} и $\vec{I}_{Cm} - \vec{I}_{Lm}$, после чего найдем I_m , воспользовавшись теоремой Пифагора:

$$I_m = \sqrt{I_{Rm}^2 + (I_{Cm} - I_{Lm})^2}. \quad (6)$$

Чтобы найти полное сопротивление Z такой цепи, подставим (3), (4), (5) и (6) в соответствующие равенства, а также учтем, что по закону Ома

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U\sqrt{2}}{Z}, \text{ поэтому } Z = \frac{U\sqrt{2}}{I_m}.$$

Произведем вычисления:

$$I_{Cm} = 2\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 220 = 19,54 \text{ (А)};$$

$$I_{Rm} = \frac{220\sqrt{2}}{100} = 3,11 \text{ (А)};$$

$$I_{Lm} = \frac{220\sqrt{2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,05} = 19,82 \text{ (А)};$$

$$I_m = \sqrt{3,11^2 + (19,54 - 19,82)^2} = 3,12 \text{ (А)};$$

$$Z = \frac{220\sqrt{2}}{3,12} = 99,7 \text{ (Ом)}.$$

О т в е т: $I_{Cm} = 19,54 \text{ (А)}$; $I_{Rm} = 3,11 \text{ (А)}$;

$I_{Lm} = 19,82 \text{ (А)}$; $I_m = 3,12 \text{ (А)}$; $Z = 99,7 \text{ (Ом)}$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 2.4.1. Амплитудное значение силы тока в колебательном контуре, содержащем конденсатор и катушку индуктивности, $I_m = 1$ мА. Максимальный заряд на обкладках конденсатора $Q_m = 2$ мкКл, его емкость $C = 20$ мкФ. Определите индуктивность катушки. (Ответ: 0,2 Гн.)
- 2.4.2. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 50 мкФ, катушки индуктивностью 25 мГн и активным сопротивлением 20 Ом. Определите частоту свободных электромагнитных колебаний в этом контуре. (Ответ: 127 Гц.)
- 2.4.3. В цепь переменного тока стандартной частоты с напряжением 220 В последовательно включены активное сопротивление 150 Ом и конденсатор емкостью 16 мкФ. Найдите максимальное значение силы тока I_m в этой цепи. (Ответ: 1,25 А.)

Уровень В

- 2.4.4. В цепь переменного тока стандартной частоты включены последовательно резистор сопротивлением 500 Ом и катушка индуктивности. При этом между колебаниями напряжения и силы тока наблюдался сдвиг по фазе $\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$. Найдите индуктивность катушки L . Какую емкость C надо включить в цепь последовательно, чтобы сдвиг по фазе φ_2 стал равен нулю? (Ответ: 1,6 Гн; $6,3 \cdot 10^{-6}$ Ф.)
- 2.4.5. Заряженный конденсатор емкостью C подключен к двум параллельным катушкам с индуктивностями L_1 и L_2 . После замыкания ключа K максимальный ток в катушке L_1 стал равен I_{m1} . Найдите максимальный заряд q_m на обкладках конденсатора в момент замыкания. Активным сопротивлением пренебречь. (Ответ: $q_m = I_{m1} \sqrt{CL_1 \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)}$.)
- 2.4.6. Действующее значение напряжения на конденсаторе в контуре составляет 100 В. Определите максимальное значение энергии конденсатора и катушки в контуре, если емкость конденсатора равна 10 пФ. (Ответ: 0,1 мкДж.)

Уровень С

- 2.4.7. Конденсатор емкостью 40 нФ зарядили до напряжения 100 В и замкнули на катушку индуктивностью 0,1 мГн. Считая сопротивление контура ничтожно малым, определите амплитуду силы тока в данном колебательном контуре. (Ответ: 2 А.)

- 2.4.8. Конденсатор емкостью 1 мкФ, катушка индуктивностью 0,2 Гн и резистор включены последовательно в цепь переменного тока стандартной частоты. Найдите амплитуду напряжения на резисторе, если амплитуда силы тока в цепи составляет 3 А, а вольтметр, подключенный к концам цепи, показал напряжение 300 В. (*Ответ: 385 В.*)
- 2.4.9. Катушка сопротивлением 10 Ом и индуктивностью L включена в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Определите индуктивность катушки, если известно, что сдвиг фаз между током и напряжением равен 60° . (*Ответ: 0,055 Гн.*)
- 2.4.10. Катушка индуктивностью 0,0184 Гн и резистор R соединены параллельно и включены в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Найдите величину R , если известно, что сдвиг фаз между током и напряжением равен 60° . (*Ответ: 10 Ом.*)

§ 2.5

Мощность в цепи переменного тока

1. Мгновенная мощность p в цепи переменного тока равна произведению мгновенного значения силы тока i на мгновенное значение напряжения u :

$$p = iu. \quad (2.39)$$

Так как сила тока и напряжение в цепи периодически изменяются, изменяется со временем и мгновенная мощность. Поэтому цепь переменного тока обычно характеризуют ее средней мощностью за период.

Среднюю мощность P переменного тока называют активной мощностью или просто мощностью переменного тока. При наличии в цепи реактивных элементов между колебаниями силы электрического тока и напряжения в цепи существует сдвиг по фазе на некоторый угол φ :

$$u = U_m \sin \omega t = U \sqrt{2} \sin \omega t, \quad (2.40)$$

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi) = I \sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi). \quad (2.41)$$

Соответственно, *мощность переменного тока* равна:

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2.42)$$

где φ – сдвиг фазы между колебаниями силы электрического тока и напряжения; U и I – действующие значения напряжения и силы тока.

Величина $\cos \varphi$ называется *коэффициентом мощности*.

Формула (2.41) показывает, что потребляемая мощность в сети переменного тока зависит не только от амплитуд колебаний силы тока и напряжения, но и от значения коэффициента мощности, т.е. от сдвига фаз колебаний силы электрического тока и напряжения.

2. Сдвиг фаз колебаний силы тока и напряжения в сетях переменного тока возникает из-за включения элементов (например, электродвигателей, трансформаторов), обладающих значительным индуктивным сопротивлением. Снижение коэффициента мощности ведет к уменьшению полезной мощности переменного тока. Для повышения коэффициента мощности часто *параллельно* с индуктивными элементами включают конденсаторы, вследствие чего полное сопротивление цепи определяется формулой:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}. \quad (2.43)$$

3. В цепи переменного тока, содержащей активное и реактивное сопротивления, кроме активной мощности выделяется еще реактивная мощность.

Активная мощность $P = UI \cos \varphi$ характеризует необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в другие виды: механическую, тепловую, световую и т.д.

Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$ характеризует обратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в энергию магнитного поля катушки и энергию электрического поля конденсатора.

Полная мощность $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ характеризует наибольшее значение активной мощности при заданных действующих значениях тока и напряжения.

Полная, активная и реактивная мощности тригонометрически соотносятся друг с другом векторной диаграммой (треугольником мощностей), как показано на рис. 2.5.1.

Как видно из рис. 2.5.1, коэффициент мощности цепи переменного тока можно определить через отношение активной мощности к полной мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.44)$$

Все виды мощности имеют одинаковую размерность, поэтому для их отличия от активной мощности, измеряемой в **ваттах [Вт]**, для полной мощности введена единица – **вольт-амперы [ВА]**, а для реактивной мощности – **вольт-амперы реактивные [ВАр]**.

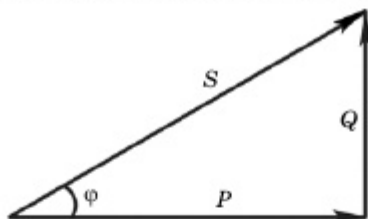


Рис. 2.5.1. Диаграмма мощностей



Дополнительный материал

- Резистор потребляет активную мощность и отдает ее в виде тепла и света.
- Индуктивность потребляет реактивную мощность и отдает ее в виде магнитного поля.
- Конденсатор потребляет реактивную мощность и отдает ее в виде электрического поля.

**Вопросы**

1. Как можно объяснить разницу между такими физическими понятиями, как «мгновенная мощность» и «активная мощность»?
2. Каким образом можно увеличить коэффициент мощности?
3. В чем заключается физический смысл понятий «активная мощность переменного тока» и «реактивная мощность переменного тока»?
4. Что означает «треугольник мощностей»? Как определяют коэффициент мощности?
5. Какими единицами измеряются активная, реактивная и полная мощности?

**Задание (теоретическое исследование)**

Вдоль жесткого провода, по которому пропускается переменный ток от городской сети, расположена мягкая тонкая металлическая нить. В одном случае через нить пропускается также переменный ток от городской сети. В другом случае через нить пропускается постоянный ток. Определите, что будет происходить с нитью в каждом случае.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Найдите сдвиг фаз φ между напряжением и током в цепи, состоящей из последовательно включенных сопротивления $R = 1$ кОм, катушки индуктивности $L = 50$ Гн и конденсатора емкостью $C = 1$ мкФ. Найдите среднюю мощность тока P в этой цепи, если амплитуда напряжения $U_m = 100$ В, а частота колебаний тока $\nu = 50$ Гц.

Дано:	СИ
$R = 1$ кОм	10^3 Ом
$L = 50$ Гн	
$C = 1$ мкФ	10^{-6} Ф
$U_m = 100$ В	
$\nu = 50$ Гц	
$\varphi = ?$	
$P = ?$	

Решение:

Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, содержащей емкость и индуктивность,

определяет формула $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$.

Здесь ω – циклическая частота колебаний тока в цепи. Поскольку $\omega = 2\pi\nu$, то

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}}{R}.$$

Зная $\operatorname{tg} \varphi$, несложно определить и сам сдвиг фаз φ :

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C}}{R} \right).$$

Средняя мощность переменного тока P :

$$P = UI \cos \varphi. \quad (1)$$

Здесь U и I – действующие напряжение и сила тока в этой цепи.

Из условия задачи нам известно максимальное напряжение U_m в этой цепи, поэтому воспользуемся формулой:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Сложнее найти действующее значение силы тока I . Его можно определить по закону Ома для полной цепи переменного тока:

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

Тогда с учетом, что $\omega = 2\pi\nu$ и $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, получаем

$$I = \frac{U_m}{\sqrt{2 \left(R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C} \right)^2 \right)}}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), определим вторую искомую величину – мощность P :

$$P = \frac{U_m^2 \cos \varphi}{2 \sqrt{R^2 + \left(2\pi\nu L - \frac{1}{2\pi\nu C} \right)^2}}.$$

Произведем вычисления:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 - \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}}{10^3} \right) = 85,5^\circ.$$

$$P = \frac{10^4 \cdot \cos 85,5^\circ}{2 \sqrt{10^6 + \left(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 - \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \right)^2}} = 0,03 \text{ (Вт)}.$$

О т в е т: $\varphi = 85,5^\circ$; $P = 0,03$ (Вт).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

2.5.1. К катушке индуктивности подведено напряжение, изменяющееся по закону $u = 100 \cos 100\pi t$. Амплитуда силы тока в катушке $I_m = 8$ А, ее

- активное сопротивление $R = 2$ Ом. Определите индуктивность катушки L , активную мощность тока в ней P и коэффициент мощности $\cos \varphi$. (*Ответ: 9,3 Гн; 226 Вт; 0,565.*)
- 2.5.2. Электрическая цепь состоит из последовательно соединенных сопротивления $R = 4$ Ом, катушки $L = 6,37$ мГн и конденсатора $C = 159$ мкФ; она питается от источника синусоидального тока с частотой 200 Гц и напряжением 120 В. Вычислите ток в цепи, напряжение на всех участках, активную, реактивную и полную мощности. (*Ответ: 24 А; 96 В; 32 В; 20 В; 2304 Вт; 2880 ВАр; 2880 ВА.*)
- 2.5.3. В электрическую цепь переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц включена катушка с индуктивностью 0,0127 Гн и активным сопротивлением 3 Ом. Определите: реактивное сопротивление катушки; ток в катушке; активную и реактивную мощности катушки; энергию, запасаемую в магнитном поле катушки. (*Ответ: 4 Ом; 44 А; 5808 Вт; 7744 ВАр; 24,59 Дж.*)
- 2.5.4. Мощность, потребляемая нагрузочным сопротивлением $R_n = 9,9$ Ом, измеряется с помощью вольтметра и амперметра. Вольтметр показывает 120 В, амперметр – 12 А. Считая, что показания приборов не содержат погрешностей, подсчитайте мощность, выделяющуюся при сопротивлении R_n . Найдите погрешность измерения мощности. (*Ответ: 1425,6 Вт; 1%.*)
- Уровень В**
- 2.5.5. К генератору переменного электрического тока с напряжением 240 В и частотой 50 Гц присоединен конденсатор емкостью 40 мкФ. Определите: реактивное сопротивление емкости; ток в электрической цепи; реактивную мощность цепи; максимальную энергию, запасаемую в электрическом поле конденсатора. (*Ответ: 80 Ом; 3 А; 720 ВАр; 2,3 Дж.*)
- 2.5.6. Катушка индуктивностью 0,318 Гн и активным сопротивлением 100 Ом подключена к источнику синусоидального напряжения частотой 50 Гц, действующее значение которого составляет 120 В. Определите мощность, выделяемую в цепи. (*Ответ: 72,1 Вт.*)
- 2.5.7. В сеть переменного тока включены последовательно катушка индуктивностью 3 мГн и активным сопротивлением 20 Ом, конденсатор емкостью 30 мкФ. Напряжение U_c на конденсаторе составляет 50 В. Определите: напряжение на зажимах цепи; ток в цепи; напряжение на катушке; активную и реактивную мощности. (*Ответ: 50,44 В; 0,471 А; 0,44 В; 4,44 Вт; -23,34 ВАр.*)
- Уровень С**
- 2.5.8. В цепи, как показано на схеме (рис. 2.5.2), подключены катушка, конденсатор и резисторы. Индуктивность катушки равна 15 мГн, емкость конденсатора составляет 20 мкФ, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 30$ Ом. Напряжение источника равно 100 В, частота – 100 Гц. Определите: токи в цепи, активную, реактивную и полную мощности в цепи. (*Ответ: 6,9 А; 7,27 А; 1,17 А; 570 Вт; 389 ВАр; 690 ВА.*)

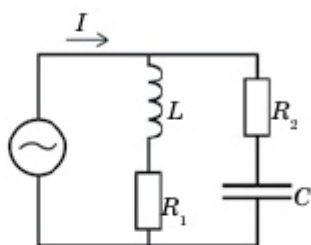


Рис. 2.5.2

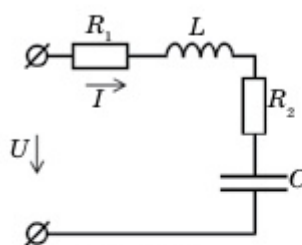


Рис. 2.5.3

- 2.5.9. В электрическую цепь переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц включена катушка индуктивностью 25,5 мГн и активным сопротивлением $R_A = 6$ Ом; $I = 22$ А; $U_A = 132$ В; $\cos \varphi = 0,6$. Определите: максимальную мощность в активном сопротивлении; активную мощность; реактивную мощность; полную мощность. (Ответ: 5808 Вт; 2904 Вт; 3872 ВАр; 4840 ВА.)
- 2.5.10. Последовательно с катушкой, активное сопротивление которой $R_1 = 10$ Ом и индуктивность $L = 0,0318$ Гн, включен приемник, обладающий активным сопротивлением $R_2 = 1$ Ом и емкостью $C = 796$ мкФ (рис. 2.5.3). К цепи приложено переменное напряжение, изменяющееся по закону $u = 169,8 \sin(314t)$. Определите: полное сопротивление цепи, коэффициент мощности цепи; ток в цепи; активную, реактивную и полную мощности. (Ответ: 12,5 Ом; 0,88; 9,6 А; 1014 Вт; 553 ВАр; 1152 ВА.)

§ 2.6

Резонанс напряжений в электрической цепи

1. Резонанс при последовательном соединении элементов электрической цепи переменного тока. Полное сопротивление последовательной электрической цепи переменному току зависит не только от параметров цепи, но и от частоты переменного тока. Если в электрическую цепь включать амперметр переменного тока и исследовать зависимость амплитуды колебаний силы тока от частоты при постоянной амплитуде колебаний напряжения, то обнаруживается зависимость, представленная на рис. 2.6.1.

Явление возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частоты $\nu_{\text{рез}}$ до максимального значения называют электрическим резонансом, а частоту, при которой амплитуда колебаний силы тока достигает максимального значения, — резонансной частотой.

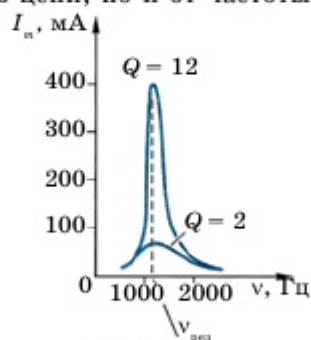


Рис. 2.6.1 Электрический резонанс тока

Такая зависимость силы электрического тока в цепи от частоты объясняется следующим образом. На низких частотах емкостное сопротивление конденсатора $\left(X_C = \frac{1}{\omega C}\right)$ переменному току очень велико. С увеличением частоты это сопротивление убывает, а сила тока в цепи возрастает. Индуктивное сопротивление катушки $(X_L = \omega L)$ на низких частотах мало, но возрастает с увеличением частоты. При резонансной частоте $\omega_{\text{рез}}$ индуктивное сопротивление катушки оказывается равным емкостному сопротивлению конденсатора:

$$X_L = X_C, \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}, \text{ следовательно } \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0, \quad (2.45)$$

поэтому амплитуда силы тока в соответствии с формулой (2.33) становится максимальной, т.е. наступит электрический резонанс тока (рис 2.6.1). При более высоких частотах индуктивное сопротивление превышает емкостное. Возрастание индуктивного сопротивления с частотой приводит к убыванию силы тока в цепи на частотах, больших резонансной.

Так как колебания напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности при их последовательном соединении происходят в противофазе, а электрический ток через все элементы цепи протекает один и тот же, то при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений напряжения на них в любой момент времени одинаковы по модулю, но имеют противоположные знаки:

$$u_L = -u_C. \quad (2.46)$$

Согласно условию (2.46) мгновенное напряжение на резисторе оказывается равным приложенному напряжению:

$$u = u_R + u_L + u_C = u_R. \quad (2.47)$$

Таким образом, условие (2.45) и вытекающие из него условия (2.46) и (2.47) также определяют *резонанс напряжений*.

Резонанс, возникающий при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений в последовательно соединенной электрической цепи переменного тока, называется также резонансом напряжений.

Из условия (2.47) можно найти мгновенное и резонансное значения силы тока в цепи:

$$i_{\text{рез}} = \frac{u}{R}, \quad (2.48)$$

$$I_{\text{рез}} = \frac{U_m}{R}. \quad (2.49)$$

Тот же результат можно получить, используя условие резонанса (2.45). Это условие позволяет определить резонансную частоту $\omega_{\text{рез}}$ по известным значениям индуктивности катушки и электроемкости конденсатора. Из равенства (2.45) следует:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0. \quad (2.50)$$

Таким образом, резонанс наступает при совпадении частоты переменного тока с частотой ω_0 свободных колебаний в контуре.

2. Индуктивное сопротивление катушки и емкостное сопротивление конденсатора при резонансе можно выразить через значения индуктивности и емкости:

$$X_L = X_C = L\omega_{\text{рез}} = \frac{L}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.51)$$

Определим амплитуду колебаний напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе при наступлении резонанса:

$$U_{Lm} = U_{Cm} = I_m X_L = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.52)$$

Выражение (2.52) показывает, что при наступлении резонанса амплитуды колебаний напряжения на катушке и конденсаторе могут значительно превышать амплитуду колебаний приложенного напряжения.

Физическую величину $\sqrt{\frac{L}{C}}$ называют **волновым сопротивлением** электрического колебательного контура и обозначают буквой ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.53)$$

Из выражений (2.52) и (2.53) следует, что отношение амплитуды колебаний напряжения на катушке (или на конденсаторе) к амплитуде колебаний приложенного напряжения при наступлении резонанса равно отношению волнового сопротивления контура к его активному сопротивлению:

$$\frac{U_{Lm}}{U_m} = \frac{U_{Cm}}{U_m} = \frac{I_m \rho}{I_m R} = \frac{\rho}{R}. \quad (2.54)$$

Это отношение называется **добротностью** электрического колебательного контура и обозначается буквой Q :

$$Q = \frac{\rho}{R}. \quad (2.55)$$

Добротность может достигать значений порядка 100 и даже выше. Зная добротность контура, можно определить амплитуду вынужденных колебаний напряжения на катушке или на конденсаторе в резонансе при включении источника переменного напряжения с известной амплитудой напряжения. Если, например, в колебательный контур с добротностью $Q = 100$ включен источник переменного напряжения амплитудой 1 В, то при наступлении резонанса амплитуда вынужденных колебаний напряжения на катушке и конденсаторе достигает 100 В.

Явление увеличения амплитуды колебаний напряжения при настройке контура в резонанс с источником колебаний широко используют в радиотехнике –

в схемах радиоприемников, усилителей, генераторов высокочастотных колебаний. С увеличением добротности контура уменьшается ширина резонансного пика. Вид резонансных кривых, полученных при различных значениях добротности контура $Q = 2$ и $Q = 12$, представлен на рис. 2.6.1.

3. Резонанс при параллельном соединении элементов электрической цепи переменного тока. При параллельном соединении резистора, конденсатора и катушки напряжение на всех элементах цепи изменяется по одинаковому закону $[u = U_m \cos \omega t]$, а полный ток в общей цепи в любой момент времени равен сумме мгновенных значений силы тока в параллельных ветвях. Амплитуда колебаний силы электрического тока в общей цепи определяется из прямоугольного треугольника векторной диаграммы токов в соответствии с теоремой Пифагора по формуле:

$$I_m = \sqrt{I_{Rm}^2 + (I_{Cm} - I_{Lm})^2} = U_m \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}. \quad (2.56)$$

Величины $\frac{1}{R}$, ωC и $\frac{1}{\omega L}$, обратно пропорциональные реактивному (R), емкостному ($1/\omega C$) и индуктивному (ωL) сопротивлениям, называются проводимостью.

При некотором значении частоты ω индуктивное сопротивление катушки равно емкостному сопротивлению конденсатора:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \text{ отсюда } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.57)$$

При такой частоте токи через катушку и конденсатор в любой момент времени равны по модулю и противоположны по направлению (или по фазе колебания). Их сумма равна нулю, а сила тока в общей цепи равна силе тока через активное сопротивление:

$$i = i_R, I_m = I_R = \frac{U_m}{R}. \quad (2.58)$$

При выполнении условия (2.57) полное сопротивление электрической цепи принимает максимальное значение $Z = R$. Максимальному значению полного сопротивления параллельной электрической цепи соответствует минимальное значение силы электрического тока. Следовательно, при выполнении условия (2.57), называемого *условием резонансов токов в колебательном контуре*, сила тока в общей цепи минимальна.

На рис. 2.6.2 представлена зависимость амплитуды колебаний силы электрического тока в общем участке цепи от частоты при постоянной амплитуде колебаний напряжения на параллельно соединенных катушке, конденсаторе и элементе с активным сопротивлением.

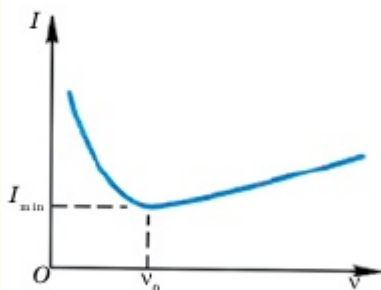


Рис. 2.6.2. График $I(v)$ при параллельном соединении

4. Резонанс напряжений и токов – интересное явление, которое наблюдается только в индуктивно-емкостных цепях. В цепях с большим активным сопротивлением он не может возникнуть. Примером полезного применения резонанса напряжений служит следующий факт: входной контур приемника настраивается конденсатором переменной емкости таким образом, что в нем возникает резонанс напряжений. Этим достигается необходимое для нормальной работы приемника большое повышение напряжения на катушке по сравнению с напряжением в цепи, созданным антенной.

Наряду с полезным использованием явления резонанса напряжений в электротехнике часто бывают случаи, когда резонанс напряжений вреден. Большое повышение напряжения на отдельных участках цепи (на катушке или на конденсаторе) по сравнению с напряжением генератора может привести к порче отдельных деталей, а также измерительных приборов.



Вопросы

1. Каковы условия возникновения электрического резонанса в последовательно соединенной цепи переменного тока? Как выражается графически электрический резонанс тока?
2. По какой аналитической формуле определяются напряжение и сила тока при электрическом резонансе?
3. Какая частота называется резонансной частотой? Как она аналитически определяется?
4. Какие величины называются волновым сопротивлением и добротностью электрического колебательного контура?
5. Совпадают ли резонансные частоты при последовательно и параллельно соединенных цепях переменного тока? Какова их принципиальная разница? Какие величины называются проводимостью?
6. Каковы полезные и отрицательные следствия электрического резонанса?



Задание (экспериментальное исследование)

Даны источники постоянного и переменного напряжения одинаковой величины; лампочка, рассчитанная на это напряжение; три одинаковых закрытых ящика с реостатом, конденсатором и катушкой индуктивности. На ящиках имеются наружные зажимы, к которым подключены реостат, конденсатор и катушка. Как, не открывая ящики, узнать, что находится в каждом из них?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. В сеть переменного тока с действующим напряжением $U = 110$ В и частотой $\nu = 100$ Гц последовательно включены конденсатор емкостью $C = 50$ мкФ, катушка индуктивностью $L = 0,2$ Гн и резистор сопротивлением $R = 4$ Ом. Определите: действующее значение силы тока в цепи; резонансную частоту; силу тока в цепи при резонансе; напряжение на зажимах катушки при резонансе; напряжение на пластинах конденсатора при резонансе.

<p>Д а н о: $U = 110 \text{ В}$ $\nu = 100 \text{ Гц}$ $C = 50 \text{ мкФ}$ $L = 0,2 \text{ Гн}$ $R = 4 \text{ Ом}$</p>	<p>СИ</p> <p>$5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$</p>	<p>Р е ш е н и е: Действующее значение силы тока в цепи определяется по закону Ома:</p> $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (1)$ <p>где $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота. Максимальной силе тока при резонансе $I_{\text{рез}}$ соответствует такое значение ω, при котором выражение в скобках под квадратным корнем в формуле (1) обратится в ноль. Тогда резонансная циклическая частота $\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.</p>
<p>$I - ?$ $\nu_{\text{рез}} - ?$ $I_{\text{рез}} - ?$ $(U_L)_{\text{рез}} - ?$ $(U_C)_{\text{рез}} - ?$</p>		

Так как $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$, то искомая резонансная частота $\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Сила тока в цепи при резонансе (исходя из уравнения (1) при условии равенства реактивного, емкостного и индукционного сопротивлений):

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

Напряжение на зажимах катушки при резонансе:

$$U_{L_{\text{рез}}} = I_{\text{рез}} R_L = I_{\text{рез}} \omega L = 2\pi\nu_{\text{рез}} I_{\text{рез}} L = 2\pi\nu_{\text{рез}} \frac{U}{R} L.$$

Напряжение на зажимах конденсатора при резонансе:

$$U_{C_{\text{рез}}} = U_{L_{\text{рез}}},$$

так как при резонансе емкостное и индуктивное сопротивления равны.

Произведем вычисления:

$$\omega = 2\pi\nu = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 = 628 \text{ (рад/с);}$$

$$I = \frac{110}{\sqrt{4^2 + \left(628 \cdot 0,2 - \frac{1}{628 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}\right)^2}} = 1,17 \text{ (А);}$$

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{0,2 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} = 50,4 \text{ (Гц); } I_{\text{рез}} = \frac{110}{4} = 27,5 \text{ (А);}$$

$$U_{L_{\text{рез}}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50,4 \cdot \frac{110}{4} \cdot 0,2 = 1,74 \cdot 10^3 \text{ (В);}$$

$$U_{C_{\text{рез}}} = U_{L_{\text{рез}}} = 1,74 \cdot 10^3 \text{ (В).}$$

О т в е т: $I = 1,17 \text{ (А); } \nu_{\text{рез}} = 50,4 \text{ (Гц); } I_{\text{рез}} = 27,5 \text{ (А);}$

$U_{L_{\text{рез}}} = 1,74 \text{ (кВ); } U_{C_{\text{рез}}} = 1,74 \text{ (кВ).}$

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 2.6.1. В цепь переменного тока частотой 400 Гц включена катушка индуктивностью 0,1 Гн. Конденсатор какой емкости надо включить в эту цепь, чтобы осуществился резонанс? (*Ответ: 1,6 мкФ.*)
- 2.6.2. В цепь включены конденсатор емкостью 2 мкФ и катушка индуктивностью 0,005 Гн. При какой частоте тока в этой цепи будет резонанс? (*Ответ: 1,6 кГц.*)
- 2.6.3. Конденсатор емкостью 2,4 нФ соединен с катушкой индуктивности 32 мкГн и сопротивлением 2 Ом. Определите резонансную частоту контура. (*Ответ: 0,57 МГц.*)
- 2.6.4. Конденсатор и катушка соединены последовательно. Емкостное сопротивление составляет 5000 Ом. Какой должна быть индуктивность катушки, чтобы резонанс напряжений наступил при частоте тока 20 кГц? (*Ответ: 0,04 Гн.*)
- 2.6.5. Конденсатор и катушка соединены последовательно. Индуктивность катушки равна 0,01 Гн. При какой емкости конденсатора ток частотой 1 кГц будет максимальным? (*Ответ: 2,5 мкФ.*)

Уровень В

- 2.6.6. Резонансная частота колебательного контура, состоящего из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, равна 4 кГц. Определите индуктивность катушки, если полное сопротивление, оказываемое этим контуром переменному току частотой 1 кГц, равно 1 кОм, а активное сопротивление катушки – 10 Ом. (*Ответ: 10 Гн.*)

Уровень С

- 2.6.7. В цепь переменного тока с напряжением 220 В стандартной частоты включены последовательно конденсатор, резистор сопротивлением 100 Ом и катушка индуктивностью 1 Гн. При какой емкости конденсатора C в этой цепи наступит резонанс напряжений? Какова максимальная сила тока I_m при резонансе? Чему равны добротность цепи Q и ее волновое сопротивление ρ ? (*Ответ: 10^{-5} Ф; 3,1 А; 3,2; 316 Ом.*)
- 2.6.8. В колебательный контур, содержащий последовательно соединенные конденсатор и катушку с активным сопротивлением, подключено внешнее переменное напряжение, частоту которого можно менять, не меняя его амплитуды. При частотах внешнего напряжения 400 рад/с и 600 рад/с амплитуды силы тока в цепи оказались одинаковыми. Определите резонансную частоту тока. (*Ответ: ≈ 490 рад/с.*)
- 2.6.9. В сеть с напряжением 220 В включены последовательно катушка индуктивностью 0,16 Гн и проводник сопротивлением 2 Ом, а также конденсатор емкостью 64 мкФ. Определите силу тока в цепи, если частота его равна 200 Гц. При какой частоте наступит резонанс напряжений? Каковы будут при этом сила тока и напряжение на зажимах катушки и конденсатора? (*Ответ: 1,2 А; 50 Гц; 5,5 кВ.*)

2.6.10. Катушка с активным сопротивлением 20 Ом и индуктивностью 0,0637 Гн соединена параллельно с конденсатором емкостью 65 мкФ (рис. 2.6.3). Определите: токи в ветвях и в неразветвленной части цепи; активные мощности ветвей; углы сдвига фаз между током и напряжением первой и второй ветвей и всей цепи, если к цепи приложено напряжение 100 В, частота тока равна 50 Гц. Как нужно изменить емкость во второй ветви, чтобы в цепи наступил резонанс токов? (Ответ: $I_1 = 3,5$ А; $I_2 = 2,04$ А; $I = 2,54$ А; $P_1 = 250$ Вт; $P_2 = 0$; $\varphi_1 = 45^\circ$; $\varphi_2 = 90^\circ$; $\varphi = 10^\circ$; $C = 79,6$ мкФ.)

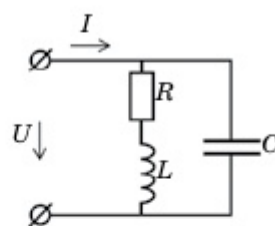


Рис. 2.6.3

§ 2.7

Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор

1. Электрическую энергию производят на *электростанциях*. Так, например, на тепловых электростанциях энергию вырабатывает генератор, ротор которого вращается с помощью паровой турбины. Однако электроэнергию необходимо еще доставить до потребителя. В связи с этим от станции до потребителя строят линии электропередачи. При передаче электроэнергии неизбежны потери, связанные с нагреванием проводов. *Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя.*

Из закона Джоуля – Ленца $Q = I^2 R \Delta t$ следует, что уменьшить потери можно либо за счет уменьшения сопротивления проводов $R = \frac{\rho l}{S}$, либо за счет уменьшения силы тока I в них. *Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь S их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление ρ металла, из которого они изготовлены.* Провода делают из меди или алюминия, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением. *Однако же увеличивать толщину проводов экономически невыгодно*, т.к. это ведет к перерасходу дорогостоящего цветного металла, а также к возникновению трудностей при закреплении проводов на столбах. Поэтому такой способ снижения потерь практически невозможен.

2. С экономической точки зрения существенного снижения потерь можно добиться только за счет уменьшения силы тока I . Но при данной мощности ($P = IU$) уменьшение силы тока возможно лишь при увеличении напряжения. Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения *трансформатора*.

Трансформатором называют устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте и мощности переменного тока.

В основе работы трансформатора лежит явление **электромагнитной индукции**. Простейший трансформатор представляет собой две изолированные друг от друга катушки (их еще называют обмотками), намотанные на общий замкнутый сердечник. По одной из обмоток (первичной) пропускается преобразуемый переменный ток, а вторичная обмотка соединяется с потребителем (рис. 2.7.1).

Переменный ток в первичной обмотке создает в сердечнике переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в витках каждой обмотки. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле так, что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

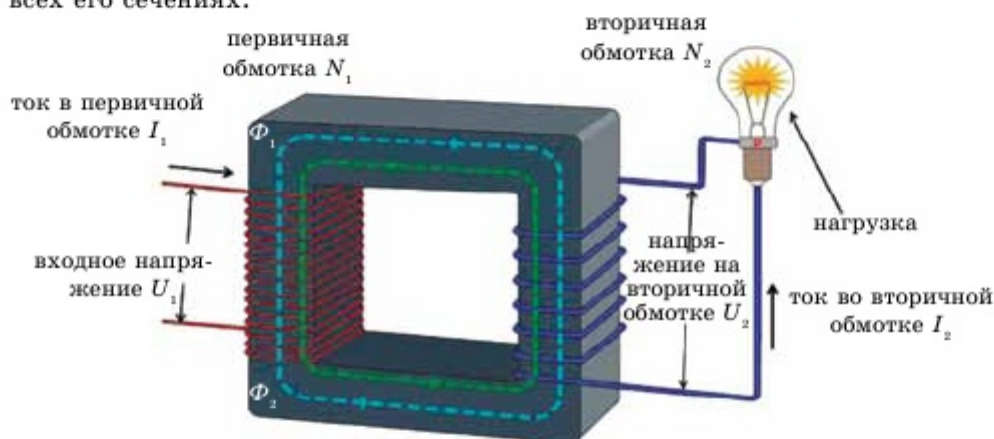


Рис. 2.7.1. Принцип работы трансформатора

Мгновенное значение ЭДС индукции во всех витках первичной или вторичной обмоток одинаково. Согласно закону Фарадея, оно будет определяться формулой:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.59)$$

где Φ – поток магнитной индукции.

3. Если первичная обмотка имеет N_1 витков, а вторичная – N_2 витков, то в обмотках индуцируются (без учета потерь на рассеивание магнитного потока), соответственно, ε_1 и ε_2 , а их отношение будет равно

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.60)$$

т.е. **возникающие в катушках ЭДС индукции (или самоиндукции) пропорциональны числу витков в них.**

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало и им можно

пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах первичной обмотки примерно равен модулю суммарной ЭДС индукции

$$R \approx 0 \Rightarrow |u_1| \approx |\varepsilon_1|. \quad (2.61)$$

При разомкнутой цепи вторичной обмотки трансформатора ток в ней не идет, поэтому суммарная ЭДС индукции равна напряжению на зажимах вторичной обмотки:

$$|u_2| \approx |\varepsilon_2|. \quad (2.62)$$

Изменение мгновенных значений ЭДС происходит так, что они одновременно достигают максимума и одновременно проходят через ноль, т.е. изменяются синфазно. Поэтому их отношения можно заменить отношением действующих значений этих ЭДС или отношением действующих значений напряжений

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (2.63)$$

Отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной называют коэффициентом трансформации k . В зависимости от того, какое значение принимает коэффициент трансформации, различают *повышающий* ($k < 1$) и *понижающий* ($k > 1$) трансформаторы.

4. При включении во вторичную цепь какой-либо нагрузки (это рабочий ход трансформатора) в ней начинает проходить ток нагрузки (он переменный и такой же частоты). Этот ток создает в сердечнике магнитный поток, направленный по правилу Ленца навстречу потоку первичной обмотки. В результате суммарный поток магнитной индукции в первичной катушке уменьшается, уменьшается и ЭДС, а, следовательно, сила тока будет увеличиваться. Это увеличение силы тока в первичной цепи приводит к увеличению магнитного потока, ЭДС индукции и силы тока во вторичной цепи. Но, как мы знаем, увеличение тока во вторичной цепи сопровождается увеличением тока самоиндукции и, следовательно, уменьшением магнитного потока, который только что возрастал. В конце концов при постоянной нагрузке устанавливаются определенные магнитный поток, ЭДС индукции во вторичной цепи и ток в первичной цепи.

Получается, что трансформатор сам автоматически регулирует потребление энергии в зависимости от нагрузки во вторичной цепи.

При рабочем ходе трансформатора происходит непрерывная передача энергии из первичной цепи во вторичную.

Мощность, потребляемая в первичной цепи, будет определяться формулой

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1, \quad (2.64)$$

а выделяемая на нагрузке

$$P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2. \quad (2.65)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора будет определяться отношением выделяемой мощности на нагрузке к потребляемой мощности в первичной цепи:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}. \quad (2.66)$$

5. Однако не вся энергия, вырабатываемая генератором, передается потребителю. При работе трансформатора имеются потери на нагревание обмоток трансформатора, на рассеивание магнитного потока в пространство, на вихревые токи Фуко в сердечнике и его перемагничивание.

Для уменьшения этих потерь принимаются следующие меры:

- 1) обмотка катушки низкого напряжения делается большего сечения, так как по ней проходит ток большей силы;
- 2) сердечник делают замкнутым, что уменьшает рассеивание магнитного потока в пространстве;
- 3) стальной сердечник делают из изолированных пластин для уменьшения токов Фуко.

Благодаря этим мерам коэффициент полезного действия современных трансформаторов достигает 95–99%, а сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения близок к нулю.

Если можно пренебречь 1–5% потерь в трансформаторе, т.е. считать его коэффициент полезного действия равным 100%, то мощность, потребляемая в первичной цепи, будет равна мощности, выделяемой на нагрузке ($P_1 = P_2$). Тогда отношение силы тока в первичной обмотке к силе тока во вторичной обмотке будет обратно пропорционально соответствующим напряжениям. А это значит, что, увеличивая с помощью трансформатора напряжение, во столько же раз будем уменьшать силу тока, и наоборот:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (2.67)$$

В настоящее время трансформаторы нашли широкое применение как в технике, так и в быту.



Дополнительный материал

В записях Майкла Фарадея от 29 августа 1831 года упоминается о том, что на железное кольцо диаметром 15 см и толщиной 2 см было намотано отдельно два провода длиной 15 м и 18 м. При прохождении тока по одной из обмоток стрелки гальванометра на зажимах другой отклонялись! Так появился первый прототип трансформатора.



Вопросы

1. В чем заключается роль трансформатора при передаче электрической энергии?
2. На основе какого явления и как можно объяснить принцип работы трансформатора?
3. Как определяется коэффициент трансформации?
4. Как вычисляется коэффициент полезного действия трансформатора?
5. Почему использование переменного тока высокого напряжения при передаче электрической энергии экономически выгоднее? Какие меры принимаются для минимизации потери электрической энергии при передаче на дальние расстояния?

**Задание (теоретическое исследование)**

Подготовьте доклад в виде реферата или презентации на одну из данных тем:

- «Виды трансформаторов»;
- «Самый мощный в мире силовой трансформатор в настоящее время»;
- «Применение трансформаторов».

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 10$ включена в сеть переменного тока с напряжением $U_1 = 120$ В. Сопротивление вторичной обмотки $R_2 = 1,2$ Ом, ток в ней $I_2 = 5$ А. Найдите напряжение на нагрузке трансформатора U_n и сопротивление нагрузки R_n . Найдите число витков во вторичной обмотке N_2 , если первичная обмотка содержит $N_1 = 10\ 000$ витков. Чему равен КПД этого трансформатора?

Д а н о:
 $k = 10$
 $U_1 = 120$ В
 $R_2 = 1,2$ Ом
 $I_2 = 5$ А
 $N_1 = 10\ 000$

$U_n = ?$
 $N_2 = ?$
 $R_n = ?$
 $\eta = ?$

Р е ш е н и е:

Зная коэффициент трансформации трансформатора k , мы легко найдем число витков во вторичной обмотке N_2 :

$$k = \frac{N_1}{N_2}, \text{ откуда } N_2 = \frac{N_1}{k}.$$

Найдем напряжение на нагрузке R_n (нагрузкой может служить какая-нибудь лампа радиоприемника или другое устройство, требующее пониженного напряжения). Для этого учтем следующее важное обстоятельство: такое напряжение

$U_2 = \frac{U_1}{k}$ было бы на выходе трансформатора (т.е. на нагрузке R_n),

если бы вторичная обмотка трансформатора не имела сопротивления R_2 (т.е. если бы оно было столь малым, что им можно было бы пренебречь). Но из-за наличия у вторичной обмотки сопротивления R_2 на нагрузку «пойдет» меньшее напряжение U_n , поскольку на сопротивлении R_2 будут иметь место потери напряжения ΔU из-за потерь энергии на джоулево тепло. Поэтому на нагрузке R_n напряжение U_n будет меньше напряжения U_2 на величину этих потерь ΔU :

$$U_n = U_2 - \Delta U. \quad (1)$$

Потерю напряжения ΔU на сопротивлении R_2 найдем, воспользовавшись законом Ома для участка цепи с сопротивлением R_2 , по которому течет ток I_2 (заметим, что такой же ток течет и в нагрузке R_n):

$$I_2 = \frac{\Delta U}{R_2}, \text{ откуда } \Delta U = I_2 R_2. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получаем $U_n = U_2 - I_2 R_2$, где $U_2 = \frac{U_1}{k}$, поэтому

$$U_n = \frac{U_1}{k} - I_2 R_2.$$

Сопротивление нагрузки R_n определим так же, воспользовавшись законом

Ома, но уже применительно к нагрузке $I_2 = \frac{U_n}{R_n}$, откуда $R_n = \frac{U_n}{I_2}$.

КПД η – это отношение полезной работы A_n ко всей затраченной A_1 . В нашем случае полезной работой будет работа тока в нагрузке, а затраченной – работа тока в первичной обмотке:

$$\eta = \frac{A_n}{A_1} 100\%. \quad (3)$$

Работу тока A_n на зажимах вторичной обмотки определим по известной формуле работы тока:

$$A_n = U_n I_2 t. \quad (4)$$

Работа тока в первичной обмотке: $A_1 = U_1 I_1 t$. Так как $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$, где $\frac{U_1}{U_2} = k$, поэтому $k = \frac{I_2}{I_1}$. Отсюда $I_1 = \frac{I_2}{k}$. Тогда

$$A_1 = U_1 \frac{I_2}{k} t. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (3), мы найдем КПД:

$$\eta = \frac{U_n I_2 t}{U_1 \frac{I_2}{k} t} 100\% = \frac{U_n k}{U_1} 100\%.$$

Произведем вычисления:

$$N_2 = \frac{10000}{10} = 1000;$$

$$U_n = \frac{120}{10} = 5 \cdot 1,2 = 6 \text{ (В)};$$

$$R_n = \frac{6}{5} = 1,2 \text{ (Ом)};$$

$$\eta = \frac{6 \cdot 10}{120} 100\% = 50\%.$$

О т в е т: $N_2 = 1000$; $U_n = 6 \text{ (В)}$;

$R_n = 1,2 \text{ (Ом)}$; $\eta = 50\%$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

2.7.1. Коэффициент трансформации повышающего трансформатора $k = 0,1$, активное сопротивление его первичной обмотки $R_1 = 10 \text{ Ом}$, а ее индуктивное сопротивление $X_{L1} = 20 \text{ Ом}$. От источника тока на первичную обмотку

подано напряжение $U_1 = 20$ В. Найдите напряжение на вторичной обмотке U_2 в режиме холостого хода. (Ответ: 178,9 В.)

- 2.7.2. Найдите диаметр медного провода для линии электропередачи длиной 10 км при напряжении 220 В, если потребителю нужно передать мощность 0,1 кВт. Потери мощности на нагревание проводов составляют 5% от передаваемой мощности. Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$. Удельное сопротивление меди составляет $1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. (Ответ: 5,3 мм.)
- 2.7.3. Первичная обмотка трансформатора для питания радиоприемника имеет 12 000 витков и включена в сеть переменного тока с напряжением 120 В. Какое число витков должна иметь вторичная обмотка, если ее сопротивление составляет 0,5 Ом? Напряжение на нагрузке – 3,5 В, сила тока во вторичной обмотке – 1 А. (Ответ: 400 витков.)
- 2.7.4. Первичная обмотка трансформатора имеет $2,4 \cdot 10^8$ витков. Сколько витков должна иметь вторичная обмотка, чтобы при напряжении на нагрузке 11 В передавать во внешнюю цепь мощность 22 Вт? Сопротивление вторичной обмотки – 0,2 Ом. Напряжение в сети составляет 380 В. (Ответ: 72 витка.)
- 2.7.5. На какую силу тока должен быть рассчитан провод первичной обмотки трансформатора, если при напряжении в первичной обмотке 220 В сила тока во вторичной обмотке – 2 А, сопротивление вторичной обмотки – 10 Ом, напряжение на нагрузке – 40 В? (Ответ: 0,54 А.)

Уровень В

- 2.7.6. Трансформатор повышает напряжение с 100 В до 5,6 кВ. На одну из обмоток надели виток провода, концы которого подсоединили к вольтметру. При этом вольтметр показал напряжение 0,4 В. Сколько витков имеют первичная и вторичная обмотки трансформатора? (Ответ: 250 витков; 14 000 витков.)
- 2.7.7. Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 5 включен в сеть с напряжением 220 В. Определите КПД трансформатора, если потеря энергии в первичной обмотке не происходит, а напряжение на выходе вторичной обмотки – 42 В. (Ответ: 95%.)
- 2.7.8. Через замкнутый кольцевой сердечник трансформатора, понижающего напряжение с 220 до 42 В, пропущен провод, концы которого присоединены к вольтметру. Вольтметр показывает напряжение 0,5 В. Сколько витков имеют первичная и вторичная обмотки трансформатора? (Ответ: 440 витков; 84 витка.)

Уровень С

- 2.7.9. На первичную обмотку трансформатора подается напряжение 220 В. На вторичной обмотке при холостом ходе получается 130 В. Число витков в первичной обмотке равно 400. Определите число витков во вторичной обмотке, если потери составляют 3,8%. (Ответ: 245 витков.)
- 2.7.10. При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока во вторичной обмотке возникает напряжение 12 В. При включении вторичной обмотки в сеть на первичной обмотке возникает напряжение 120 В. Найдите отношение числа витков в первичной обмотке трансформатора к числу витков во вторичной. (Ответ: 3,16.)

Лабораторная работа № 1.**Определение числа витков в обмотках трансформатора**

Цель работы: определить число витков в обмотках трансформатора.

Необходимое оборудование: трансформатор лабораторный разборный; источник переменного напряжения 12 В; авометр АВО-63; провод изолированный.

Краткая теория. Для определения числа витков в обмотке трансформатора с неизвестными параметрами можно воспользоваться тем свойством трансформатора, что в режиме холостого хода отношение напряжений на первичной U_1 и вторичной U_2 его обмотках равно отношению числа витков N_1 в первичной обмотке к числу витков N_2 во вторичной обмотке:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Намотав на сердечник трансформатора вторичную обмотку с известным числом витков N_2 и измерив напряжение U_2 на первичной обмотке, можно определить число витков N_1 в первичной обмотке:

$$N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2}.$$

Порядок работы:

1. Снимите одну из катушек трансформатора. Намотайте вторичную обмотку из 20–40 витков на сердечник исследуемого трансформатора.
2. Подключите выводы первичной обмотки трансформатора к источнику переменного напряжения $U_1 = 12$ В, измерьте напряжение на вторичной обмотке.
3. По измеренным значениям напряжения и известному числу витков во вторичной обмотке по формуле определите число витков в первичной обмотке.
4. Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу.

№ опыта	U_1	U_2	N_1	N_2
1				
2				
3				

5. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения. Абсолютная погрешность $\Delta x_n = x_{cp} - x_n$, где x_{cp} – средняя величина, равная среднему арифметическому значению всех полученных значений $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$. Относительная погрешность $\varepsilon = \frac{\Delta x_n}{x_{cp}} \cdot 100\%$. Среднее значение абсолютной и относительной погрешностей определяют как среднее арифметическое всех величин.
6. Запишите вывод: что вы измеряли и какой получен результат.
7. Для осмысления полученного результата работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 1

1. Что называют трансформатором?
2. На каком явлении основан принцип действия трансформатора?
3. Что называют коэффициентом трансформации?
4. Что называется КПД трансформатора?
5. Что будет с трансформатором, если его включить в цепь постоянного тока?
6. Почему при разомкнутой вторичной цепи (холостой ход) трансформатор почти не потребляет энергии?
7. Для чего около электростанций устанавливают повышающий трансформатор?
8. Какой трансформатор устанавливают около потребителей электрической энергии?

§ 2.8**Производство и использование электрической энергии в Казахстане и мире**

1. Электроэнергетика – базовая инфраструктурная отрасль, снабжающая электричеством и теплом все остальные секторы социально-экономической жизни страны.

С энергопотреблением прямо связаны и уровень социально-экономического развития, и жизнь каждого человека.

Электроэнергетика связана со всеми секторами экономики: снабжает их произведенным электричеством и теплом, получает от некоторых из них ресурсы для своего функционирования.

Особенностями развития энергетики на современном уровне являются резкое ужесточение экологических требований (в частности, Киотский протокол по выбросам парниковых газов), переход на высокоэффективные и ресурсосберегающие энергетические технологии и попытки поиска альтернативных (без использования традиционного органического топлива) источников энергии. Тем не менее сегодня главный вклад в мировое производство электроэнергии дает **уголь (40%)**, заметно меньше – **газ (19%)** и далее по **16%** – **атомная и гидроэнергетика**.

Казахстан обладает крупными запасами энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, уран) и является энергетической державой. По итогам 2019 года объем производства электроэнергии в Казахстане составил 106 млрд кВт · ч. Казахстан является экспортером электроэнергии. Около 70% электроэнергии в Казахстане вырабатывается из угля, 14,6% – из гидроресурсов, 10,6% – из газа и 4,9% – из нефти.

2. Производится электроэнергия на больших и малых электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов.

Основными производителями электроэнергии являются:

- **тепловые электростанции (ТЭС)**, где тепловая энергия, образующаяся при сжигании органического топлива (уголь, газ и т.д.), используется для вращения паровых турбин генераторов, производящих электрическую энергию; таким образом тепловая энергия органического топлива превращается в электрическую энергию;
- **гидроэлектростанции (ГЭС)**, где механическая энергия потока воды с помощью гидравлических турбин, вращающих электрогенераторы, превращается в электроэнергию;
- **атомные электростанции (АЭС)**, где в результате цепной ядерной реакции деления ядер тяжелых элементов в реакторе внутриатомная энергия превращается в электрическую энергию.

Три основных типа электростанций определяют виды используемых энерго-ресурсов. Их принято подразделять на **первичные** и **вторичные, возобновляемые** и **невозобновляемые**.

Первичные энергоносители – это *сырьевые материалы в их естественной форме до проведения какой-либо технологической обработки, например: каменный уголь, нефть, природный газ и урановая руда*. К таковым относятся также солнечное излучение, ветер, водные ресурсы. **Вторичная энергия** – это *продукт первичной переработки, например: бензин, мазут, ядерное топливо*.

Некоторые виды ресурсов могут относительно быстро восстанавливаться в природе, они называются **возобновляемыми**: дрова, камыш, торф и прочие виды биотоплива, гидропотенциал рек. Ресурсы, не обладающие таким качеством, называются **невозобновляемыми**: уголь, сырая нефть, природный газ, нефтеносный сланец, урановая руда. По большей части они являются полезными ископаемыми. **Энергия солнца, ветра, морских приливов относится к неисчерпаемым возобновляемым энергетическим ресурсам.**

3. Рассмотрим процесс производства электроэнергии на примере ТЭС.

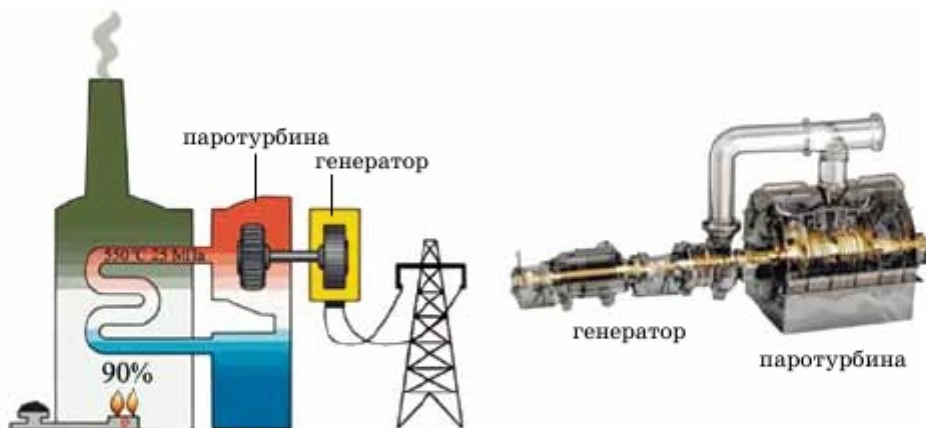


Рис. 2.8.1. Схема тепловой электрической станции

Роторы электрических генераторов на тепловых электростанциях приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Конечно, наиболее экономичными являются крупные тепловые паротурбинные электростанции (рис. 2.8.1). В паровом котле *свыше 90% выделяемой топливом энергии передается пару*. В турбине кинетическая энергия струи пара передается ротору, число оборотов которого достигает нескольких тысяч в минуту. Однако *коэффициент полезного действия ТЭС* остается невысоким – порядка **40%**. Большая часть энергии теряется во внешней среде вместе с горячим отработанным паром.

Производство электрической энергии в Казахстане осуществляют 138 электрических станций. Общая установленная мощность электростанций Казахстана составляет 21 673 МВт. 25 декабря 2018 года был зафиксирован годовой максимум нагрузки по республике, который составил 14 823 МВт, при располагаемой мощности 18 895 МВт.

Электрические станции в нашей стране разделяются на электростанции национального, промышленного и регионального значений.

К электрическим станциям национального значения относятся крупные тепловые и гидравлические электрические станции.

К электростанциям промышленного значения относятся тепловые электрические станции с комбинированным производством электрической и тепловой энергии, служащие для электро- и теплоснабжения крупных промышленных предприятий и близлежащих населенных пунктов.

Электростанции регионального значения – электростанции, интегрированные с территориями, которые осуществляют реализацию электрической энергии через сети региональных электросетевых компаний и энергопередающих организаций, а также теплоснабжение близлежащих городов.

К концу 2018 года располагаемая мощность электростанций увеличилась на 2470 МВт, или на 15% от уровня 2013 года, в основном за счет увеличения мощности тепловых станций и возобновляемых источников энергии.

Большую экономичность и практическое значение имеют тепловые электростанции – так называемые **теплоэлектроцентрали** (сокращенно ТЭЦ), которые позволяют значительную часть энергии отработанного пара использовать на промышленных предприятиях и для бытовых нужд (например, для отопления и горячего водоснабжения). В результате этого КПД ТЭЦ достигает **60–70%**. В настоящее время ТЭЦ дают около 40% всей электроэнергии и снабжают теплом и электроэнергией города.

4. Большое значение в структуре источников электроэнергии сохраняют **гидроресурсы**, хотя их доля за последние десятилетия несколько сократилась. *Преимущества этого источника в его возобновляемости и относительной дешевизне.*

Но возведение *гидростанций оказывает необратимое воздействие на окружающую среду*, так как обычно требует затопления значительных территорий при создании водохранилищ. Неравномерность распределения водных ресурсов на территории Республики Казахстан и зависимость от климатических условий ограничивают их гидроэнергетический потенциал.

На гидроэлектростанциях для вращения роторов генераторов *используется потенциальная энергия воды*. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Мощность такой станции зависит от создаваемой плотиной разности уровней воды и от массы воды, проходящей через турбину каждую секунду.

Для выработки энергии все *большее распространение получает использование урана*. Это топливо обладает колоссальной эффективностью по сравнению с прочими сырьевыми источниками энергии. *Однако применение радиоактивных веществ сопряжено с риском масштабного загрязнения окружающей среды в случае аварии. Кроме того, возведение АЭС и утилизация отработанного топлива чрезвычайно капиталоемки*. Развитие этого вида энергетики осложняется и тем, что пока немногие страны могут обеспечить подготовку научных и технических специалистов, способных разработать технологии и обеспечить квалифицированную эксплуатацию АЭС.

В последние годы *растет интерес к возобновляемым источникам энергии*. В частности, активно разрабатываются технологии использования энергии солнца и ветра, потенциал которых огромен (рис. 2.8.2). В 2018 году запущена в эксплуатацию солнечная электростанция «Бурное» мощностью 100 МВт в Жамбылской области. Это крупнейшая солнечная электростанция в СНГ, построенная на основе совместного казахстанско-британского проекта.

В среднем по республике в зависимости от ветрового климата *ветровые электростанции* (ВЭС) целесообразно устанавливать в местах, где скорость ветра превышает 5 м/с. Между тем на 80–90% территории страны скорость ветра превышает 6 м/с. Имеются регионы, где ветры дуют круглогодично и круглосуточно: в южной зоне – **Алматинская, Жамбылская, Южно-Казахстанская области**; в западной – богаты ветрами Атырауская и Мангыстауская области; в северной – Акмолинская; в центральной – Карагандинская область. По оценкам экспертов, ветроэнергетический потенциал страны оценивается в 1820 млрд кВт · ч электроэнергии в год.



Рис. 2.8.2. Солнечные батареи (Алматинская область, г. Капшагай)

Что касается энергии ветра, то ее применение в электроэнергетике Казахстана значительно увеличилось. Например, в декабре 2011 года в Жамбылской области была введена в эксплуатацию первая в Казахстане ветроэлектростанция – Кордайская ВЭС (первая очередь) мощностью 1500 кВт. В декабре 2014 года был завершен первый этап сооружений из 9 ветрогенераторов, который увеличил мощность до 9 МВт.

5. *Главным потребителем электроэнергии является промышленность*, на долю которой приходится около 70% производимой электроэнергии. Также крупным потребителем электроэнергии является *транспорт*. В настоящее время все большее количество *железнодорожных линий* переводится на электрическую тягу. Почти все деревни и села получают электроэнергию для производственных и бытовых нужд от электростанций. Электроэнергия применяется для освещения жилищ и в бытовых электроприборах.

Большая часть используемой электроэнергии в современном мире превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электрическими двигателями, т.к. они удобны, компактны и допускают возможность автоматизации процесса.

Кроме этого, около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для технологических целей, таких как электросварка, электрический нагрев и плавление металлов, электролиз и т.п.



Вопросы

1. Какова роль электроэнергетики в социально-экономической жизни страны? Какие требования накладываются на производство современной электрической энергии?
2. Каковы основные источники производимой электроэнергии? Чем они отличаются друг от друга?
3. Как осуществляется процесс производства электроэнергии на ТЭС? Какие меры принимаются для повышения КПД ТЭС?
4. Какая работа проводится в Казахстане для производства экологически чистой энергии?



Задание (практическое исследование)

1. Выполните расчет затрат энергии для типовой квартиры при переходе от ламп накаливания к энергосберегающим лампам.
2. С использованием презентаций, диаграмм, таблиц, видеороликов подготовьте исследование о состоянии и перспективах развития электроэнергетики в Казахстане.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 2

- **Генераторами переменного тока** называют устройства, преобразующие энергию того или иного вида в электрическую энергию.
- **Переменным электрическим током** называется ток, периодически изменяющийся со временем по величине и направлению.
- **Действующее значение силы переменного тока:** $I = I_m / \sqrt{2}$.
- **Действующее значение переменного напряжения:** $U = U_m / \sqrt{2}$.
- **Активное сопротивление** в цепи переменного тока: $R = P / I^2$.
- **Емкостное сопротивление конденсатора:** $X_C = 1 / C\omega$.
- **Индуктивное сопротивление катушки:** $X_L = \omega L$.
- **Закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока:** $I_m = U_m / \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.
- **Полное сопротивление последовательной электрической цепи переменного тока:** $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$.
- **Активная мощность:** $P = UI \cos \varphi$.
- **Реактивная мощность:** $Q = UI \sin \varphi$.
- **Полная мощность:** $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$.
- **Коэффициент мощности:** $\cos \varphi = P / S$.
- Явление возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частоты $\nu_{\text{рез}}$ до максимального значения называют **электрическим резонансом**.
- **Условие электрического резонанса:** $\omega L = 1 / \omega C$, отсюда **резонансная частота** $\omega_{\text{рез}} = 1 / \sqrt{LC}$.
- **Трансформатор** – устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.
- **Коэффициент полезного действия трансформатора:** $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}$.





Глава 3



ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

ГЛАВА 3. ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  исследовать образование стоячих звуковых волн в воздухе;
-  объяснять механизм образования стоячих волн, определять узлы и пучности, используя графический метод;
-  исследовать интерференцию от двух источников на поверхности воды;
-  объяснять принцип Гюйгенса и условия наблюдения дифракционной картины механических волн.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
толқын	волна	wave
орта	среда	medium
серпімді толқындар	упругие волны	elastic waves
механикалық толқындар	механические волны	mechanical waves
бойлық толқындар	продольные волны	longitudinal waves
көлденең толқындар	поперечные волны	transverse waves
толқын ұзындығы	длина волны	wavelength
толқын жылдамдығы	скорость волны	wave velocity
толқындық шеп	волновой фронт	wave front
толқындық бет	волновая поверхность	wave surface
қума толқын	бегущая волна	running wave
тұрғын толқын	стоячая волна	standing wave
шоқтық	пучность	antinode
түйін	узел	node
дифракция	дифракция	diffraction

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «волна», «среда», «упругие волны», «механические волны», «продольные волны», «поперечные волны», «длина волны», «скорость волны», «волновой фронт», «волновая поверхность», «бегущая волна», «стоячая волна», «пучность», «узел», «дифракция».

§ 3.1

Распространение механических волн. Длина волны. Скорость распространения волны

1. Отдельные частицы любого тела – твердого, жидкого или газообразного – взаимодействуют друг с другом. Если на каком-либо участке упругой среды возникнет деформация, то по прекращении внешних воздействий она не останется на месте, а начнет распространяться в среде во всех направлениях.

При изучении распространения колебаний не учитывается дискретное (молекулярное) строение *среды*, а рассматривается сплошная среда, обладающая упругими свойствами.

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется волновым процессом (или волной).

Основным свойством всех волн, независимо от их природы, является перенос энергии без переноса вещества.

Механическими волнами называются упругие возмущения, распространяющиеся в вещественной среде.

Упругие (механические) волны бывают продольными и поперечными (рис. 3.1.1).

В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны (рис. 3.1.1, а), в поперечных – в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны (рис. 3.1.1, б).

Продольные волны могут возбуждаться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т.е. в твердых, жидких и газообразных телах.

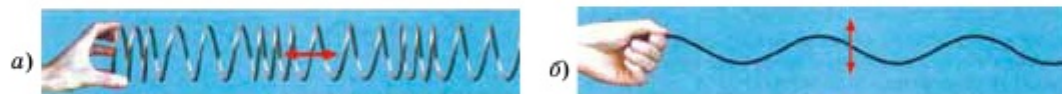


Рис. 3.1.1. Продольные и поперечные волны

Продольную волну легко наблюдать с помощью длинной мягкой пружины большого диаметра. Ударив ладонью по одному из концов пружины (рис. 3.1.1, а), можно заметить, как сжатие бежит по пружине. Поперечной является волна,

распространяющаяся по натянутому резиновому шнуру (рис. 3.1.1, б). При распространении волны вдоль шнура отдельные его участки совершают колебания в направлении, перпендикулярном распространению волны. Поперечные волны могут возбуждаться в среде, в которой возникают упругие силы при деформации сдвига, т.е. в твердых телах; в жидкостях и газах возникают только продольные волны, а в твердых телах – как продольные, так и поперечные.

2. Упругая волна называется гармонической, если соответствующие ей колебания частиц среды подчиняются синусоидальному (или косинусоидальному) закону.

На рис. 3.1.2 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью v вдоль оси x . Синусоидальная кривая на рисунке отражает зависимость $y(x)$ между смещением y частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц от источника колебаний для какого-то фиксированного момента времени t . Приведенный график функции $y(x)$ похож на график гармонического колебания, однако они различны по существу. **График волны** дает зависимость смещения *всех* частиц среды от расстояния до источника колебаний в данный момент времени, а **график колебаний** – зависимость смещения *данной* частицы от времени.

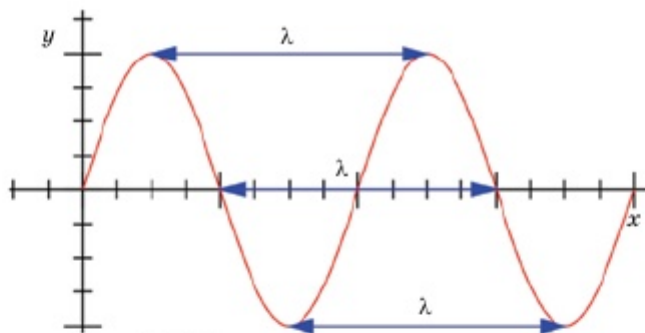


Рис. 3.1.2. Гармоническая поперечная волна

На рис. 3.1.3 изображена распространяющаяся поперечная волна. Показано положение колеблющихся шариков в разный момент времени. Можно заметить, что за период T , когда колебания достигнут шара 13, шары 1 и 13 колеблются совершенно одинаково. Даже спустя некоторое время, колебания этих шаров происходят в одинаковой фазе.

Расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися с одинаковыми фазами, называется длиной волны λ .

Скорость распространения v волны является ее важнейшей характеристикой. Следует отметить, что скорость распространения волны является конечной и равной

$$v = \frac{\lambda}{T}. \quad (3.1)$$

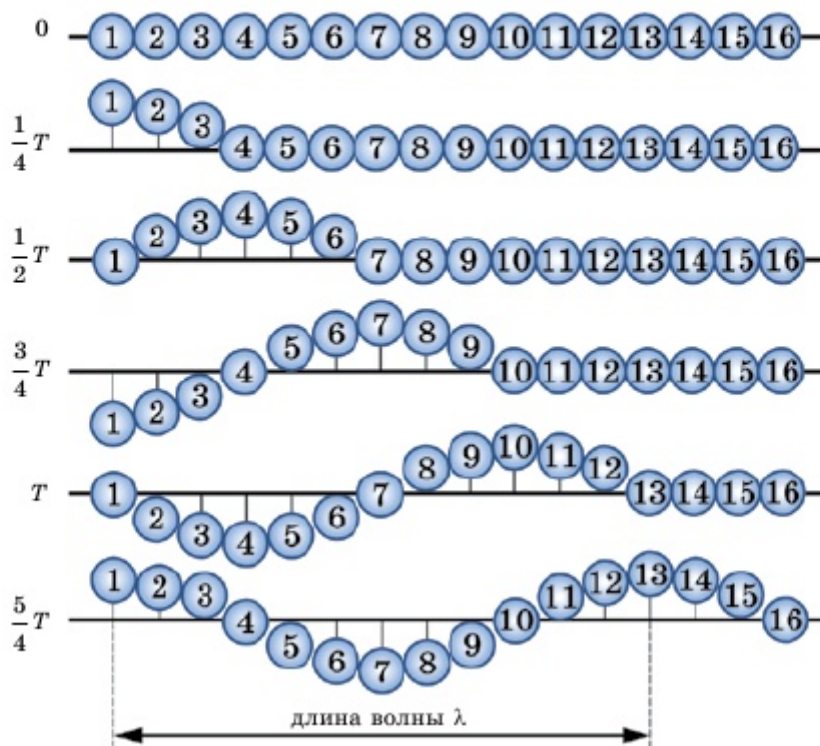


Рис. 3.1.3. Принцип распространения поперечной волны

Так как период T и частота ν связаны соотношением $T = \frac{1}{\nu}$, то имеем

$$v = \lambda \nu. \quad (3.2)$$

3. Если рассмотреть волновой процесс подробнее, то ясно, что колеблются не только частицы, расположенные вдоль оси x , а колеблется совокупность частиц, расположенных в некотором объеме, т.е. волна, распространяясь от источника колебаний, охватывает все новые и новые области пространства.

Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Волновой поверхностью называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

Волновых поверхностей можно провести бесчисленное множество, а волновой фронт в каждый момент времени – один. Волновой фронт также является волновой поверхностью. Волновые поверхности могут быть любой формы, а в простейшем случае они представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер. Соответственно, волна называется *плоской* или *сферической*.

**Дополнительный материал**

Определенный интерес вызывает механизм волны, возникающей на поверхности воды. Вертикально направленные силы создают волны с небольшой амплитудой. Когда поток воздуха проходит над этими волнами, он слегка отклоняется вверх над гребнем волны, а затем вниз – во впадины. Если бы поток был идеально ровным, то энергия ветра не передавалась бы волнам и амплитуда их оставалась бы прежней. Но когда поток не идеален, возникающая во впадине циркуляция воздуха смещает область максимального давления в сторону воздушного потока. Поэтому изменения давления уже не совпадают по фазе с волнами на воде, часть энергии воздушного потока передается волнам, и их амплитуда возрастает. Таким образом, на поверхности воды возникают большие волны.

**Вопросы**

1. Какой процесс называется волной? Какая волна называется механической? Каковы основные общие свойства всех типов волн?
2. Какие волны называются продольными и поперечными?
3. Почему в газах и жидкостях не могут существовать поперечные волны?
4. Какая волна называется гармонической?
5. Как можно определить длину волны графически и аналитически? Чему равна скорость распространения волны?
6. Что называется волновым фронтом? Что называется волновой поверхностью?

**Задание (экспериментальное исследование)**

Понаблюдайте за волной, возникающей в шнуре при закреплении одного из его концов и движении свободного конца хлыстовыми движениями по вертикальной плоскости. Опишите, что заметили. Что является источником возмущения упругой силы? Как происходит передача энергии волной? Сравните с волнами, возникающими на поверхности воды при бросании в нее предмета.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Скорость звука в воде равна 1450 м/с. На каком минимальном расстоянии находятся точки, совершающие колебания в противоположных фазах, если частота колебаний равна 725 Гц?

Д а н о:

$$v = 1450 \text{ м/с}$$

$$\varphi = 180^\circ$$

$$\nu = 725 \text{ Гц}$$

L – ?

Р е ш е н и е:

Найдем длину волны:

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{1450}{725} = 2 \text{ (м)}.$$

Точки находятся в противофазе, если расстояние между ними равно половине длины волны.

$$\text{Поэтому: } L = \frac{\lambda}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ (м)}.$$

О т в е т: $L = 1 \text{ (м)}$.

Задача 2. В вагоне поезда подвешен маятник длиной 1 м. При движении поезда маятник раскачивается от толчков на стыках рельсов. При какой скорости поезда маятник раскачивается особенно сильно, если длина рельсов составляет 25 м?

Д а н о: $l_1 = 1 \text{ м}$ $l_2 = 25 \text{ м}$ $v = ?$	Р е ш е н и е: Это происходит в том случае, когда частота колебаний маятника совпадает с частотой колебаний вагона, т.е. при резонансе. Пусть ν_1 – частота колебаний маятника, а ν_2 – вагона.
--	--

Так как $\nu = \frac{1}{T}$, где T – период колебаний, то из равенства $\nu_1 = \nu_2$ следует и $T_1 = T_2$. Но $T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l_1}{g}} = 2 \text{ с}$. Значит, скорость поезда должна быть такова, чтобы он проходил расстояние между стыками за 2 с. Так как это расстояние по условию равно 25 м, то скорость поезда $v = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ (м/с)}$.

О т в е т: $v = 12,5 \text{ (м/с)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 3.1.1. Определите длину звуковой волны в водороде, вызываемой источником колебаний с частотой 200 Гц, если скорость звука в водороде равна 1286 м/с. (Ответ: 6,43 м.)
- 3.1.2. Расстояние между узлами стоячей волны, создаваемой камертоном в воздухе, составляет 15 см. Определите частоту колебаний камертона. Скорость звука принять равной 340 м/с. (Ответ: 1133 Гц.)

Уровень В

- 3.1.3. Волны распространяются со скоростью 300 м/с при частоте, равной 500 Гц. Чему равна разность фаз двух точек, отстоящих друг от друга на расстоянии 20 см? (Ответ: $2\pi/3$.)
- 3.1.4. Найдите разность фаз между двумя точками звуковой волны, отстоящими друг от друга на расстоянии 10 см, если частота колебаний 680 Гц. Скорость звука принять равной 340 м/с. (Ответ: $2\pi/5$.)
- 3.1.5. Источник издает звук, частота которого равна 400 Гц. Наблюдатель воспринимает звук как колебания с частотой 395 Гц. С какой скоростью движется источник? Он приближается или удаляется от наблюдателя? Скорость звука принять равной 340 м/с. (Ответ: 4,25 м/с, источник удаляется.)
- 3.1.6. Расстояние между гребнями волн в море $\lambda = 7 \text{ м}$. При встречном движении катера волна за $t = 2 \text{ с}$ ударяет о корпус катера $N_1 = 3$ раза, а при попутном – $N_2 = 1$ раз. Найдите скорость катера и волны. (Ответ: $v_k = 7 \text{ м/с}$; $v_w = 3,5 \text{ м/с}$.)
- 3.1.7. Найдите смещение от положения равновесия точки, отстоящей от источника колебаний на расстоянии $l = \frac{\lambda}{6}$, в момент времени $t = \frac{T}{2}$ амплитуда колебаний равна 0,1 м. (Ответ: 86,6 мм.)

Уровень С

- 3.1.8. К верхнему концу цилиндрического сосуда, в который постепенно наливают воду, поднесен звучащий камертон. Звук, издаваемый камертоном, заметно усиливается, когда расстояния от поверхности жидкости до верхнего края сосуда достигают значений $h_1 = 25$ см, $h_2 = 75$ см. Определите частоту колебаний камертона. Скорость звука принять равной 340 м/с. (Ответ: 340 Гц.)
- 3.1.9. Частота колебаний крыльев беркута в полете равна в среднем 2 Гц. Сколько взмахов крыльев сделает беркут, пролетев путь 500 м со скоростью 10 м/с? (Ответ: 100 взмахов.)

§ 3.2**Уравнение бегущей волны**

1. Найдём уравнение, описывающее колебательный процесс в любой точке пространства при распространении гармонической волны. Для этого рассмотрим гармоническую волну, бегущую по длинному тонкому резиновому шнуру.

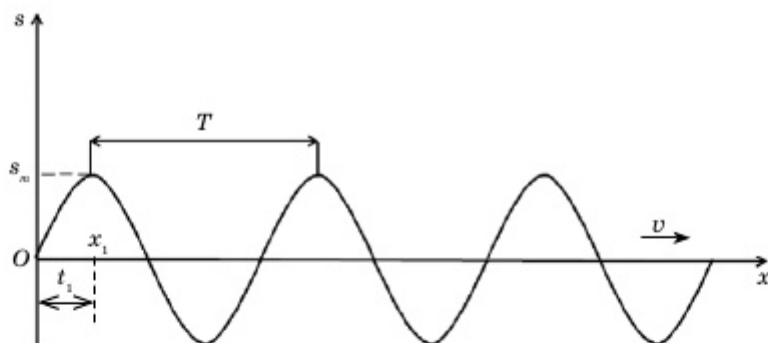


Рис. 3.2.1. Гармоническая волна, бегущая по длинному шнуру

Ось Ox направим вдоль шнура (рис. 3.2.1), начало отсчета свяжем с левым концом шнура. Смещение колеблющейся точки от положения равновесия обозначим через s . Тогда колебания начальной точки шнура будут представлены в виде периодической функции синуса (или косинуса):

$$s = s_m \sin \omega t, \quad (3.3)$$

где s_m – амплитуда колебаний. Начальная фаза равна нулю ($\varphi_0 = 0$).

Если считать, что колебания вдоль шнура распространяются со скоростью v , то в точку с координатой x_1 они придут через время t_1 (рис. 3.2.1):

$$t_1 = \frac{x_1}{v}. \quad (3.4)$$

Данная точка при этом тоже начинает совершать колебания, но по сравнению с начальной точкой с запаздыванием времени на t_1 . Если пренебречь затуханием волны по мере ее распространения, то точка с координатой x_1 также начнет совершать колебания с амплитудой s_m , но с другой фазой:

$$s = s_m \sin[\omega(t - t_1)] = s_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x_1}{v}\right)\right]. \quad (3.5)$$

Формула (3.5) называется **уравнением бегущей волны**, которая распространяется вдоль оси Ox . Если же начальная фаза колебаний φ_0 не равна нулю, то уравнение (3.5) запишется в виде

$$s = s_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x_1}{v}\right) + \varphi_0\right]. \quad (3.6)$$

2. Аргумент синуса называют **фазой волны**. Фаза волны равна:

$$\omega\left(t - \frac{x_1}{v}\right) + \varphi_0. \quad (3.7)$$

При замене \sin на \cos начальная фаза меняется на $\frac{\pi}{2}$. Уравнение (3.6) можно преобразовать, заменив ω на $2\pi\nu$ и используя выражение для скорости (3.2):

$$s = s_m \sin\left[2\pi\nu\left(t - \frac{x_1}{\lambda\nu}\right) + \varphi_0\right] = s_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) + \varphi_0\right]. \quad (3.8)$$

Из этого уравнения видно, что функция (3.8) обладает **двойной периодичностью**: по времени при фиксированном x и в пространстве при фиксированном моменте времени. Это означает, что при замене t на $t + T$ и x на $x + \lambda$ смещение по уравнению (3.8) остается одним и тем же.

Гармоническая волна, отличающаяся двойной периодичностью и по времени, и в пространстве, называется бегущей волной.

В бегущей волне все точки совершают колебания с одним и тем же периодом, но различными фазами. Разность фаз двух точек с координатами x_1 и x_2 равна

$$\Delta\varphi = \varphi(x_2) - \varphi(x_1) = 2\pi\frac{x_2 - x_1}{\lambda}. \quad (3.9)$$

При этом если $x_2 - x_1 = \lambda$, то разность фаз равна 2π и точки колеблются синфазно. Если же $x_2 - x_1 = \frac{\lambda}{2}$, то разность фаз равна $\frac{\pi}{2}$ и точки колеблются в противофазе.

В природе строго гармонических волн не существует, так как потери механической энергии неизбежны, поэтому со временем происходит затухание волн. Приблизительно о гармонической волне можно говорить в случае, если затухание бегущей волны на одной длине волны мало и по всей длине шнура укладывается очень много длин волн.



Вопросы

1. По какому уравнению можно рассчитать смещение колеблющейся точки в гармонической волне, бегущей по длинному шнуру?
2. Какими уравнениями можно представить бегущую гармоническую волну?
3. Какая волна называется бегущей волной?
4. При каких условиях точки совершают синфазные и противофазные колебания в бегущей волне?



Задание (теоретическое исследование)

Подготовьте доклад в виде реферата или презентации на тему «Землетрясение». Раскройте связь этого явления с типами различных волн в природе.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Звуковые колебания, имеющие частоту $\nu = 500$ Гц и амплитуду $s_m = 0,25$ мм, распространяются в воздухе. Длина волны $\lambda = 70$ см. Найдите скорость v распространения колебаний и максимальную скорость v_m частиц воздуха.

Д а н о:
 $\nu = 500$ Гц
 $s_m = 0,25$ мм
 $\lambda = 70$ см
 $v = ?$ $v_m = ?$

СИ
 $2,5 \cdot 10^{-4}$ м
 $0,7$ м

Р е ш е н и е:

Скорость распространения колебаний связана с длиной волны λ и частотой колебаний ν соотношением

$$v = \lambda \nu.$$

Следовательно, скорость $v = 0,7 \cdot 500 = 350$ (м/с).

Уравнение волны имеет вид

$$s = s_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right],$$

где s – смещение точки, находящейся на расстоянии x от источника колебаний, в момент времени t ; s_m – амплитуда колеблющихся точек. Скорость точек среды, в которой распространяется волна, можно найти, продифференцировав волновое уравнение по времени:

$$v_m = s' = s_m \omega \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right].$$

Если $\cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = 1$, то скорость частиц в воздухе будет максимальной и равной: $v_m = s_m \omega = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 500 = 0,785$ (м/с).

О т в е т: $v = 350$ (м/с); $v_m = 0,785$ (м/с).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 3.2.1. Рыболов заметил, что за 18 с поплавок совершил на волнах 45 колебаний, а расстояние между соседними гребнями волн равно 1,2 м. Какова скорость распространения волн? (Ответ: 3 м/с.)

- 3.2.2. Волна распространяется в упругой среде со скоростью 80 м/с. Наименьшее расстояние Δl между точками среды, фазы колебаний которых противоположны, равно 2 м. Определите частоту колебаний. (Ответ: 20 Гц.)
- 3.2.3. Плоская незатухающая звуковая волна возбуждается источником колебаний частоты ν . Амплитуда колебаний источника равна A . Напишите уравнение колебаний источника $x(0, t)$, если в начальный момент смещение точек источника максимально. Учтем, что скорость звука равна 340 м/с. (Ответ: $x(0, t) = A \cos \left(2\pi\nu t - \frac{\pi\nu x}{170} \right)$.)

Уровень В

- 3.2.4. От источника колебаний распространяется волна вдоль прямой линии. Амплитуда колебаний равна 15 см. Найдите смещение от положения равновесия точки, удаленной от источника на расстояние $l = \frac{1}{2} \lambda$ в момент, когда от начала колебаний прошло время $t = 0,5 T$. (Ответ: 0,15 м.)
- 3.2.5. На озере в безветренную погоду с лодки бросили тяжелый якорь. От места бросания якоря пошли волны. Человек, стоящий на берегу, заметил, что волна дошла до него через 40 с, расстояние между соседними гребнями волн составляет 0,3 м, а за 5 с было 10 всплесков о берег. Как далеко от берега находилась лодка? (Ответ: на расстоянии 24 м.)
- 3.2.6. Определите разность фаз $\Delta\phi$ колебаний источника волн, находящегося в упругой среде, и точки этой среды, отстоящей на расстоянии $l = 2$ м от источника. Частота колебаний $\nu = 5$ Гц, волны распространяются со скоростью 40 м/с. (Ответ: 1,57 рад.)
- 3.2.7. Плоская звуковая волна $s = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{l}{v} \right) \right]$ имеет период, равный 3 мс, амплитуду – 0,2 мм и длину волны – 1,2 м. Для точек среды, удаленных от источника колебаний на расстояние 2 м, найдите: смещение от положения равновесия в момент времени, равный 7 мс; скорость и ускорение для того же момента времени. Начальную фазу колебаний принять равной нулю. (Ответ: – 0,1 мм; 36,3 см/с; 438 м/с².)
- 3.2.8. Уравнение волны имеет вид $x = \sin 2,5 \pi t$. Найдите смещение от положения равновесия, скорость и ускорение точки, находящейся на расстоянии 20 м от источника колебаний, для момента времени $t = 1$ с после начала колебаний. Скорость распространения колебаний составляет 100 м/с. (Ответ: 0; 7,85 м/с; 0.)
- 3.2.9. Уравнение незатухающих колебаний имеет вид: $x = 2,5 \sin 400 \pi t$. Найдите смещение от состояния равновесия точки, которая находится на расстоянии 75 см от источника колебаний, для момента времени $t = 0,01$ с после начала колебаний. Скорость распространения колебаний составляет 400 м/с. (Ответ: 2,5 см.)

Уровень С

- 3.2.10. Точки, находящиеся на одном луче и удаленные от источника колебаний на 15 м и 20 м, колеблются с разностью фаз $\pi/2$ рад. Определите скорость распространения колебаний в данной среде, если период колебания источника составляет 0,01 с. (Ответ: 2 км/с.)

§ 3.3

Уравнение стоячей волны

1. Стоячими называются волны, которые образуются при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами.

Когда мы рассматривали волну, распространяющуюся по шнуру, то предполагали, что шнур не имеет второго конца и волна распространяется бесконечно. Если же второй конец шнура закреплен, то волна добежит до места фиксирования, отразится и будет распространяться в обратном направлении. При этом произойдет наложение двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях, и образуется стоячая волна (рис. 3.3.1).

При отражении волны от закрепленного конца шнура изменяется фаза колебаний.

На рис. 3.3.1 изображены положения двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу через промежуток времени, равный четверти периода.

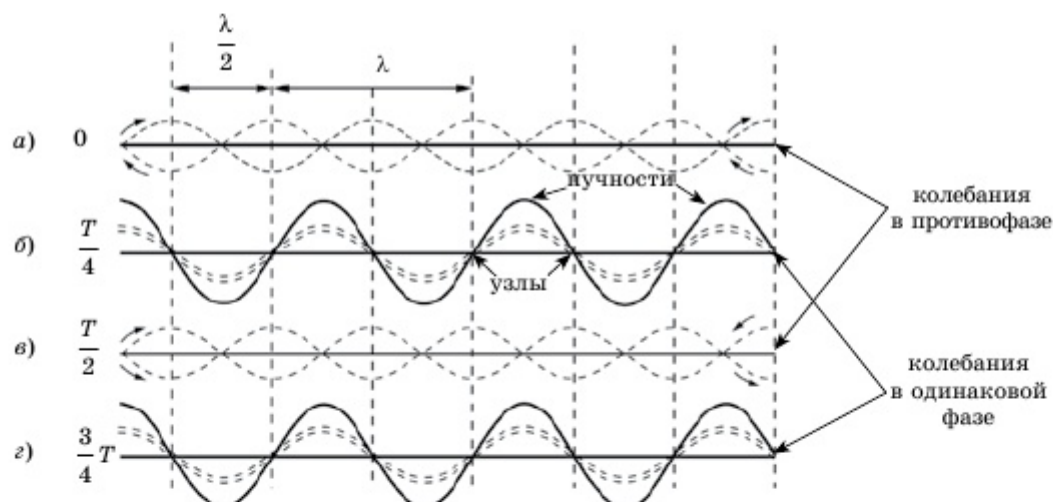


Рис. 3.3.1. Образование стоячих волн

Результирующие колебания шнура происходят вследствие сложения двух колебаний. Если в некоторой точке складываются колебания с одинаковыми фазами, то амплитуда колебаний удваивается (рис. 3.3.1, б).

Точки, в которых происходит увеличение амплитуды колебаний в два раза вследствие наложения двух волн, распространяющихся в одинаковой фазе, называются пучностями.

Если же в какой-то точке складываются колебания с противоположными фазами, то в такой точке происходит затухание, и эта точка находится в покое.

Узлами называются точки, которые остаются в покое вследствие наложения падающей и отраженной волны, колеблющихся в противофазе.

Узлы и пучности не перемещаются вдоль шнура. Это происходит потому, что разность фаз колебаний в пучностях и узлах не меняется со временем. Она зависит только от положения точек на шнуре. В результате распределение смещений точек шнура относительно их положений равновесия в любой момент времени образует волну, которая не перемещается в пространстве. Поэтому такая волна называется **стоячей**.

2. Для получения **уравнения стоячей волны** рассмотрим падающую и отраженную волны. Для бегущей падающей волны уравнение запишется в следующем виде:

$$s_1 = s_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (3.10)$$

Уравнение отраженной волны запишем в следующем виде:

$$s_2 = -s_m \sin \omega \left(t - \frac{2l - x}{v} \right), \quad (3.11)$$

поскольку волна, проходя до конца шнура и при этом обратно до точки x , преодолевает расстояние $2l - x$, $s = s_1 + s_2$.

Результирующее смещение при этом равно:

$$s = s_m \left[\sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) - \sin \omega \left(t - \frac{2l - x}{v} \right) \right].$$

Воспользовавшись теоремой о разности синусов, запишем последнее уравнение, которое называется **уравнением стоячей волны** в следующем виде:

$$s = 2s_m \sin \omega \frac{l - x}{v} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{l}{v} \right), \quad (3.12)$$

где амплитуда колебаний равна

$$s_a = 2s_m \sin \omega \frac{l - x}{v}. \quad (3.13)$$

Узловые точки лежат друг от друга на расстоянии, удовлетворяющем условию $\frac{\omega \Delta x}{v} = \pi$. Отсюда

$$\Delta x = \frac{\pi v}{\omega} = \frac{vT}{2} = \frac{\lambda}{2}. \quad (3.14)$$

Расстояние между соседними пучностями (или узлами) равно половине длины волны (рис. 3.3.1).

Фаза колебаний всех точек между двумя соседними узлами в стоячей волне одинакова. Смещение точек между соседними узлами происходит в данный момент времени в одну и ту же сторону.

В бегущей волне точки шнура колеблются с одинаковой амплитудой, но с различными фазами, а в стоячей волне фаза колебаний точек между узлами одна и та же, но амплитуда меняется от точки к точке.



Вопросы

1. Какая волна называется стоячей волной? Чем отличается бегущая волна от стоячей?
2. Что называют пучностями? Что называют узлами?
3. Как получают уравнение стоячей волны? Чему равно расстояние между пучностями (или узлами)?
4. Переносится ли энергия стоячей волной? Почему?



ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Один конец упругого стержня соединен с источником гармонических колебаний, подчиняющихся закону $s = s_m \cos \omega t$, а другой его конец жестко закреплен. Учитывая, что отражение в месте закрепления стержня происходит от менее плотной среды, определите характер колебаний в любой точке стержня.

Д а н о:

$$s = s_m \cos \omega t$$

Среда менее
плотная

$$s(x, t) = ?$$

Р е ш е н и е:

Из условий задачи вытекает, что падающая волна характеризуется косинусоидальной функцией и описывается следующим уравнением:

$$s_1 = s_m \cos \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

В том случае, когда волна отражается от среды более плотной, чем среда, где распространяется волна, в месте отражения возникает узел, фаза изменяется на противоположную. При этом говорят, что происходит потеря половины волны. Когда волна отражается от среды менее плотной, в месте отражения появляется пучность и потери половины волны нет. В этом случае отраженная волна описывается следующим образом:

$$s_2 = s_m \cos \left(t + \frac{x}{v} \right).$$

Для стоячей волны получим следующее выражение:

$$s(x, t) = s_1 + s_2 = s_m \cos \left(t - \frac{x}{v} \right) + s_m \cos \left(t + \frac{x}{v} \right),$$

или, воспользовавшись теоремой о сумме косинусов, запишем последнее выра-

жение в следующем виде: $s(x, t) = s_m \left[\cos \omega t \cos \frac{\omega x}{v} + \sin \omega t \sin \frac{\omega x}{v} + \cos \omega t \cos \frac{\omega x}{v} - \right.$

$\left. - \sin \omega t \sin \frac{\omega x}{v} \right] = 2s_m \cos \frac{\omega x}{v} \cos \omega t$, или, учитывая, что: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\lambda = vT$,

$$\frac{\omega x}{v} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{\lambda} x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x, \text{ получим:}$$

$$s(x, t) = 2A \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cdot \cos \omega t,$$

$$(A = s_m),$$

где A – амплитуда смещения.

При $x = \pm m \frac{\lambda}{2}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), т.е. в пучностях стоячей волны
($s = \pm 2A$).

При $x = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), т.е. в узлах стоячей волны
($s = 0$).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 3.3.1. Определите длину бегущей волны, если в стоячей волне расстояние между пятым и седьмым узлами равно 10 см. (Ответ: 10 см.)
- 3.3.2. Расстояние между первым и четвертым узлами стоячей волны равно 45 см. Чему равна длина волны? (Ответ: 30 см.)
- 3.3.3. В струне возникает стоячая волна. Длина падающей и отраженной волны – l . Каково расстояние между соседними узлами? (Ответ: $0,5l$.)

Уровень В

- 3.3.4. Определите длину бегущей волны, если в стоячей волне расстояние между второй и пятой пучностями равно 15 см. (Ответ: 10 см.)
- 3.3.5. Найдите положение узлов и пучностей и начертите график стоячей волны, если отражение происходит от менее плотной среды. Длина бегущей волны равна 16 см. (Ответ: пучности – $0,08n$; узлы – $0,04(2n + 1)$.)
- 3.3.6. Амплитуда колебаний в пучности стоячей волны равна 1 м, а амплитуда колебаний в точке, отстоящей от пучности на 0,3 м, в два раза меньше. Определите длину бегущей волны. (Ответ: 1,2 м.)
- 3.3.7. Стоячая волна образуется при наложении бегущей звуковой волны и волны, отраженной от границы раздела сред, перпендикулярной направлению распространения волны. Найдите положения узлов и пучностей стоячей волны, если отражение происходит от среды менее плотной. Скорость распространения звуковых колебаний равна 340 м/с и период $3 \cdot 10^{-4}$ с. (Ответ: пучности – $0,051n$; узлы – $0,051(n + 1/2)$.)

Уровень С

- 3.3.8. Струна длиной 0,8 м туго натянута между двумя опорами. Скорость распространения волны в струне равна 16 м/с. Определите частоты первых пяти стоячих волн, начиная с самой длинной, которые можно возбудить в струне. Какие из этих колебаний будут источниками слышимых звуков? (Ответ: 10, 20, 30, 40, 50 Гц. Колебания с частотой 20, 30, 40, 50 Гц будут источниками слышимых звуков.)
- 3.3.9. Стоячая волна образуется при наложении бегущей звуковой волны и волны, отраженной от границы раздела сред, перпендикулярной направлению распространения волны. Найдите положения узлов и пучностей стоячей волны, если отражение происходит от среды более плотной. Скорость распространения звуковых колебаний равна 340 м/с, частота – 4,3 кГц. (Ответ: узлы – $0,04n$; пучности – $0,04(n + 1/2)$.)

3.3.10. В железной трубке образовалась стоячая волна и наблюдалось 8 пучностей. Какова была длина l_2 воздушного столба, если железный стержень закреплен: а) посередине; б) в конце? Длина стержня $l_1 = 2$ м. Скорость распространения звука в железе составляет 5930 м/с, в воздухе – 343 м/с. (Ответ: 0,925 м; 1,85 м.)

Лабораторная работа № 2.

Определение скорости звука в воздухе

Цель работы: ознакомиться с явлением возникновения стоячих звуковых волн и определить опытным путем скорость звука в воздухе.

Необходимое оборудование: 1) труба с подвижным поршнем; 2) линейка измерительная; 3) генератор звуковой с телефоном.

Краткая теория. Звуковыми волнами называются распространяющиеся в упругой среде механические волны, частоты которых соответствуют интервалу 16–20 000 Гц. В экспериментальном определении скорости звука применяется метод стоячих волн. Стоячими называются волны, которые образуются при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Такие стоячие звуковые волны образуются в трубке с подвижным поршнем (рис. 3.3.2), где от источника звука образуются бегущие волны и при отражении от препятствия в виде подвижного поршня начинают в обратном направлении распространяться отраженные волны. При наложении падающей и отраженной волн результирующей является стоячая звуковая волна. Определяя расстояние λ между пучностями и узлами стоячей волны экспериментально в трубке, а также зная заданную звуковую частоту ν генератора, вычисляем скорость звука в воздухе по формуле $v = \lambda\nu$.

Порядок работы:

1. Соберите лабораторную установку согласно рис. 3.3.2, на котором: 1 – звуковой генератор; 2 – излучатель звуковых колебаний; 3 – стальная труба; 4 – миллиметровая шкала; 5 – поршень; 6 – указатель.

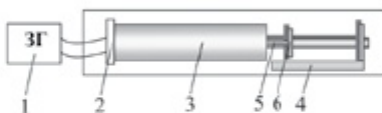


Рис. 3.3.2

2. Подключите с разрешения преподавателя звуковой генератор к сети 220 В и, включив его тумблером «СЕТЬ», прогрейте 2–3 минуты.
3. После прогрева переключателем диапазонов и ручкой настройки установите заданную преподавателем частоту генерации ν . Рекомендуемый диапазон составляет 900–1500 Гц.

Примечание: установите громкость звука так, чтобы он был хорошо слышим, но в то же время не мешал другим.

4. Передвиньте поршень вплотную к источнику звука – телефону, установленному у края трубы.
5. Медленно и равномерно отодвигая поршень от телефона, отметьте точки резкого усиления звука по всей длине трубы. Эти точки являются пучностями. Соответственно, расстояния между пучностями являются длиной волны стоячих звуковых волн.
Расстояния l_m и номера точек m занесите в журнал наблюдений.
6. Повторите действия по пунктам 3 и 4 для двух других частот звуковых колебаний. Рекомендуемый диапазон составляет 900–1500 Гц.
Результаты измерений занесите в журнал наблюдений.
7. Выключите питание генератора тумблером «СЕТЬ» и отключите установку от сети.
8. Для всех случаев определите длину стоячей волны.
9. Подсчитайте скорость звука в воздухе для всех значений длины бегущей волны.
10. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения. Для этого воспользуйтесь п. 5 лабораторной работы № 1.
11. Запишите вывод: что вы измеряли и какой получен результат.
12. Для осмысления результата проделанной работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2

1. Дайте определения периоду, амплитуде, частоте и фазе колебаний.
2. Почему стоячая волна не переносит энергии?
3. Как объясняется возникновение стоячих волн?
4. Одинаковы ли амплитуды колебаний точек среды в бегущей, стоячей волнах?
5. Как изменяется фаза колебаний точек среды от точки к точке в бегущей волне? В стоячей волне?

§ 3.4

Интерференция механических волн

1. Когда мы имеем дело с волновым процессом, то в природе очень часто встречаются случаи, когда одновременно в данной точке пространства пересекаются две волны. Например, в воду может быть брошено два камня, в результате образуются две волны, и каждая из них, распространяясь на поверхности воды, ведет себя так, как будто другой волны не существует, проходя сквозь нее. При этом мы можем заметить, что некоторые участки воды не возмущены, а в других местах возмущение усилилось.

Для описания происходящих явлений при наложении двух волн вводится понятие *когерентность волны*.

Волны называются когерентными, если разность их фаз остается постоянной во времени. Когерентными могут быть лишь волны, имеющие одинаковую частоту.

2. Интерференцией волн называется явление сложения в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Интерференционную картину можно наблюдать только для когерентных волн. Рассмотрим волны на поверхности воды, возбужденные двумя шариками, укрепленными на стержне, совершающем гармонические колебания (рис. 3.4.1). Пусть в точке M одновременно накладываются две волны. Амплитуду этих волн можно считать одинаковой при условии, если расстояние между источниками двух волн l меньше путей d_1 и d_2 , пройденных волнами до точки M .

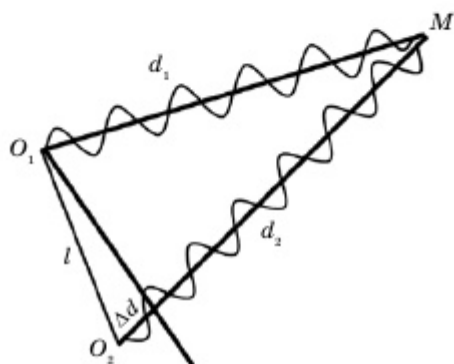


Рис. 3.4.1. Наложение волн от когерентных источников

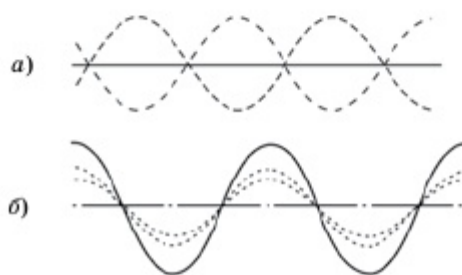


Рис. 3.4.2. Гашение и усиление когерентных волн

Результат интерференции (усиление или ослабление) зависит от величины $\Delta d = d_2 - d_1$, которая называется **разностью хода волн**. Например, если рассмотрим наложение двух волн, разность фаз которых равна $\Delta\varphi = \pi$, т.е. колебания происходят в противофазе (рис. 3.4.2, а), то разность хода равна половине длины волны ($\Delta d = \lambda/2$). Вторая волна отстает от другой на половину периода. При этом волны гасят друг друга. То есть амплитуда результирующего колебания равна нулю и в рассматриваемой точке колебаний нет. То же самое будет происходить, если разность хода будет равна $\frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda \dots$ и т.д.

На рис. 3.4.2, б изображено наложение двух волн с разностью фаз, равной нулю. В этом случае разность хода равна длине волны ($\Delta d = \lambda$), при этом гребни волн совпадают. Следовательно, амплитуда результирующего колебания удваивается и происходит усиление волнами друг друга. Если даже разность хода будет равна двум длинам волны, трем длинам волны и т.д., можно будет наблюдать ту же интерференционную картину. Таким образом, можно сформулировать условия минимумов и максимумов интерференции двух волн.

Если в данной точке разность хода двух накладываемых друг на друга волн равна целому числу волн, то в данной точке среды наблюдается максимальное усиление амплитуды волны (условие максимума):

$$\Delta d = k\lambda, k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.15)$$

Если в данной точке разность хода двух накладываемых друг на друга волн равна нечетному числу полуволн, то в данной точке среды наблюдается максимальное ослабление амплитуды волны (условие минимума):

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (3.16)$$

Если в данной точке разность хода двух накладываемых друг на друга волн равна промежуточному значению между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда принимает значение между нулем и удвоенной амплитудой.

При рассмотрении результата интерференции двух механических волн встает вопрос о законе сохранения энергии. В самом деле, что же произойдет с энергией двух волн при гашении ими друг друга? Ведь волны переносят энергию. В точке, где две волны гасят друг друга, энергия не исчезает. А как раз эта энергия перераспределяется на то, чтобы в других точках среды, где разность хода двух волн удовлетворяет условию максимума, произошло максимальное увеличение амплитуды. Как видно, в природе все явления происходят закономерно. Согласно закону сохранения, суммарная энергия, переносимая волной, не меняется. Просто в некоторых точках колебания вовсе исчезают, а в некоторых за счет этого усиливаются.



Вопросы

1. Какое явление называется интерференцией волн? Какие волны называют когерентными?
2. Каковы условия максимума и минимума интерференции двух волн?
3. Почему интерференционная картина отчетливо видна только вблизи прямой, проходящей посередине между источниками?



Задание (теоретическое исследование)

1. Интерференционная картина наблюдается в результате наложения двух когерентных волн, если длина волны равна 0,5 м. Охарактеризуйте интерференционную картину для следующих разностей ходов: 0,1 м; 0,3 м; 0,5 м; 0,6 м; 0,7 м; 0,9 м; 1 м; 2 м; 3 м; 4 м; 5 м.
2. Нарисуйте волны, идущие от двух когерентных источников к некоторой точке.

§ 3.5

Принцип Гюйгенса. Дифракция механических волн

1. Механическая волна способна огибать препятствия. Например, в море волны огибают камни, торчащие из воды, а за камнями ведут себя как будто этих препятствий и не было. Все волны способны огибать препятствия, что является их *фундаментальным свойством*. Звуковые волны хорошо проявляют эти свойства, поскольку изданный звук доносится до места назначения, несмотря на деревья, дома и другие препятствия, встающие на его пути.

Христиан Гюйгенс, исследовав подобные явления, в 1678 году пришел к такому выводу, названному позже **принципом Гюйгенса**: *каждая точка фронта, до которой дошла волна к моменту времени t , становится источником вторичных волн*.

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка волновой поверхности в последующий момент времени рассматривается, как источник волн (рис. 3.5.1).

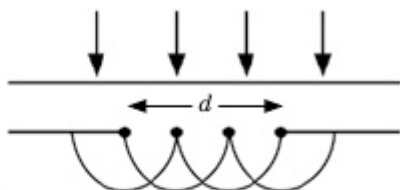


Рис. 3.5.1. Волновой фронт и источники вторичных волн

2. Дифракцией называется *огибание волной края препятствия, особенно отчетливо наблюдаемое при малых по сравнению с длиной волны размерах препятствия ($d \approx \lambda$)*.

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса.

Пусть плоская волна нормально падает на отверстие в непрозрачном экране (рис. 3.5.1). Каждая точка участка волнового фронта, выделенного отверстием, служит источником вторичных волн (в однородной изотопной среде они сферические).

Построив линию, огибающую вторичные волны для некоторого момента времени, мы видим, что фронт волны заходит в область геометрической тени, т.е. волна огибает края отверстия.



Христиан Гюйгенс ван Зейлихем – нидерландский механик, физик, математик, астроном и изобретатель. Первый иностранный член Лондонского королевского общества (1663), член Французской академии наук с момента ее основания (1666) и ее первый президент (1666–1681).

Один из основоположников теоретической механики и теории вероятностей. Внес значительный вклад в оптику, молекулярную физику, астрономию, геометрию, часовое дело. Открыл кольца Сатурна и Титан (спутник Сатурна). Изобрел первую практически применимую модель часов с маятником. Положил начало волновой оптике.

3. Френель существенно развил принцип Гюйгенса следующими положениями, получившими название **принцип Гюйгенса – Френеля**:

- Все вторичные источники фронта волны, исходящей из одного источника, когерентны между собой.
- Равные по площади участки волновой поверхности излучают равные интенсивности (мощности).

• Каждый вторичный источник излучает свет преимущественно в направлении внешней нормали к волновой поверхности в этой точке. Амплитуда вторичных волн в направлении, составляющем угол α с нормалью, тем меньше, чем больше угол α .

• Для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: излучение одних участков волновой поверхности не влияет на излучение других (если часть волновой поверхности прикрыть непрозрачным экраном, вторичные волны будут излучаться открытыми участками так, как если бы экрана не было).

Используя эти положения, Френель уже мог сделать количественные расчеты дифракционной картины.

4. Для того чтобы понять условия, при которых можно наблюдать дифракцию, рассмотрим несколько примеров.

В воде дифракцию можно наблюдать, если на пути распространения волн поставить экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны. За экраном начинает распространяться волна, как будто щель является источником волн. Если размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то волна проходит сквозь отверстие, не меняя своей формы.

Представьте себе, что вы со спутником идете по улице и ваш спутник только что повернул за угол дома, но вы его уже не видите. Окликнув его, вы услышите отзыв. Звук – механические волны, их длина в воздухе порядка 10^{-1} м, свет – электромагнитные волны, их длина на пять порядков меньше, чем у звуковых. Звук обогнул угол дома, свет не смог это сделать. В данном примере мы четко наблюдаем дифракцию звуковых волн, а дифракция световых волн себя не обнаруживает: звук ведет себя как волна, а свет – как геометрический луч. Причина проста: волна дифрагирует на препятствиях, размеры d которых не слишком велики по сравнению с длиной волны λ . Итак, **условия наблюдения дифракции**:

$$d \leq \lambda.$$

Если размеры препятствия очень велики ($d \gg \lambda$), то дифракция незаметна, предметы отбрасывают четкую геометрическую тень.



Вопросы

1. В чем состоит физический смысл принципа Гюйгенса? Как формулируется этот принцип?
2. Какое явление называется дифракцией? Как в воде можно наблюдать дифракцию волн? Как объяснить дифракцию волн на основе принципа Гюйгенса?
3. В чем состоит физический смысл принципа Гюйгенса – Френеля? Как этот принцип формулируется? Какими положениями дополнен?



**Задание (экспериментальное исследование)**

В небольшом искусственном бассейне исследуйте поведение волны на поверхности воды, используя преграды различного размера на пути ее распространения. Свои наблюдения и выводы представьте в виде реферата, сопроводив рисунками.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 3







- **Волновым процессом** (или **волной**) называется процесс распространения колебаний в сплошной среде.
- **Механическими волнами** называются механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.
- **Длиной волны** λ называется расстояние, на которое распространяется волна за период.
- **Волновым фронтом** называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .
- **Волновой поверхностью** называется геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.
- **Уравнение бегущей волны:** $s = s_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$.
- **Уравнение стоячей волны:** $s = 2s_m \sin \omega \frac{l-x}{v} \cos \omega \left(t - \frac{l}{v} \right)$.
- **Пучностями** называются точки, в которых происходит увеличение амплитуды колебаний в два раза вследствие наложения двух волн, распространяющихся в одинаковой фазе.
- **Узлами** называются точки, которые остаются в покое при наложении падающей и отраженной волн, колеблющихся в противофазе.
- Расстояние между соседними пучностями (или узлами) равно половине длины волны: $\Delta x = \lambda/2$.
- **Когерентными** называются волны, разность фаз которых остается постоянной во времени.
- **Интерференцией волн** называется явление сложения в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.
- **Условия максимума интерференции:**
 $\Delta d = k\lambda, k = 0, 1, 2, 3 \dots$
- **Условия минимума интерференции:**
 $\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, 3 \dots$
- **Принцип Гюйгенса:** каждая точка фронта, до которой дошла волна к моменту времени t , становится источником вторичных волн.
- **Дифракцией** называется огибание волной края препятствия, наблюдаемое при малых по сравнению с длиной волны его размерах: $d \ll \lambda$.

Глава 4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  *объяснять условия возникновения электромагнитных волн и описывать их свойства;*
-  *описывать модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний;*
-  *различать амплитудную и частотную модуляции;*
-  *объяснять принцип работы детекторного приемника;*
-  *объяснять преимущества передачи сигнала в цифровом формате в сравнении с аналоговым сигналом;*
-  *систематизировать средства связи и предлагать возможные пути их совершенствования.*

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
электромагниттік өріс	электромагнитное поле	electromagnetic field
магнит өрісі	магнитное поле	magnetic field
толқын	волна	wave
электромагниттік толқындар	электромагнитные волны	electromagnetic waves
контур	контур	circuit
толқындық беттер	волновые поверхности	wave surfaces
радиобайланыс	радиосвязь	radio communication
радиолокация	радиолокация	radiolocation
телевизия, теледидар	телевидение	television
Герц вибраторы	вibrator Герца	Hertzian dipole
магнит өрісінің кернеулігі	напряженность магнитного поля	magnetic field strength
магнит өрісінің индукциясы	индукция магнитного поля	magnetic field induction

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «электромагнитное поле», «магнитное поле», «волна», «электромагнитные волны», «контур», «волновые поверхности», «радиосвязь», «радиолокация», «телевидение», «вибратор Герца», «напряженность магнитного поля», «индукция магнитного поля».

§ 4.1

Излучение и прием электромагнитных волн

1. Электромагнитное поле. После открытия взаимосвязи между изменяющимся электрическим и магнитным полями было выяснено, что эти поля не могут существовать независимо друг от друга.

Действительно, вокруг неподвижного заряда возникает лишь электрическое поле (рис. 4.1.1), тогда как вокруг движущегося заряда (значит, вокруг электрического тока) одновременно возникают и электрическое, и магнитное поля (рис. 4.1.2). Однако понятие «неподвижный заряд» является относительным понятием, так как во Вселенной не существует неподвижной материи. Следовательно, в пространстве всегда возникают переменные и электрическое, и магнитное поля.

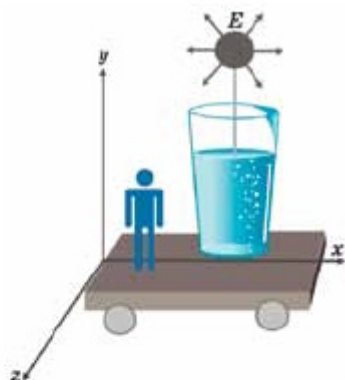


Рис. 4.1.1. Неподвижный заряд возбуждает только электрическое поле

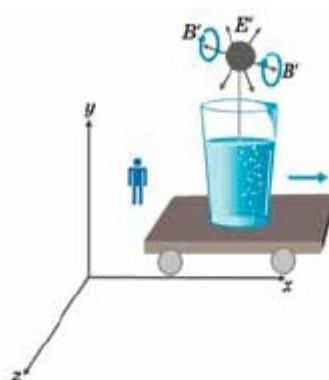


Рис. 4.1.2. Движущийся заряд возбуждает как электрическое, так и магнитное поле

Таким образом, электрические и магнитные поля представляют собой картину единого электромагнитного поля.

Электромагнитным полем называется особая форма материи, представленная неразрывным единством переменных электрического и магнитного полей, посредством которой осуществляется взаимодействие заряженных частиц.

В электромагнитном поле происходят взаимообусловленные колебания напряженности \vec{E} переменного электрического поля и индуктивности \vec{B} переменного магнитного поля (рис. 4.1.3). Взаимосвязанные колебания этих полей называются *электромагнитными колебаниями*, которые распространяются в пространстве в виде *электромагнитных волн*.

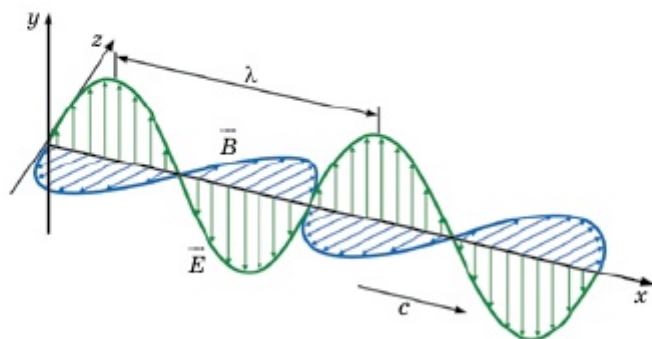


Рис. 4.1.3. График колебаний векторов электромагнитного поля

2. Электромагнитными волнами называются электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью $c \approx 300\,000$ км/с.

Не надо думать, что электромагнитная волна, показанная на рис. 4.1.3, подобно волне на поверхности воды представляет собой возмущение какой-либо среды. На рисунке изображены в некотором масштабе векторы \vec{E} и \vec{B} в различных точках пространства. В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания полей. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания происходят с различными фазами.

Колебания векторов \vec{E} и \vec{B} в любой точке совпадают по фазе. Расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть *длина волны* λ .

Направления колеблющихся векторов напряженности электрического поля и индукции магнитного поля перпендикулярны к направлению распространения волны. Таким образом, векторы \vec{E} и \vec{B} в электромагнитной волне перпендикулярны не только друг другу, но и перпендикулярны направлению распространения волны, т.е. направлению вектора скорости волны c . Следовательно, электромагнитные волны являются поперечными.

Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т.е. что они движутся с ускорением. *Наличие ускорения – главное условие излучения электромагнитных волн.* Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом быстром изменении его

скорости. Интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Возникновение и самостоятельное распространение электромагнитной волны наглядно можно представить себе следующим образом. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля подобно развевающемуся шлейфу сопровождают частицу. При ускорении частицы обнаруживается присущая электромагнитному полю инертность, вследствие чего поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля, переносимая волной, меняется периодически в пространстве с изменением векторов \vec{E} и \vec{B} . Бегущая волна несет с собой энергию, перемещающуюся со скоростью c вдоль направления распространения волны.

3. Экспериментальное обнаружение электромагнитных волн. Дж. Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн. Однако он не дождался их экспериментального обнаружения. Лишь через 8 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Г. Герцем.

Для экспериментального обнаружения электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты.

Именно при этом условии напряженность электрического поля \vec{E} и индукция магнитного поля \vec{B} будут меняться быстро.

Колебания высокой частоты, значительно превышающей частоту промышленного тока (50 Гц), можно получить с помощью **колебательного контура**, частота колебаний которого определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.1)$$

Однако большая частота электромагнитных колебаний еще не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. В обычном **закрытом контуре** почти все магнитное поле сосредоточено внутри катушки, а электрическое – внутри конденсатора. Вдали от контура электромагнитного поля практически нет. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны. Интенсивную электромагнитную волну излучает так называемый **открытый колебательный контур**.

В 1887 году для получения электромагнитных волн Г. Герц продемонстрировал простое устройство, впоследствии названное **вибратором Герца**. Это устройство представляет собой **открытый колебательный контур**.

Для возбуждения колебаний в таком контуре во времена Герца поступали следующим образом. Провод разрезали посередине так, чтобы остался небольшой воздушный промежуток, называемый искровым. Обе части проводника

заряжали до высокой разности потенциалов. Когда разность потенциалов (т.е. напряжение $U = \varphi_1 - \varphi_2$) превышала некоторое предельное значение, проскакивала искра (рис. 4.1.4), цепь замыкалась и в открытом контуре возникали колебания.

Колебания в открытом контуре затухают по двум причинам: во-первых, вследствие наличия у контура активного сопротивления, во-вторых, из-за того, что вибратор излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. После того как колебания прекратятся, оба проводника вновь заряжаются от источника до наступления пробоя искрового промежутка, и все повторяется сначала.

В настоящее время для получения незатухающих колебаний в открытом колебательном контуре его связывают индуктивно с колебательным контуром генератора на транзисторе или с генераторами других типов.

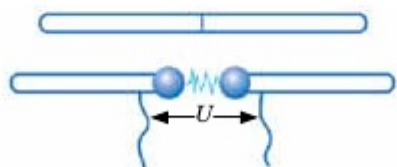


Рис. 4.1.4. Искровой промежуток вибратора

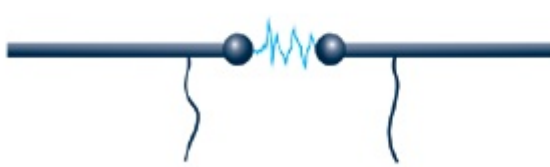


Рис. 4.1.5. Колебание (искра) в резонаторе

Электромагнитные волны регистрировались Герцем с помощью приемного вибратора (резонатора), представляющего собой такое же устройство (рис. 4.1.5), как и излучающий вибратор. Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приемном вибраторе возбуждаются колебания тока. Если собственная частота приемного вибратора совпадает с частотой электромагнитной волны, наблюдается резонанс. Колебания в резонаторе происходят с большой амплитудой при расположении его параллельно излучающему вибратору. Герц обнаружил эти колебания, наблюдая искорки в очень маленьком промежутке между проводниками приемного вибратора.

Герц не только получил электромагнитные волны, но и обнаружил, что они ведут себя подобно другим видам волн. В частности, он наблюдал отражение электромагнитных волн от металлического листа и сложение волн. При сложении волны, идущей от вибратора, с волной, отраженной от металлического листа, образуются максимумы и минимумы колебаний. Перемещая резонатор, можно найти положения максимумов и определить длину волны.

В опытах Герца длина волны составляла несколько десятков сантиметров. Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц смог определить **скорость распространения электромагнитной волны** по формуле $v = \lambda \nu$. Она оказалась приблизительно равной скорости света:

$$c \approx 300\,000 \text{ км/с.}$$

Опыты Герца блестяще подтвердили предсказания Максвелла.

4. Плотность потока электромагнитного излучения. Излученные электромагнитные волны несут с собой энергию. Энергетические характеристики излучения играют важную роль, так как определяют воздействие источников излучения на его приемники. Мы познакомимся с плотностью потока излучения, которая является одной из главных характеристик излучения.

Рассмотрим поверхность площадью S , через которую электромагнитные волны переносят энергию. На *рис. 4.1.6* изображена такая площадка; прямые линии указывают направление распространения электромагнитных волн. *Эти лучи – линии, перпендикулярные поверхностям, во всех точках которых колебания происходят в одинаковых фазах. Такие поверхности называются волновыми поверхностями.*

Плотностью потока электромагнитного излучения I называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (4.2)$$

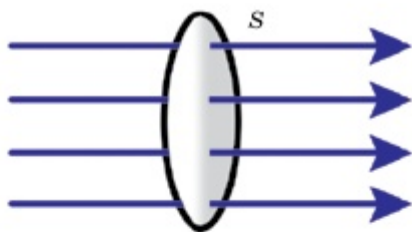


Рис. 4.1.6. Поток излучения

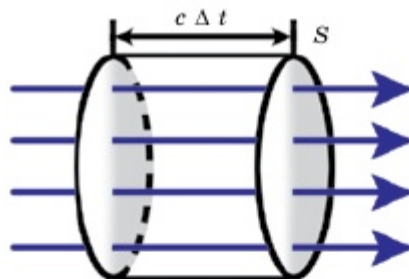


Рис. 4.1.7. Волновой цилиндр

Фактически это мощность электромагнитного излучения (энергия в единицу времени), проходящая через единицу площади поверхности. Плотность потока излучения в СИ выражают в *ваттах на квадратный метр* ($Вт/м^2$). Иногда эту величину называют *интенсивностью волны*.

Выразим I через плотность электромагнитной энергии w и скорость ее распространения c . Выберем поверхность площадью S , перпендикулярную лучам, и построим на ней как на основании цилиндр с образующей $c \Delta t$ (*рис. 4.1.7*). Объем цилиндра $\Delta V = S c \Delta t$. Энергия ΔW электромагнитного поля внутри цилиндра равна произведению плотности w энергии в нем на объем: $\Delta W = w c \Delta t S$. Вся эта

энергия за время Δt пройдет через правое основание цилиндра. Поэтому из (4.2) получаем:

$$I = \frac{wc\Delta tS}{S\Delta t} = wc, \quad (4.3)$$

т.е. плотность потока излучения равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения.

5. Найдем зависимость плотности потока излучения от расстояния до источника. Для этого воспользуемся понятием *точечный источник*.

Источник излучения считается точечным, если его размеры много меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Кроме того, предполагается, что такой источник посылает электромагнитные волны по всем направлениям с одинаковой интенсивностью. *Точечный источник* – такая же идеализация реальных источников, как и другие модели, принятые в физике: материальная точка, идеальный газ и т.д.

Звезды излучают свет, т.е. электромагнитные волны. Так как расстояния до звезд в огромное число раз превышают их размеры, то именно звезды представляют собой лучшую модель точечных источников.

Энергия точечного источника, которую несут с собой электромагнитные волны, с течением времени распределяется по все большей и большей поверхности. Поэтому энергия, переносимая через единичную площадку за единицу времени, т.е. плотность потока излучения, уменьшается по мере удаления от источника.

Выяснить зависимость плотности потока излучения от расстояния до источника можно, поместив точечный источник в центр сферы радиусом R .

Площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2$. Если считать, что источник по всем направлениям за время Δt излучает энергию ΔW , то

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}. \quad (4.4)$$

Плотность потока излучения от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.

6. Зависимость плотности потока излучения от частоты. Излучение электромагнитных волн происходит при ускоренном движении заряженных частиц. Напряженность электрического поля и магнитная индукция электромагнитной волны пропорциональны ускорению a излучающих частиц. Ускорение при гармонических колебаниях пропорционально квадрату частоты. Поэтому напряженность электрического поля и магнитная индукция пропорциональны квадрату частоты:

$$E \sim a \sim \omega^2, \quad B \sim a \sim \omega^2. \quad (4.5)$$

Плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности поля. Энергия магнитного поля, как можно показать, пропорциональна квадрату магнитной индукции. Полная плотность энергии электромагнитного поля равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей. Поэтому плотность потока излучения I с учетом (4.3) пропорциональна:

$$I \sim \omega \sim (E^2 + B^2). \quad (4.6)$$

Так как согласно (4.5) $E \sim \omega^2$ и $B \sim \omega^2$, то

$$I \sim \omega^4. \quad (4.7)$$

Плотность потока излучения пропорциональна четвертой степени частоты.

При увеличении частоты колебаний заряженных частиц в два раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! Поэтому в антеннах радиостанций возбуждаются колебания больших частот: от десятков тысяч до десятков миллионов герц. Промышленные переменные токи частотой 50 Гц практически не излучают.

Электромагнитные волны переносят энергию. Плотность потока излучения (интенсивность волны) равна произведению плотности энергии на скорость ее распространения. Интенсивность волны пропорциональна четвертой степени частоты и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.



Вопросы

1. Что является источником электрического и магнитного полей? Какое поле называется электромагнитным?
2. Какой процесс называется электромагнитной волной? Каковы основные условия для формирования электромагнитных волн?
3. Кто теоретически обосновал существование электромагнитных волн в природе? Какова его главная заслуга?
4. Как осуществилось экспериментальное подтверждение существования электромагнитных волн?
5. От каких параметров зависит частота колебательного контура и по какой формуле ее определяют?
6. Какую величину называют плотностью потока электромагнитной волны?
7. Как выражается зависимость плотности потока электромагнитной волны от расстояния до источника колебания и от его частоты?



§ 4.2

Свойства электромагнитных волн

1. Электромагнитные волны поглощаются, отражаются и преломляются подобно всем другим видам волн, наблюдать эти явления нетрудно.

Современные радиотехнические устройства позволяют провести очень наглядные опыты по наблюдению свойств электромагнитных волн.

При этом лучше всего пользоваться волнами сантиметрового диапазона, так как они излучаются специальным генератором сверхвысокой частоты. Электрические колебания генератора модулируют звуковой частотой. Принятый сигнал после детектирования подается на громкоговоритель. Общий вид такой установки изображен на *рис. 4.2.1*. Электромагнитные волны излучаются рупорной антенной в направлении оси рупора. Приемная антенна в виде такого же рупора улавливает волны, которые распространяются вдоль его оси.



Рис. 4.2.1. Приборы для исследования свойств электромагнитных волн

Поглощение электромагнитных волн. Располагают рупоры друг против друга и, добившись хорошей слышимости звука в громкоговорителе, помещают между рупорами различные диэлектрические тела. При этом замечают уменьшение громкости.

Отражение электромагнитных волн. Если диэлектрик заменить металлической пластиной, то звук перестанет быть слышимым. Волны не достигают приемника вследствие отражения. Отражение происходит под углом, равным углу падения, как и в случае световых и механических волн. Чтобы убедиться в этом, рупоры располагают под одинаковыми углами к большому металлическому листу (*рис. 4.2.2*). Звук исчезает, если убрать лист или повернуть его.

Преломление электромагнитных волн. Электромагнитные волны изменяют свое направление (преломляются) на границе диэлектрика. Это можно обнаружить



Рис. 4.2.2. Отражение электромагнитных волн

с помощью большой треугольной призмы из парафина. Рупоры располагают под углом друг к другу, как и при демонстрации отражения. Металлический лист заменяют призмой. Убирая призму или поворачивая ее, наблюдают исчезновение звука.

2. Поперечность электромагнитных волн. Электромагнитные волны являются



Генрих Герц (1857–1894) – немецкий физик, впервые экспериментально доказавший существование электромагнитных волн. Исследуя электромагнитные волны, Герц установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн. Работы Герца послужили экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля и, в частности, электромагнитной теории света. Уравнения Максвелла в современной форме были записаны Герцем.

В 1886 г. Герц впервые наблюдал фотоэффект.

поперечными. Это означает, что векторы \vec{E} и \vec{B} электромагнитного поля волны перпендикулярны к направлению ее распространения. Колебания напряженности электрического поля волны, выходящей из рупора, происходят в определенной плоскости, а колебания вектора магнитной индукции – в плоскости, ей перпендикулярной. Волны с определенным направлением колебаний называются поляризованными. На рис. 4.1.3 изображена именно поляризованная волна. Приемный рупор с детектором принимает только поляризованную в определенном направлении волну.

Это можно обнаружить, повернув передающий или приемный рупор на 90° . Звук при этом исчезает.

3. 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 двумя электромагнитными волнами, колеблющимися в одинаковой фазе, в результате интерференции *амплитуда результирующего колебания будет максимальной при выполнении условия:*

$$\Delta l = k\lambda, \quad (4.8)$$

здесь $\Delta l = l_2 - l_1$ – разность хода волн; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Если разность хода волн равна:

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (4.9)$$

то при выполнении этого условия амплитуда результирующего колебания в этой точке будет минимальной. Для наблюдения интерференции электромагнитных волн рупоры передающей и принимающей антенн направим противоположно друг другу и начнем двигать горизонтально расположенный между ними металлический лист сверху вниз. Мы услышим то усиливающийся, то ослабевающий звук. 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 выполняется (максимум или минимум), звук усиливается или ослабевает.

4. 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 можно наблюдать на установке, показанной на *рис. 4.2.3*. Между генератором сверхвысоких частот и приемником находится металлический экран с узкой щелью, ширина которой сравнима с длиной электромагнитной волны: $d \leq \lambda$. Изменяя местоположение приемника, можно заметить чередования максимумов и минимумов амплитуды колебания, что возможно лишь в результате дифракции волн, огибающих края щели. Это означает, что электромагнитные волны огибают препятствие. При $d \gg \lambda$ не происходит никакого изменения амплитуды колебания. *Следовательно, дифракция наблюдается только при выполнении условия: $d \leq \lambda$.*

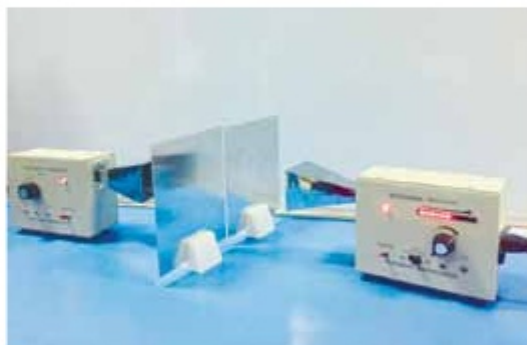


Рис. 4.2.3. Дифракция электромагнитных волн



Вопросы

1. Каковы основные свойства электромагнитных волн?
2. Что означает поглощение и отражение электромагнитных волн?
3. Что означает преломление электромагнитных волн?
4. Какие явления называются интерференцией и дифракцией электромагнитных волн?
5. Как определяются максимумы и минимумы интерференции волн? Какое условие требуется для наблюдения дифракции волн?



Задание (теоретическое исследование)

1. Закрытый колебательный контур превращен в открытый. Почему при этом свободные электрические колебания в контуре быстрее затухают?
2. Как изменится период свободных электрических колебаний в колебательном контуре, если индуктивность катушки и емкость конденсатора увеличиваются в два раза?
3. Индуктивность контура уменьшается в три раза. Как изменяется частота?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Мощность импульса радиолокационной станции $P = 100$ кВт. Найдите максимальную напряженность электрического поля волны в точке, где площадь поперечного сечения конуса излучения $S = 2,3$ км².

<p>Д а н о: $P = 100$ кВт $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м $\epsilon = 1$ $c = 3 \cdot 10^8$ м/с $S = 2,3$ км² $E_m = ?$</p>	<p>С И $1 \cdot 10^5$ Вт $2,3 \cdot 10^6$ м²</p>	<p>Р е ш е н и е: Мощность импульса P связана с энергией волны W соотношением: $P = \frac{W}{t},$ где t – время излучения.</p>
--	--	---

С другой стороны, интенсивность, т.е. плотность потока излучения:

$$I = \frac{W}{St} \text{ или с учетом (1) } I = \frac{P}{S}. \quad (2)$$

Теперь выразим интенсивность I через объемную плотность энергии волны $w_{\text{эл.м.}}$:

$$I = w_{\text{эл.м.}} \cdot c,$$

где $w_{\text{эл.м.}} = \epsilon_0 \epsilon E_m^2$, поэтому $I = \epsilon_0 \epsilon E_m^2 c$. (3)

Нам осталось приравнять (2) и (3) и из полученного равенства определить напряженность E_m :

$$\frac{P}{S} = \epsilon_0 \epsilon E_m^2 c, \text{ откуда } E_m = \sqrt{\frac{P}{\epsilon_0 \epsilon c S}}.$$

$$E_m = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2,3 \cdot 10^6}} = 4 \text{ (В/м)}.$$

О т в е т: $E_m = 4 \text{ (В/м)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 4.2.1. Максимальная напряженность электрического поля электромагнитной волны не должна быть более 5 В/м. Чему равна в этом случае интенсивность электромагнитного излучения? (Ответ: $66 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$.)
- 4.2.2. Плотность энергии электромагнитной волны равна $4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж/м}^3$. Найдите плотность потока излучения (интенсивность волны). (Ответ: 12 мВт/м^2 .)
- 4.2.3. Плотность потока излучения равна 6 мВт/м^2 . Найдите плотность энергии электромагнитной волны. (Ответ: $2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж/м}^3$.)
- 4.2.4. Объемная плотность энергии электромагнитной волны равна $2 \cdot 10^{-16} \text{ Дж/см}^3$. Найдите плотность потока излучения (интенсивность волны). (Ответ: $0,06 \text{ Вт/м}^2$.)

Уровень В

- 4.2.5. На расстоянии 300 м от телевизионной башни Алматы плотность потока электромагнитного излучения (интенсивность) максимальна: 40 мВт/м^2 . Найдите плотность потока излучения на расстоянии уверенного приема 120 км. (Ответ: $0,25 \text{ мкВт/м}^2$.)
- 4.2.6. Как увеличить энергию, затрачиваемую в колебательном контуре на излучение в виде электромагнитных волн? Обоснуйте ответ.
- 4.2.7. В каком случае электромагнитная волна передает максимум энергии расположенному на ее пути колебательному контуру? Обоснуйте ответ.

Уровень С

- 4.2.8. Звуковая волна в воздухе и электромагнитная волна в воздухе имеют одинаковую длину 10 см. Опишите характер обеих волн (слышимая, неслышимая; свет, невидимая радиоволна и т.д.). Почему две волны одинаковой длины имеют столь разные свойства?
- 4.2.9. На рис. 4.2.4 изображен «моментальный снимок» электромагнитной волны. Векторы \vec{E} и \vec{B} в волне взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны. Определить направление распространения волны можно по правилу буравчика. Для этого рукоятку правого буравчика надо вращать от вектора \vec{E} к вектору \vec{B} . Определите, в каком направлении распространяется волна.

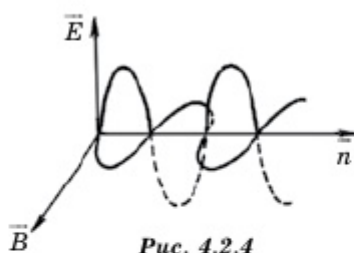


Рис. 4.2.4

4.2.10. Какие вещества лучше отражают электромагнитные волны: металлы или диэлектрики? (Ответ: металлы.) Обоснуйте ответ.

§ 4.3

Радиосвязь. Детекторный радиоприемник

1. Опыты Герца, описание которых появилось в 1888 г., заинтересовали физиков всего мира. Ученые стали искать пути усовершенствования излучателя и приемника электромагнитных волн. Преподаватель офицерских курсов в Кронштадте А. С. Попов одним из первых в России занялся изучением электромагнитных волн. Начав с воспроизведения опытов Герца, он затем использовал более надежный и чувствительный способ регистрации электромагнитных волн.

В качестве детали, непосредственно «чувствующей» электромагнитные волны, А. С. Попов использовал так называемый *когерер* (рис. 4.3.1). Данный прибор представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. В трубке помещены мелкие металлические опилки. Действие прибора основано на влиянии электрических разрядов на металлические порошки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением, так как опилки плохо контактируют друг с другом. Пришедшая электромагнитная волна создает в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивают мельчайшие искры, которые спекают опилки. В результате сопротивление когерера резко падает. Снова вернуть прибору большое сопротивление можно, если встряхнуть его. Чтобы обеспечить автоматичность приема, необходимую для осуществления беспроводной связи, А. С. Попов использовал звонковое устройство для встряхивания когерера после приема сигнала. Цепь электрического звонка замыкалась с помощью чувствительного реле в момент прихода электромагнитной волны. С окончанием приема волны работа звонка сразу прекращалась, так как молоточек звонка ударял не только по звонковой чашечке, но и по когереру. С последним встряхиванием когерера аппарат был готов к приему новой волны. Схема приемника А. С. Попова приведена на рис. 4.3.1, взятом из его статьи в «Журнале Русского физико-химического общества».

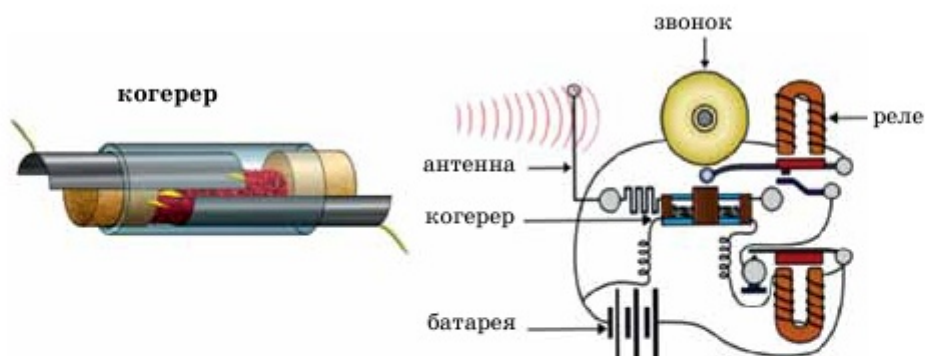


Рис. 4.3.1. Схема приемника А. С. Попова

Для повышения чувствительности аппарата А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко поднятому куску проволоки, создав *первую приемную антенну* для беспроволочной связи. Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего прибора, явившегося, по сути дела, первым в мире радиоприемником.

А. С. Попов продолжал совершенствовать приемную и передающую аппаратуры. Он ставил своей непосредственной задачей построить прибор для передачи сигналов на большие расстояния.

В Европе усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

2. Принцип радиосвязи заключается в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстро меняющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. *генератора незатухающих электромагнитных колебаний*.

Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов электромагнитных волн, стала возможной надежная и высококачественная *радиотелефонная связь* – передача речи или музыки с помощью электромагнитных волн.



Александр Степанович Попов (1859–1906) – русский физик, изобретатель радио. Убежденный в возможности связи без проводов с помощью электромагнитных волн, А. С. Попов построил первый в мире радиоприемник, применив в его схеме чувствительный элемент – когерер. Во время опытов по радиосвязи с помощью приборов Попова было впервые обнаружено отражение радиоволн от кораблей.

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн. Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что колебания звуковой частоты представляют собой сравнительно медленные колебания, а электромагнитные волны с такой низкой (звуковой) частотой не распространяются (точнее, электромагнитные волны со звуковой частотой практически не существуют).

3. Для передачи звука высокочастотные колебания изменяют, или, как говорят, **модулируют**, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Примером модуляции является изменение по определенному закону амплитуды, частоты или фазы гармонических колебаний с целью внесения в колебательный процесс требуемой информации.

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является *амплитудная модуляция*.

Амплитудная модуляция – это изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

На *рис. 4.3.2* показаны три графика: а) график колебаний высокой частоты, которую называют несущей частотой; б) график колебаний звуковой частоты, т.е. модулирующих колебаний; в) график модулированных по амплитуде высокочастотных колебаний.

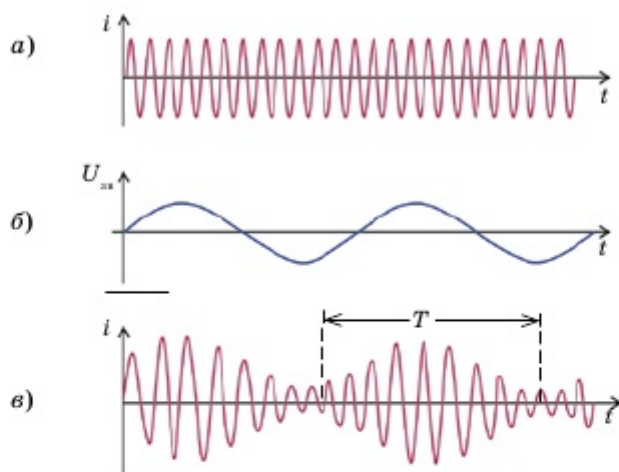


Рис. 4.3.2. Графики колебаний: а) график колебаний высокой частоты; б) график колебаний звуковой частоты; в) график модулированных по амплитуде высокочастотных колебаний

Основные принципы радиосвязи представлены в виде блок-схемы на *рис. 4.3.3*. **Амплитудная модуляция** высокочастотных колебаний, используемая в радиосвязи, достигается специальным воздействием на генератор незатухающих колебаний. В частности, модуляцию можно осуществить, изменяя на колебательном

контуре напряжение, создаваемое источником. Чем больше напряжение на контуре генератора, тем больше энергии поступает за период от источника в контур. Это приводит к увеличению амплитуды колебаний в контуре. При уменьшении напряжения энергия, поступающая в контур, также уменьшается. Поэтому уменьшается и амплитуда колебаний в контуре.

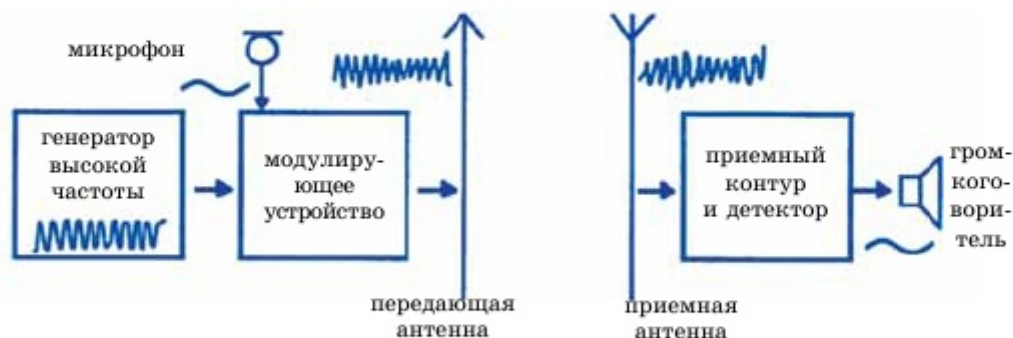


Рис. 4.3.3. Блок-схема радиосвязи

Если менять напряжение на контуре с частотой, много меньшей частоты колебаний, вырабатываемых генератором, то изменения амплитуды этих колебаний будут приблизительно прямо пропорциональны изменениям напряжения. Именно такая закономерная зависимость применяется для амплитудной модуляции. Так, например, в простом устройстве для осуществления амплитудной модуляции включают последовательно с источником постоянного напряжения дополнительный источник переменного напряжения низкой частоты. Этим источником может быть, например, вторичная обмотка трансформатора, если по его первичной обмотке протекает ток звуковой частоты (рис. 4.3.4). В результате амплитуда колебаний в колебательном контуре генератора будет изменяться в такт с изменениями напряжения на трансформаторе. Это и означает, что высокочастотные колебания модулируются по амплитуде низкочастотным сигналом.

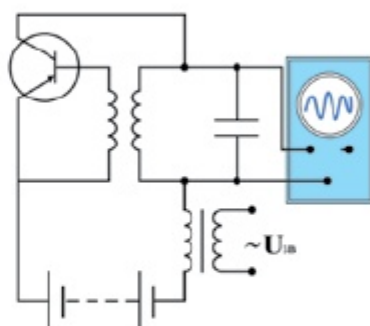


Рис. 4.3.4. Схема устройства для осуществления амплитудной модуляции

Временную развертку модулированных колебаний можно наблюдать непосредственно на экране осциллографа, если подать на него напряжение с колебательного контура.

Кроме амплитудной модуляции, в некоторых случаях применяют *частотную модуляцию*; в частотной модуляции осуществляется изменение частоты колебаний в соответствии с управляющим сигналом. Ее преимуществом является большая устойчивость по отношению к помехам.

Исходя из вышеперечисленного, можно дать следующее определение модуляции колебаний.

Модуляцией называется медленное по сравнению с периодом колебаний (рис. 4.3.2, в) изменение амплитуды или частоты волны по определенной закономерности.

При любом способе модуляция колебаний должна подчиняться следующей закономерности: *скорость изменения амплитуды или частоты должна быть достаточно малой, чтобы за период T колебания модулированный параметр почти не изменялся (рис. 4.3.2, в).*

4. Принятый приемником модулированный высокочастотный сигнал даже после усиления не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона или рупора громкоговорителя со звуковой частотой. Он может вызвать только высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. Поэтому в приемнике необходимо сначала из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты. Такой процесс преобразования сигнала называют *детектированием (или демодуляцией)*.

Детектированием (демодуляцией) называется преобразование электрических колебаний, в результате которого из высокочастотных колебаний выделяются колебания более низкой частоты.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью – детектором. Таким элементом может быть электронная лампа (вакуумный диод) или полупроводниковый диод.

Рассмотрим работу полупроводникового детектора. Пусть этот прибор включен в цепь последовательно с источником модулированных колебаний и нагрузкой (рис. 4.3.5). Ток в цепи будет течь преимущественно в одном направлении, отмеченном на рисунке стрелкой, так как сопротивление диода в прямом направлении много меньше, чем в обратном. Мы вообще можем пренебречь обратным током и считать, что диод обладает односторонней проводимостью с вольт-амперной характеристикой, представленной на рис. 4.3.6. В действительности такую характеристику диода приближенно можно представить в виде ломаной, состоящей из двух прямолинейных отрезков.

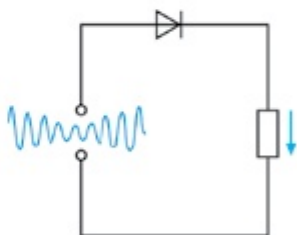


Рис. 4.3.5 Полупроводниковый диод в цепи с источником модулированных колебаний и нагрузкой

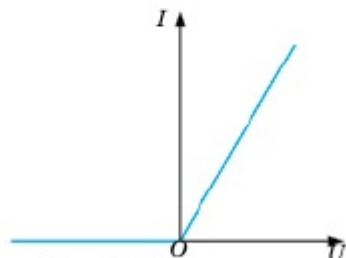


Рис. 4.3.6. Вольт-амперная характеристика диода

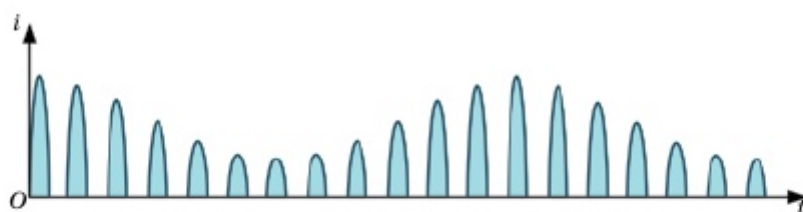


Рис. 4.3.7. График пульсирующего тока

В цепи с диодом (рис. 4.3.5) будет течь пульсирующий ток, график которого показан на рис. 4.3.7. Этот пульсирующий ток сглаживается с помощью фильтра. Простейший фильтр представляет собой конденсатор, присоединенный к нагрузке (рис. 4.3.8). Фильтр работает следующим образом. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть ответвляется в конденсатор, заряжая его. Разветвление тока уменьшает пульсации тока, проходящего через нагрузку. Зато в промежутке между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале

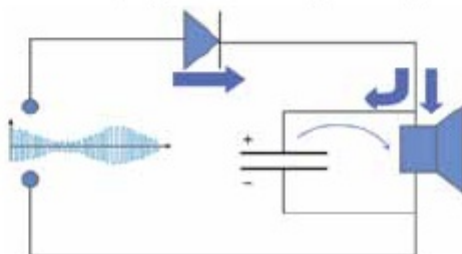


Рис. 4.3.8. Конденсатор, присоединенный к нагрузке, сглаживает пульсирующий ток

между импульсами ток через нагрузку течет в ту же сторону. Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор. В результате этого через нагрузку течет ток звуковой частоты (рис. 4.3.9), форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции (рис. 4.3.2, б).

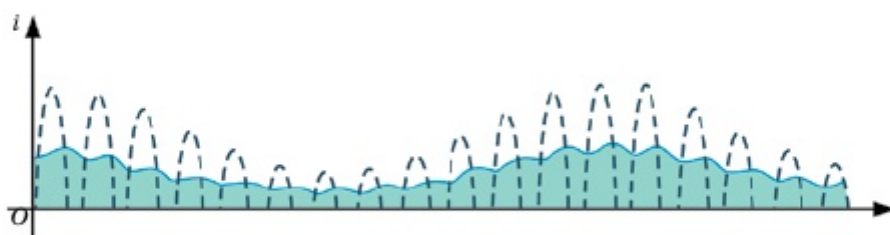


Рис. 4.3.9. Сглаженный ток звуковой частоты

Более сложные фильтры сглаживают небольшие высокочастотные пульсации, и колебания звуковой частоты происходят более плавно (рис. 4.3.9), чем это изображено на рис. 4.3.7.

5. Простейший радиоприемник. Простейший радиоприемник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, и присоединенной к контуру цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона (рис. 4.3.10).

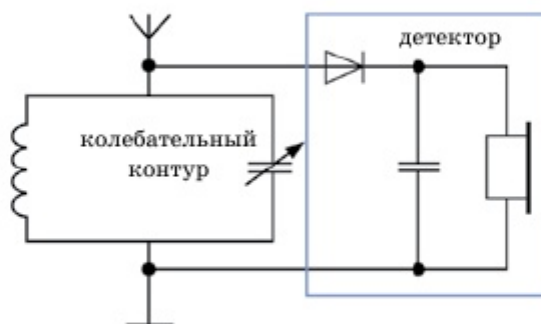


Рис. 4.3.10. Схема простейшего радиоприемника

В колебательном контуре радиоволной возбуждаются модулированные колебания. Катушки телефонов играют роль нагрузки. Через них течет ток звуковой частоты. Небольшие пульсации высокой частоты не сказываются заметно на колебаниях мембраны и не воспринимаются на слух.

Модулировать можно амплитуду или частоту колебаний. Проще всего осуществляется амплитудная модуляция.

При детектировании переменный ток выпрямляется и высокочастотные пульсации сглаживаются фильтром.

6. На *распространение радиоволн* сильно влияют форма и физические свойства земной поверхности, а также состояние атмосферы.

Особенно существенное влияние на распространение радиоволн оказывают слои ионизированного газа в верхних частях атмосферы на высоте 100–300 км над поверхностью Земли. Эти слои называют ионосферой. Ионизация воздуха верхних слоев атмосферы вызывается электромагнитным излучением Солнца и потоком заряженных частиц, излучаемых им.

Проводящая электрический ток ионосфера отражает радиоволны с длиной волны $\lambda > 10$ м, как обычная металлическая пластина. Однако способность ионосферы отражать и поглощать радиоволны существенно меняется в зависимости от времени суток и времени года.

Устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами на земной поверхности вне прямой видимости оказывается возможной благодаря отражению волн от ионосферы и способности радиоволн огибать выпуклую земную поверхность. Это огибание выражено тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому радиосвязь на больших расстояниях за счет огибания волнами Земли оказывается возможной лишь при длинах волн, значительно превышающих 100 м (средние и длинные волны).

Короткие радиоволны (диапазон длин волн от 10 до 100 м) распространяются на большие расстояния только за счет многократных отражений от ионосферы

и поверхности Земли (рис. 4.3.11). Именно с помощью коротких волн можно осуществить радиосвязь на любых расстояниях между радиостанциями на Земле.

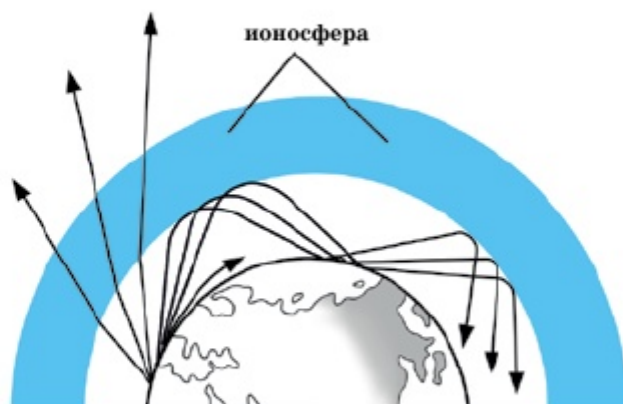


Рис. 4.3.11. Отражение коротких волн в ионосфере

Длинные радиоволны для этой цели менее пригодны из-за значительного поглощения поверхностными слоями Земли и ионосферой. Все же наиболее надежная радиосвязь на ограниченных расстояниях при достаточной мощности передающей радиостанции обеспечивается на длинных волнах.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости, а также для связи с космическими кораблями.

Распространение радиоволн существенно зависит от их длины волны. Короткие волны ($\lambda \sim 10\text{--}100$ м) многократно отражаются от ионосферы и поверхности Земли. Длинные волны ($\lambda > 100$ м) «скользят» вдоль поверхности Земли. Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу.

7. В современной технике отражение радиоволн различными препятствиями находит широкое применение. Высокочувствительные приемники улавливают и усиливают отраженный сигнал с целью получить информацию о том, где находится тот предмет, от которого отразилась волна.

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией.

Радиолокационная установка – радиолокатор (или радар) – состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты ($10^9 - 10^{11}$ Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена

так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях при сложении волн происходит полное или частичное их взаимное гашение. Отраженная волна улавливается той же излучающей антенной либо другой, тоже остронаправленной приемной антенной. Ярко выраженная направленность излучения позволяет говорить о «луче» радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами.

Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния R производится путем измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна, то $R = \frac{ct}{2}$.

Вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Поэтому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов (10^{12}) раз. Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время посылки импульса передатчиком.

В момент посылки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности (рис. 4.3.12). Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, пропорционально расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

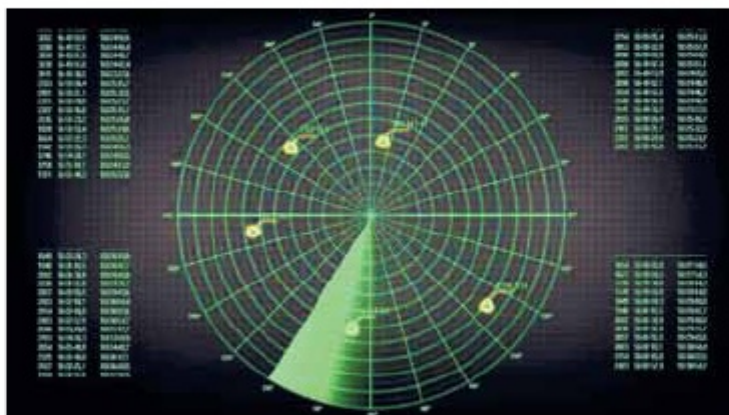


Рис. 4.3.12. Экран радиолокатора

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сотен километров. На их работу мало влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолетами. Наземная служба (рис. 4.3.13) передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны. Оператор имеет перед глазами радиолокационную карту местности.

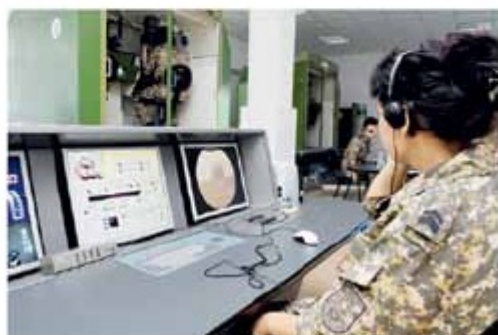


Рис. 4.3.13. Наземная радиолокационная служба

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за облаками. Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1949 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. советскими учеными произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период вращения планеты вокруг своей оси. В настоящее время осуществляется локация и других планет Солнечной системы.

28 апреля 2017 года Казахстан и Франция открыли совместное предприятие по производству радиолокационного оборудования «Groud Master 400» (казахстанский индекс – «NUR»). Радиолокационная техника в Казахстане является одной из лучших в мире по своим тактическим характеристикам, предназначена для радиолокационных исследований и контроля воздушного пространства.



Вопросы

1. Когда была осуществлена первая радиосвязь? Кто изобрел радио?
2. На основе каких принципов осуществляется радиосвязь? Что означает модуляция?
3. В чем заключается физический смысл амплитудной модуляции?
4. Для чего необходимо детектирование колебаний?
5. Какова схема простейшего радиоприемника? Как можно объяснить работу радиоприемника на основе этой схемы?



6. Как классифицируются радиоволны? С какой скоростью они распространяются? Каковы их отличительные черты?
7. На каких свойствах радиоволн основан принцип радиолокации? Где и для каких целей применяется радиолокация?
8. Инспекторы дорожно-патрульной службы с помощью локатора определяют скорость движущихся автомобилей. На каком физическом принципе устроен данный аппарат?



Задание (теоретический анализ)

Почему увеличение в два раза дальности радиосвязи с космическими кораблями требует возрастания мощности передатчика в 16 раз? Источник радиоволн точечный, а поглощение энергии средой пренебрежимо мало.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Радиолокатор работает на волне 15 см и дает 4000 импульсов в 1 с. Длительность каждого импульса составляет 2 мкс. Сколько колебаний содержится в каждом импульсе и какова глубина разведки локатора?

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$t = 1 \text{ с}$		Период волн, изучаемых локатором,
$T_n = 2 \text{ мкс}$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$	$T_n = \frac{\lambda}{c},$
$\lambda = 15 \text{ см}$	$0,15 \text{ м}$	где λ – длина волны. Следовательно, число колебаний
$N = 4000$		в импульсе длительностью T_n :
$N_n = ?$		$N_n = \frac{T_n}{T_n} = \frac{T_n c}{\lambda}.$
$L = ?$		

Глубину разведки находим из формул:

$$N = \frac{tc}{2L}; \quad L = \frac{tc}{2N}.$$

Здесь $t = 1 \text{ с}$, N – число импульсов за время t :

$$N_n = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,15} = 4000;$$

$$L = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 4000} = 37,5 \cdot 10^3 \text{ (м)}.$$

О т в е т: $N_n = 4000$; $L = 37,5 \cdot 10^3 \text{ (м)}$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 4.3.1. Чему равно расстояние до самолета, если посланный наземным радиолокатором сигнал после отражения от самолета возвратился через $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$? (Ответ: 30 км.)

- 4.3.2. Радиолокатор посылает 2000 импульсов в секунду. Определите дальность действия этого радиолокатора. (*Ответ: 75 км.*)
- 4.3.3. На какой частоте работает радиопередатчик, излучающий волну длиной 30 м? (*Ответ: 10^7 Гц.*)

Уровень В

- 4.3.4. Определите дальность действия радиолокатора, если время развертки в электронно-лучевой трубке составляет 1000 мкс. (*Ответ: 150 км.*)
- 4.3.5. Сигнал радиолокатора возвратился от объекта за $3 \cdot 10^{-4}$ с. Каково расстояние до объекта? (*Ответ: 45 км.*)
- 4.3.6. Чему равна длина волны, излучаемой передатчиком, если период колебаний равен $0,2 \cdot 10^{-6}$ с? (*Ответ: 60 м.*)

Уровень С

- 4.3.7. Радиосигнал, посланный на Луну, отразился и был принят на Земле через 2,5 с после отправки. Такой же сигнал, посланный на Венеру, был принят через 2,5 мин. Определите расстояние от Земли до Луны и от Земли до Венеры во время локации. (*Ответ: $3,75 \cdot 10^8$ м; $225 \cdot 10^8$ м.*)
- 4.3.8. Радиоприемник может принимать радиоволны в диапазоне от 3 до 50 МГц. Индуктивность катушки его колебательного контура может изменяться от 2 до 5 мкГн. В каких пределах изменяется емкость конденсатора колебательного контура этого радиоприемника? (*Ответ: от 2 пФ до 1,4 нФ.*)
- 4.3.9. Определите период и частоту радиопередатчика, работающего на волне длиной 30 м. (*Ответ: 10^{-7} с; 10 МГц.*)
- 4.3.10. Определите частоту и длину волны радиопередатчика, если период его электрических колебаний равен 10^{-6} с. (*Ответ: 1 МГц; 300 м.*)

§ 4.4

Аналого-цифровые преобразователи. Каналы связи

1. Аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (*с англ. Analog-to-digital-converter, ADC*) называют устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал, т.е. в «дискретный код». Обратное преобразование сигнала осуществляется с помощью *цифро-аналогового преобразователя (ЦАП)*. Как правило, АЦП преобразует напряжение в двоичный цифровой код. В таких преобразователях используются аналоговые и цифровые, а также другие сигналы. (*рис. 4.4.1*).

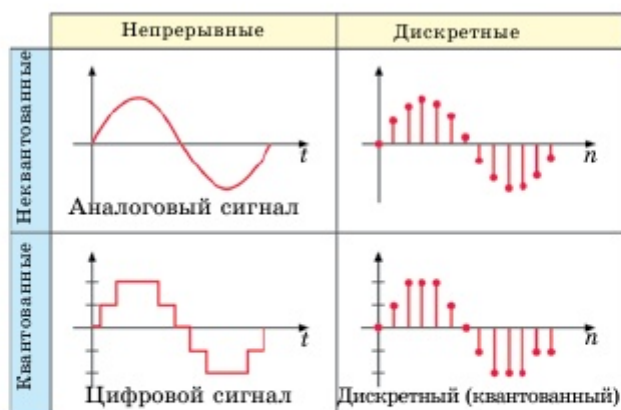


Рис. 4.4.1. Виды сигналов

Аналоговый сигнал – сигнал данных, у которого каждый из представляющих параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Аналоговые сигналы часто используют для представления непрерывно изменяющихся физических величин. Например, аналоговый электрический сигнал, снимаемый с термопары, несет информацию об изменении температуры, сигнал с микрофона – о быстрых изменениях давления в звуковой волне. Аналоговое телевидение – один из видов телевидения.

Дискретный сигнал (от лат. *discretus* – «прерывистый», «разделенный») – сигнал, который является прерывистым (в отличие от аналогового) и который изменяется во времени и принимает любое значение из списка возможных значений. Список возможных значений может быть непрерывным или квантованным (последовательный ряд отдельных значений).

Существует путаница между понятиями дискретного и цифрового сигналов. Часто цифровой сигнал называют дискретным, потому что он состоит из дискретных (отдельных) частей (samples), несмотря на то, что цифровой сигнал не является прерывистым сигналом.

Дискретность применяется в вычислительной технике для пакетной передачи данных.

Цифровой сигнал – сигнал, который можно представить в виде последовательности дискретных (цифровых) значений. В наше время наиболее распространены двоичные цифровые сигналы (битовый поток) в связи с простотой кодирования и использованием в двоичной электронике. Для передачи цифрового сигнала по аналоговым каналам (например, электрическим или радиоканалам) используются различные виды манипуляции (модуляции).

Важным свойством цифрового сигнала, определившим его доминирование в современных системах связи, является способность к полной регенерации в ретрансляторе (до некоторого порогового отношения сигнал/шум). Когда в ретранслятор приходит сигнал с небольшими помехами, он преобразуется в цифровую

форму, и ретранслятор заново формирует сигнал, полностью убирая искажения. Аналоговый же сигнал удастся усилить лишь вместе с наложившимися на него шумами.

С другой стороны, если цифровой сигнал приходит с большими помехами, восстановить его невозможно, в то время как из искаженного аналогового сигнала можно извлечь часть информации, хотя и с трудом. Если сравнивать сотовую связь аналогового формата (AMPS, NMT) с цифровой связью (GSM, CDMA), то при помехах на цифровой линии из разговора выпадают порой целые слова, а на аналоговой можно вести разговор, хотя и с помехами.

Выход из данной ситуации – чаще регенерировать цифровой сигнал, вставляя регенераторы в разрыв линии связи, или уменьшать длину линии связи (например, уменьшать расстояние от сотового телефона до базовой станции, что достигается более частым расположением базовых станций на местности).

Использование в цифровых системах алгоритмов проверки и восстановления цифровой информации позволяет существенно увеличить надежность передачи информации.

Основное различие между аналоговым и цифровым сигналами заключается в структуре передаваемого сигнала. Аналоговые сигналы представляют собой непрерывный поток колебаний с изменяющимися амплитудой и частотой. Цифровой сигнал представляет собой дискретные колебания, значения которых зависят от передающей среды.

2. Радиоволны используются не только для передачи звука, но и для передачи изображения (телевидение).

Принцип передачи изображений на расстояние состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Затем этими сигналами модулируют колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приемнике производится обратное преобразование (демодуляция). Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение. Для передачи движения используют принцип кино: изображения движущегося объекта (кадры) передают десятки раз в секунду (в нашем телевидении 50 раз).

Телевизионные радиосигналы могут быть только в диапазоне ультракоротких (метровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики чаще и поднимать их антенны выше. Высота телевизионной башни «Коктобе» в городе Алматы составляет 372 метра без учета высоты одноименной сопки. В настоящее время телевизионная сеть насчитывает несколько тысяч вещательных станций; их передачи в нашей стране принимают около 10 млн телевизоров.

Зона уверенного приема телевидения непрерывно увеличивается, особенно благодаря использованию ретрансляционных спутников.

**Вопросы**

1. Какие преобразователи и сигналы используются в каналах связи?
2. Какие сигналы называются аналоговыми, дискретными и цифровыми?
3. В чем состоит принцип передачи изображений на расстояние?
4. Почему дальность действия передающей телевизионной станции ограничена линией горизонта? Какие шаги предпринимаются для увеличения дальности действия телестанции?

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 4.4.1. Чему равно расстояние до наблюдаемого объекта, если между посылкой импульса и его возвращением в радиолокатор прошло 0,0001 с? (*Ответ: 15 км.*)
- 4.4.2. Какова длина волны телевизионного сигнала, если несущая частота равна 50 МГц? (*Ответ: 6 м.*)
- 4.4.3. Радиостанция передает звуковой сигнал, частота которого составляет 440 Гц. Определите число колебаний высокой частоты, переносящих одно колебание звуковой частоты, если передатчик работает на волне длиной 50 м. (*Ответ: 13 636 колебаний.*)
- 4.4.4. Изменение тока в антенне радиопередатчика происходит по закону $i = 0,3 \sin 1,57 \cdot 10^6 t$. Найдите длину излучаемой электромагнитной волны. (*Ответ: 12 км.*)

Уровень В

- 4.4.5. Колебательный контур радиоприемника настроен на длину волны 25 м. Во сколько раз надо увеличить емкость конденсатора колебательного контура радиоприемника, чтобы настроить его на волну длиной 50 м? (*Ответ: в 4 раза.*)
- 4.4.6. Во сколько раз нужно увеличить емкость контура радиоприемника, настроенного на частоту 6 МГц, чтобы можно было слушать радиостанцию, работающую на длине волн 100 м? (*Ответ: в 4 раза.*)
- 4.4.7. На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из катушки индуктивностью 3 мГн и плоского конденсатора в виде двух дисков радиусом 1,2 см, расположенных на расстоянии 0,3 мм друг от друга? Конденсатор заполнен веществом с диэлектрической проницаемостью 4. (*Ответ: 753,6 м.*)

Уровень С

- 4.4.8. Высота излучающей антенны телецентра над уровнем Земли составляет 300 м, а высота приемной антенны телевизионного приемника – 10 м. На какое расстояние можно удалить приемник от передатчика для уверенного приема телепередач? (*Ответ: 73 км.*)
- 4.4.9. Радиоприемник можно настраивать на прием радиоволн длиной от 25 до 200 м. Во сколько раз нужно уменьшить расстояние между пластинами плоского конденсатора, включенного в колебательный контур приемника, чтобы перейти от приема самой короткой длины волны к самой длинной? (*Ответ: в 64 раза.*)
- 4.4.10. Заряженный конденсатор присоединили к идеальной катушке. Через 10^{-8} с энергия конденсатора уменьшилась в 4 раза по сравнению с первоначальной. Определите длину волны, излучаемой контуром. (*Ответ: 5 м.*)

§ 4.5

Развитие средств связи

1. Общие положения развития средств связи. В современном мире существуют различные средства связи, которые постоянно развиваются и совершенствуются. Связь – это важнейшее звено в системе хозяйства страны, способ общения людей, удовлетворения их производственных, духовных, культурных и социальных потребностей.

Основные направления развития средств связи: 1) радиосвязь; 2) телефонная связь; 3) телевизионная связь; 4) сотовая связь; 5) интернет; 6) космическая связь; 7) фототелеграф (факс); 8) видеотелефонная связь; 9) телеграфная связь.

Радиосвязь – передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Виды радиосвязи: 1) радиотелеграфная; 2) радиотелефонная; 3) радиовещание; 4) телевидение.

28 апреля 2014 г. с космодрома Байконур был запущен национальный спутник связи и вещания «KazSat-3» (рис. 4.5.1).

Ввод в эксплуатацию спутника «KazSat-3» стал важным моментом для социально-экономического развития Республики Казахстан. Наличие собственных национальных спутников связи и вещания позволяет удовлетворять потребности населения в каналах фиксированной спутниковой связи, обеспечивать информационную безопасность страны, устранять «цифровое неравенство» на территории государства.

В 2016 году полностью завершился переход национальных телеоператоров Республики Казахстан с иностранных на отечественные спутники связи и вещания.

Сегодня на базе спутника «KazSat-3» обеспечено цифровое телерадиовещание в форматах HD, DTH, IPTV по всей территории республики.

Национальный оператор в области телерадиовещания Республики Казахстан АО «Казтелерадио» транслирует пакет программ спутникового телерадиовещания «OTAU TV».

Крупнейшим оператором фиксированной телефонии и национальной сети передачи данных в Казахстане является компания «Казахтелеком». Компания предоставляет услуги широкополосного доступа в интернет, интерактивного телевидения, сотовой связи, телеграфа, местной и дальней телефонной связи.

Оператор Caspio HD транслирует пакет телеканалов в HD-формате в любую точку страны, используя технологическую платформу «KazSat-3».

Ресурсы «KazSat-3» использует оператор «Алма ТВ», вещающий в формате HEVC. Данный формат позволяет увеличить количество каналов, улучшить качество и яркость картинки вещания, транслировать HD и Ultra HD (4K) каналы.

При создании спутника «KazSat-3» были использованы современные технические решения, позволяющие обеспечивать заданные характеристики аппарата и необходимый уровень надежности.



Рис. 4.5.1. Спутник «KazSat-3»

2. Высокоскоростной интернет. Широкополосный, или высокоскоростной доступ в интернет – доступ в интернет со скоростью передачи данных, превышающей максимально возможную при использовании коммутируемого доступа с использованием модема и телефонной сети общего пользования. Осуществляется с использованием проводных, оптоволоконных и беспроводных линий связи различных типов.

Типы подключения к сети Интернет. Это модемное подключение через телефонную сеть. Для настройки необходимо иметь домашний телефон и оператора связи, оборудование которого достаточно мощное для обеспечения доступа в Сеть.

Неудобство коммутируемой связи заключается в том, что соединение с Сетью происходит через ту же линию, что и дозвон. Поэтому одновременное использование интернета и телефона невозможно. Кроме того, в среднем такое соединение позволяет выходить в Сеть со скоростью до 56 кбит/с. При таком соединении скачивание файлов может растянуться на несколько недель.

ADSL – это еще один тип модемного соединения. Для него тоже требуется телефонная линия, но цифровой модем позволяет одновременно дозваниваться и выходить в Сеть. Пропускная способность линии при этом типе подключения к сети Интернет выше, чем в способе, описанном выше. Она обеспечивает абоненту достаточно высокую скорость доступа в Сеть – в среднем до 24 Мбит/с. Нагрузка на линию распределяется асимметрично – входящее соединение происходит быстрее, чем исходящее (скорость до 1,4 Мбит/с) (рис. 4.5.2). Из-за этого загружать файлы на сервер приходится дольше.



Рис. 4.5.2. Подключение через асимметричную цифровую абонентскую линию

Тип доступа, который обеспечивается по стандарту **DOCSIS** – передача данных через телевизионный кабель. Обычно его используют в случае отсутствия в доме интернет-провайдеров. С его помощью можно получить скорость от 27 до 50 Мбит/с. Для настройки доступа необходимо наличие в доме кабельного телевидения и специального модема (рис. 4.5.3).



Рис. 4.5.3. Подключение через кабельное телевидение

Ethernet используются для подключения компьютера к Сети напрямую или через Wi-Fi-роутер (рис. 4.5.4). Пропускная способность такого канала выше, чем в случае с ADSL или телевизионным кабелем. Скорость передачи данных от 50 Мбит/с в обоих направлениях – как от компьютера к серверу, так и обратно. Подключиться можно только при наличии широкополосного интернета в доме абонента.



Рис. 4.5.4. Доступ через Ethernet-кабель

GPON – это технология настройки доступа в Сеть через персональную оптоволоконную линию (рис. 4.5.5). Она проводится от оборудования провайдера непосредственно в квартиру абонента. Этот тип настройки соединения с Сетью обеспечивает максимальную скорость передачи данных – до 1 Гбит/с. Для подключения необходимо протянуть от общей линии кабель в квартиру абонента и установить оптический модем.



Рис. 4.5.5. Подключение через GPON

Более распространенным, чем GPON, является подключение по оптоволокну и витой паре. При этом оптический кабель тянут до многоквартирного дома, а по абонентам интернет разводят с помощью витой пары. Пропускная способность такого канала ниже.

К этой группе относятся радио-, мобильный, спутниковый интернет. Для настройки доступа с помощью перечисленных каналов необходимы антенны (*рис. 4.5.6*).



Рис. 4.5.6. Настройка доступа через антенну

Радиоинтернет работает через точку доступа, обеспечиваемую провайдером. Сигнал от нее распространяется на определенный радиус и поступает на оборудование абонента через антенну, установленную в квартире. Далее с помощью модема сигнал поступает на компьютер. Если точка доступа находится далеко, сигнал может оказаться слишком слабым. В таком случае, кроме антенны, используют усилители сигнала.

Мобильная связь работает через антенны, установленные в сотовых телефонах или USB-модемах, дополнительное оборудование не требуется. Этот тип подключения к сети Интернет самый доступный, но отличается невысокой пропускной способностью в сравнении с проводным подключением по выделенной линии.

Спутниковая связь устанавливается через уличные антенны, направленные на спутник. Из-за больших расстояний, которые должен преодолеть сигнал, обычно он поступает с задержкой. К другим недостаткам подключения относятся невысокая скорость соединения, нестабильная работа в плохую погоду, высокая стоимость оборудования и абонентской платы. Однако в некоторых местностях спутниковая связь является единственным доступным каналом подключения (*рис. 4.5.7*).



Рис. 4.5.7. Антенна спутникового интернета

Сотовый телефон – мобильный телефон, предназначенный для работы в сетях сотовой связи; использует приемопередатчик радиодиапазона и традиционную телефонную коммутацию для осуществления телефонной связи на территории зоны покрытия сотовой сети.

В настоящее время сотовая связь – самая распространенная из всех видов мобильной связи, поэтому обычно мобильным телефоном называют именно сотовый, хотя мобильными телефонами, кроме сотовых, являются также спутниковые телефоны, радиотелефоны и аппараты магистральной связи.

Мобильные телефоны являются беспроводными аппаратами (рис. 4.5.8). Это означает, что они не подключены к какой-либо стационарной электрической линии.



Рис. 4.5.8. Мобильные телефоны



Дополнительный материал

Некоторые явления в радиотехнике всегда приводили в недоумение. Например, самый простой и дешевый транзистор улавливает станцию, находящуюся за тысячи километров.

Люди были в восторге, когда Маркони впервые передал сигналы беспроводного телеграфа через Атлантический океан. Почему же они не уходили в космос? Оказывается, ионосфера прозрачна для очень коротких волн, а длинные волны, применяемые для передачи амплитудно-модулированных сигналов, отражаются от ионосферы. Поэтому на очень длинных расстояниях принимаются те сигналы, которые отражены от ионосферы. При определенных условиях ультракороткие волны также отражаются от ионосферы, в таком случае их можно принимать на удивительно большом расстоянии. Степень отражения длинных волн усиливается ночью, так как ионизация молекул в нижнем слое ионосферы уменьшается из-за отсутствия солнечного света.



Вопросы

1. Каковы основные направления развития средств связи?
2. Что называется радиосвязью? Какие виды радиосвязи вы знаете?
3. Когда был запущен национальный спутник связи и вещания «KazSat-3»? В каких форматах осуществляется цифровое телерадиовещание на базе «KazSat-3»?
4. Какие типы (виды) подключения к сети Интернет существуют?
5. Как осуществляется мобильная (сотовая) связь?



Задание (экспериментальное исследование)

1. Поместите небольшой работающий радиоприемник в открытое ведро или сковороду. Звук будет слышен хорошо.
2. Повторите опыт, накрыв крышкой ведро или сковороду. Звук затухает. Почему?








КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 4

- **Электромагнитным полем** называется особая форма материи, представленная неразрывным единством переменных электрического и магнитного полей, посредством которой осуществляется взаимодействие заряженных частиц.
- **Электромагнитными волнами** называются электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью $c \approx 300\,000$ км/с.
- **Частота электромагнитного колебания**, излучаемого электрическим колебательным контуром: $\omega = 1/\sqrt{LC}$.
- **Плотностью потока электромагнитного излучения I** называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt : $I = \Delta W/S\Delta t$.
- **Плотность потока излучения** равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения: $I = \omega c$.
- **Условие максимума интерференции** двух электромагнитных волн: $\Delta l = k\lambda$; ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$).
- **Условие минимума интерференции** двух электромагнитных волн: $\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$; ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$).
- **Условие наблюдения дифракции** электромагнитной волны: $d \leq \lambda$.
- **Модуляцией** называется медленное по сравнению с **периодом** колебаний изменение **амплитуды** или **частоты** волны по определенной закономерности.
- **Детектированием (демодуляцией)** называется преобразование электрических колебаний, в результате которого из высокочастотных колебаний выделяются колебания более низкой частоты.
- **Аналого-цифровым преобразователем** называется устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в цифровой сигнал.

Глава 5

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять лабораторный и астрономический методы определения скорости света;
-  объяснять разложение белого света при прохождении его через призму;
-  проводить сравнительный анализ интерференционных картин световых и механических волн;
-  определять условия наблюдения интерференционных максимумов и минимумов в тонких пленках в проходящем и отраженном свете;
-  объяснять дифракционную картину от нити, щели, круглого отверстия, используя теорию Френеля;
-  экспериментально определять длину световой волны с помощью дифракционной решетки;
-  экспериментально доказать электромагнитную природу света путем анализа явлений интерференции, дифракции и поляризации света.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
жарық жылдамдығы	скорость света	velocity of light
сыну көрсеткіші	показатель преломления	refractive index
жарық дисперсиясы	дисперсия света	dispersion of light
жарықтың интерференциясы	интерференция света	interference of light
жұқа қабыршақтағы интерференция	интерференция в тонких пленках	thin film light interference
Ньютон сақиналары	кольца Ньютона	Newton rings
жарық дифракциясы	дифракция света	diffraction of light
дифракциялық тор	дифракционная решетка	diffraction grating

тор тұрақтысы (периоды)	постоянная решетки (период)	lattice constant (period)
жарық поляризациясы	поляризация света	polarization of light
табиғи жарық	естественный свет	natural light
поляризацияланған жарық	поляризованный свет	polarized light

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «скорость света», «показатель преломления», «дисперсия света», «интерференция света», «интерференция в тонких пленках», «кольца Ньютона», «дифракция света», «дифракционная решетка», «постоянная решетки», «поляризация света», «естественный свет», «поляризованный свет».

§ 5.1

Электромагнитная природа света. Скорость света

1. В XVII веке возникло две теории света: *волновая* и *корпускулярная*. Согласно представлениям Гюйгенса, свет – волны, распространяющиеся в особой среде – эфире, заполняющем все пространство. Две теории длительное время существовали параллельно. Когда одна из теорий не объясняла какого-то явления, оно объяснялось другой теорией. Например, прямолинейное распространение света, приводящее к образованию резких теней, нельзя объяснить исходя из волновой теории. Однако в начале XIX века были открыты такие явления, как дифракция и интерференция, что дало повод для мыслей, что волновая теория окончательно победила корпускулярную. Во второй половине XIX века Максвелл показал, что *свет – частный случай электромагнитных волн*. Эти работы послужили фундаментом для электромагнитной теории света. Однако в начале XX века было обнаружено, что при излучении и поглощении свет ведет себя подобно *поток частиц*.

Впоследствии было установлено, что *корпускулярно-волновая двойственность света является его фундаментальным свойством*.

Скорость света является одной из основных констант нашего мира и определяет предельную скорость передачи взаимодействий в вакууме.

Естественно, что свет, распространяясь в прозрачных вещественных средах, изме-

няет свою скорость. Для описания скорости света в веществе служит *одна из основных оптических характеристик – показатель (или коэффициент) преломления n* . Показатель преломления демонстрирует, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в веществе.

Существует несколько способов определения скорости света: астрономический и лабораторные методы.

2. Астрономический метод измерения скорости света. Впервые скорость света измерил датский астроном Олаф Рёмер в 1676 году. Он засекал время, которое самый большой из спутников Юпитера Ио находился в тени этой огромной планеты (рис. 5.1.1). Рёмер провел измерения в момент, когда наша планета была ближе всего к Юпитеру, и в момент, когда мы находились немного (по астрономическим понятиям) дальше от Юпитера. В первом случае промежуток между вспышками составил 48 ч 28 мин. Во втором случае спутник опоздал на 22 мин.



Рис. 5.1.1. Определение скорости света астрономическим методом

Из этого был сделан вывод, что свету необходимо 22 мин, чтобы пройти расстояние от места предыдущего наблюдения до места настоящего наблюдения. Зная расстояние и время запаздывания Ио, он вычислил *скорость света*, которая оказалась огромной, примерно 215 000 км/с.

3. Лабораторные методы измерения скорости света. В 1849 году французский физик Арман Ипполит Луи Физо поставил лабораторный опыт по измерению скорости света. Он измерил скорость света методом вращающегося затвора, без наблюдений за небесными телами. Приведем ниже схему его лабораторной установки (рис. 5.1.2).

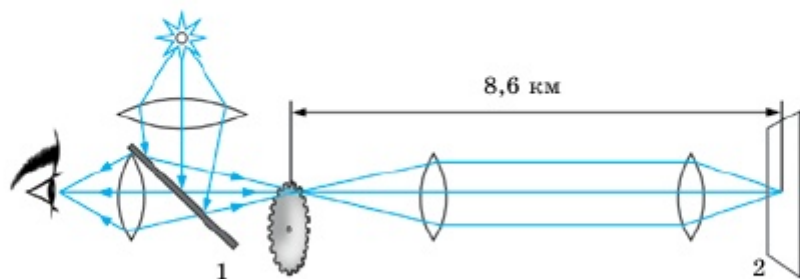


Рис. 5.1.2. Схема установки для определения скорости света лабораторным методом

Свет, отражаясь от зеркала (1), проходил через зубья колеса и отражался от еще одного зеркала (2), удаленного на 8,6 км. Скорость колеса увеличивали до того момента, пока свет не становился виден в следующем зазоре. Расчеты Физо дали результат в **313 000 км/с**. Спустя год подобный эксперимент с вращающимся зеркалом был проведен Л. Фуко, получившим результат **298 000 км/с**.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. Американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости света с применением вращающихся зеркал.

С появлением мазеров и лазеров у людей появились новые возможности и способы для измерения скорости света, а развитие теории позволило также рассчитывать скорость света косвенно, без проведения прямых измерений.

На сегодняшний день самым точным значением скорости света принято считать значение **299 792 458 м/с ± 1,2 м/с**, утвержденное в 1975 году на заседании Генеральной ассамблеи мер и весов. **Приблизительно скорость света можно считать равной $3 \cdot 10^8$ м/с.**

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль, способствовало выяснению природы света.



Вопросы

1. Какие теории света возникли в XVII веке? Почему они существуют так долго?
2. С помощью какой оптической характеристики описывают скорость света в веществе?
3. В чем заключался астрономический метод измерения скорости света?
4. В чем заключался опыт Луи Физо? Каково на сегодняшний день самое точное значение скорости света?

§ 5.2

Дисперсия света. Интерференция света

1. Вопрос о причине различной окраски тел, естественно, занимал ум человека уже давно. Очень большое количество наблюдений, и чисто житейских, и научных, было в распоряжении исследователей, но вплоть до работ И. Ньютона в этом вопросе царила полная неопределенность. Считалось, что цвет есть свойство самого тела. На самом деле тот или другой цвет является составной частью «белого» света. Наглядным примером такого утверждения служит **дисперсия** – разложение белого света при прохождении его через призму (рис. 5.2.1). Первые экспериментальные наблюдения дисперсии света принадлежат И. Ньютону (1672 г.), проделавшему маленькое отверстие в оконной ставне и в солнечный день получившему узкий пучок света, на пути которого была поставлена треугольная стеклянная призма.

Пучок преломился в ней, и на противоположной стене появилась цветная полоса, где расположились в определенном порядке все цвета радуги: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Эту цветную полосу Ньютон назвал *спектром* (от латинского «*спектрум*» – *видимое*).

После такого эксперимента Ньютон сделал **первый вывод**: разложение белого света в цветной спектр означает, что *белый свет имеет сложную структуру, то есть является составным*, смесью всех цветов радуги.

Второй вывод Ньютона состоял в том, что *свет разных цветов характеризуется разными показателями преломления в определенной среде*. Это означает, что *абсолютный показатель преломления* для фиолетового цвета больше, чем для красного.



Рис. 5.2.1. Разложение белого света при прохождении его через призму

Согласно волновой теории света, цвета определяются *частотой* электромагнитной волны, которой является свет. Наименьшую частоту имеет красный цвет, наибольшую – фиолетовый. Исходя из опытов Ньютона и опираясь на волновую теорию света, следует вывод: *показатель преломления света зависит от частоты световой волны*.

Дисперсией света называется *зависимость показателя преломления от длины волны проходящего света*.

Разным скоростям распространения волн соответствуют разные абсолютные показатели преломления среды: $n = \frac{c}{v}$. (5.1)

Частота и длина волны связаны между собой: $\lambda = \frac{c}{\nu}$. (5.2)

Из формулы видно, что длина волны прямо пропорциональна скорости света и обратно пропорциональна частоте. Отсюда следует, что длина волны больше в той среде, где скорость волны больше (при заданной частоте).

Следовательно, *во время перехода из одной среды в другую скорость распространения световой волны, а значит, и длина волны изменяются, тогда как частота, а значит, и цвет света остаются неизменными*.

Дисперсия света называется *нормальной* в случае, если показатель преломле-

ния монотонно возрастает с увеличением частоты (убывает с увеличением длины волны); в противном случае дисперсия называется *аномальной*.

Открытие явления дисперсии позволило объяснить образование радуги. Вследствие преломления света в водяных капельках или ледяных кристалликах, парящих в атмосфере, наблюдается дисперсионное явление солнечного света, т.е. радуга.

2. Интерференцией света называется явление наложения двух или более когерентных световых волн, в результате которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства, т.е. возникает интерференционная картина.

Необходимым условием для наблюдения интерференции света является когерентность световых волн, т.е. волны должны иметь одинаковую частоту (длину) и постоянную во времени разность фаз. В природе нет двух одинаковых когерентных источников света!



Томас Юнг
(1773–1829) – английский физик, один из создателей волновой оптики.

В 1802 году английский ученый Томас Юнг поставил опыт, в котором наблюдал интерференцию света. Свет из узкой щели S_0 падал на экран с двумя близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 5.2.2). Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся, и на белом экране световые пучки, прошедшие через щели S_1 и S_2 , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос, максимумов и минимумов (аналогично как и для механических волн).

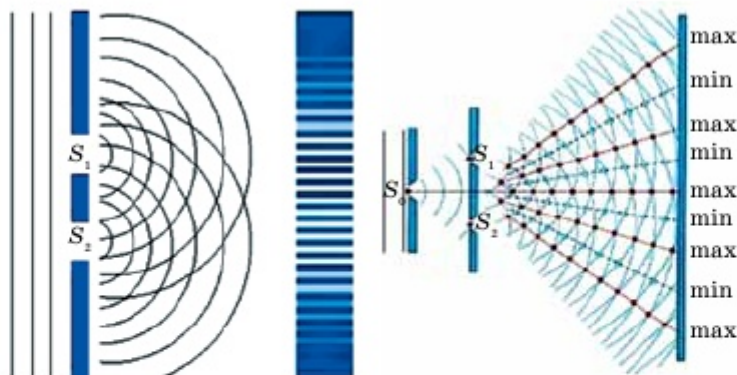


Рис. 5.2.2. Интерференция волн световых пучков, проходящих через узкие щели

3. Явление интерференции в тонких пленках часто наблюдается в естественных условиях: радужная окраска мыльных пузырей, нефтяных пленок, масляных пятен на поверхности воды, крыльев насекомых, перламутр раковин, «игра» света в пленках голографических этикеток торговых фирм и т.д. (рис. 5.2.3).

Явление интерференции в тонких пленках – это результат интерференции света, отраженного от передней и задней границ пленки.



Рис. 5.2.3. Природные интерференционные картины

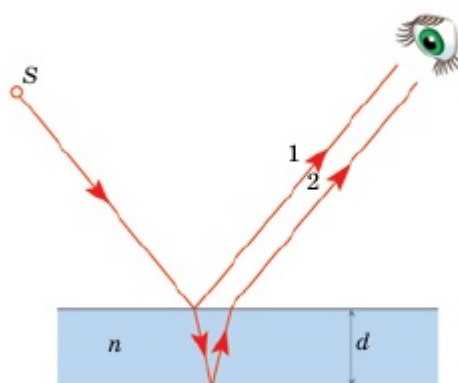


Рис. 5.2.4. Интерференция двух волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей

Различные цвета тонких пленок – это также результат интерференции двух волн, отражающихся от нижней и верхней поверхностей пленки (рис. 5.2.4). Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна 2 отстанет от отраженной 1 на четное число длин волн. В результате происходит интерференция двух сложившихся световых волн.

Поскольку толщина пленки непрерывно меняется, то изменяется и вид интерференционных картин.

В результате проведенных расчетов была получена формула для определения разности хода волн в тонких пленках:

- для проходящего света

$$\Delta = 2dn \cos \beta = k\lambda \text{ (условие максимума);} \quad (5.3)$$

$$\Delta = 2dn \cos \beta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ (условие минимума);} \quad (5.4)$$

- для отраженного света

$$\Delta = 2dn \cos \beta = k\lambda \text{ (условие минимума);} \quad (5.5)$$

$$\Delta = 2dn \cos \beta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ (условие максимума);} \quad (5.6)$$

где Δ – разность хода волн; d – толщина пленки; n – показатель преломления вещества пленки; β – угол преломления; k – порядок максимума или минимума; λ – длина волны.

Различные цвета тонких пленок зависят от: 1) толщины пленки; 2) вещества, соприкасающегося с пленкой; 3) угла падения; 4) длины световой волны. Если пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом появляются различные цвета. Там, где пленка тоньше, усиливаются лучи с малой

длиной волны (синие, фиолетовые), там, где толще – с большей длиной волны (оранжевые, красные).

4. Простая интерференционная картина возникает также в прослойке воздуха между плоской стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис. 5.2.5). Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, называемых *кольцами Ньютона*. Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы и частично отражается от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора между линзой и пластиной.

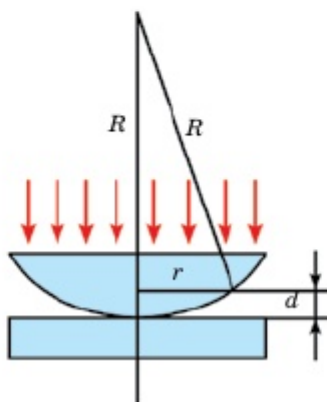


Рис. 5.2.5. Схема опыта, где наблюдаются кольца Ньютона

В отраженном свете оптическая разность хода $\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$, где d – ширина зазора. Радиусы k -го светлого и темного колец: $r_k = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda R}$ и $r_k = \sqrt{k\lambda R}$, где R – радиус кривизны линзы; λ – длина волны.

Все рассуждения были проведены для отраженного света. Интерференцию можно наблюдать и в проходящем свете, причем в данном случае не наблюдается потери половины длины волны. Следовательно, оптическая разность хода для проходящего и отраженного света отличается на $\frac{\lambda}{2}$, т.е. максимуму интерференции в отраженном свете соответствует минимум в проходящем, и наоборот. В чем отличие? В проходящем свете энергия поглощается, в отраженном – больше энергии.

5. Явление интерференции волн находит разнообразное применение. Рассмотрим лишь некоторые примеры применения интерференции.

Явление интерференции применяется в очень точных измерительных приборах, называемых *интерферометрами*. **Интерферометры – очень чувствительные оптические приборы, позволяющие определять незначительные изменения показателя преломления прозрачных тел (газов, жидких и твердых тел)**

в зависимости от давления, температуры, примесей и т.д. Такие интерферометры получили название интерференционных **рефрактометров**. Применение интерферометров очень многообразно. Кроме перечисленного, они применяются для изучения качества изготовления оптических деталей, измерения углов, исследования быстропротекающих процессов, происходящих в воздухе, обтекающем летательные аппараты, и т.д. Применяя интерферометр, Майкельсон впервые провел сравнение международного эталона метра с длиной стандартной световой волны. С помощью интерферометров исследовалось также распространение света в движущихся телах, что привело к фундаментальным изменениям представлений о пространстве и времени.

6. Самое широкое на сегодняшний день применение интерференция света находит в так называемой **просветленной оптике**. **Просветление оптики** – одна из ветвей оптики, занимающаяся уменьшением **коэффициента отражения** поверхностей оптических деталей (например, линзы). Свет, падающий на линзу, частично отражается назад; доля отраженного света обычно составляет несколько процентов. Объективы современной оптической техники представляют собой системы линз (числом до нескольких десятков). В результате отражений на поверхности каждой линзы происходит значительное ослабление света: в сумме на отражениях может теряться до 90% световой энергии. Освещенность изображений предметов, даваемых такой оптической системой, будет чрезвычайно низкой.

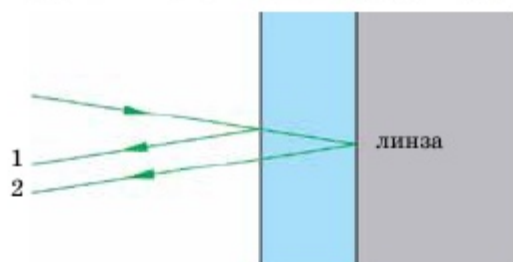


Рис. 5.2.6. Отраженные лучи от границ пленки на поверхности линзы

Как уменьшить потери на отражение? Для этого на поверхность линзы наносят **интерференционное покрытие** в виде тонкой пленки (рис. 5.2.6).

Толщина покрытия подбирается так, чтобы отраженные волны 1 и 2 были сдвинуты на половину длины волны и, интерферируя, погасили друг друга. Тогда не будет потерь на отражение и вся световая энергия пройдет через линзу. Толщина интерференционного покрытия зави-

сит, разумеется, от длины волны, и добиться полного гашения отраженных волн во всем видимом диапазоне не получается.

Проведенные расчеты показали, что полное гашение света происходит при условии: $n_{\text{пленки}} = \sqrt{n_{\text{линзы}}}$. Покрытие обычно подбирается так, чтобы при отражении гасилась средняя, желто-зеленая часть видимого спектра (в которой лежит максимум интенсивности солнечного излучения). Поэтому в отраженных лучах доминируют крайние части спектра – красная и фиолетовая; их смесь, например, является хорошо известный вам сиреневый отблеск объектива фотоаппарата.



Вопросы

1. Какое явление называется дисперсией? Как объяснить цвета тел?
2. Зависит ли скорость света в вакууме от длины волны, частоты, интенсивности света, скорости источника или наблюдателя?



3. Как изменится длина волны и скорость волны при переходе в среду с большим показателем преломления n ? Изменяется ли при этом частота света?
4. Какое явление называется интерференцией света?
5. Что такое кольца Ньютона? Как их получить? Как определить длину волны света по кольцам Ньютона?
6. Где используется явление интерференции света?
7. Почему для получения интерференционной картины в пленках они должны быть тонкими?
8. Почему интерференционная окраска одного и того же места поверхности мыльного пузыря постоянно меняется?
9. При освещении пленки монохроматическим светом в одних местах видны светлые пятна, а в других – темные. Чем это можно объяснить?

**Задание (практическое исследование)**

Начертите схематический ход луча белого света через толстую стеклянную плоскопараллельную пластинку: объясните особенности прохождения луча.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Два когерентных источника S_1 и S_2 (рис. 5.2.7) испускают свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. На каком расстоянии x от точки O на экране располагается первый максимум освещенности, если расстояние между источниками $d = 0,5$ мм, а расстояние от каждого источника до экрана $L = 2$ м?

Д а н о:
 $d = 0,5$ мм
 $L = 2$ м
 $\lambda = 500$ нм
 $k = 1$
 $x = ?$

СИ

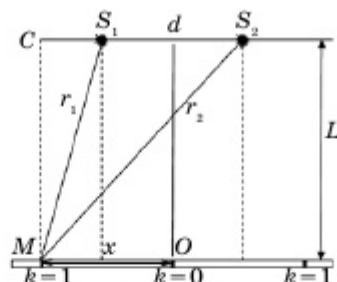
 $5 \cdot 10^{-4}$ м $5 \cdot 10^{-7}$ м**Р е ш е н и е:**

Рис. 5.2.7

Пути лучей r_1 и r_2 определим с помощью теоремы Пифагора как гипотенузы в прямоугольных треугольниках S_1MC и S_2MC :

$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2, \quad (1)$$

$$r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2. \quad (2)$$

Вычитая почленно из (2) (1), получим $r_2^2 - r_1^2 = 2xd$, 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 $r_1 + r_2 \approx 2L$ и $r_2 - r_1 = \frac{2xd}{2L}$ или $\Delta r = \frac{xd}{L}$, откуда $x = \frac{\Delta r L}{d}$.

Согласно условию максимума освещенности при интерференции $\Delta r = k\lambda$.

С учетом этого $x = \frac{k\lambda L}{d}$.

Произведем вычисление: $x = \frac{1 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 2}{5 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^{-3}$ (м).

О т в е т: $x = 2$ (мм).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 5.2.1. Сколько длин волн светового излучения с частотой $4 \cdot 10^{14}$ Гц укладывается на отрезке 1,5 м? (Ответ: $2 \cdot 10^6$.)
- 5.2.2. Разность хода двух когерентных лучей составляет 2,5 мкм. Определите длину волн видимого света (от 700 до 400 нм), которые дадут интерференционные максимумы. (Ответ: 417 нм; 500 нм; 625 нм.)
- 5.2.3. Алмазная пластина освещается фиолетовым светом частоты $0,75 \cdot 10^{15}$ Гц. Найдите длины волн фиолетового света в вакууме и алмазе, если показатель преломления алмаза для этих длин волн равен 2,465. (Ответ: 400 нм; 162 нм.)

Уровень В

- 5.2.4. Два когерентных источника S_1 и S_2 (рис. 5.2.8) с длиной световой волны $5 \cdot 10^{-7}$ м находятся на расстоянии 30 мм друг от друга. Экран расположен на расстоянии 4 см от каждого источника. Что будет наблюдаться на экране в точке А, расположенной напротив источника S_1 ?
- 5.2.5. Какую наименьшую толщину должна иметь пластинка, сделанная из материала с показателем преломления 1,54, чтобы при освещении ее лучами с длиной волны 750 нм перпендикулярно поверхности она в отраженном свете казалась черной? (Ответ: 0,24 мкм.)
- 5.2.6. В опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместили перпендикулярно лучу стеклянную пластинку толщиной 60 мкм и показателем преломления 1,55. Определите, на сколько полос при этом сместится центральная светлая полоса при освещении монохроматическим светом с длиной волны 550 нм. (Ответ: на 60 полос.)
- 5.2.7. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом с длиной волны 550 нм. Расстояние между отверстиями составляет 1 мм, расстояние от отверстий до экрана – 3 м. Найдите расстояние от центрального максимума до первой светлой полосы. (Ответ: 1,65 мм.)
- 5.2.8. При наблюдении колец Ньютона в отраженном синем свете (450 нм) с помощью плоско-выпуклой линзы, положенной на плоскую пластинку, радиус третьего светлого кольца оказался равным 1,06 мм. После замены синего светофильтра на красный был измерен радиус пятого светлого кольца, оказавшийся равным 1,77 мм. Найдите радиус кривизны линзы и длину волны красного света. (Ответ: ≈ 1 м; 0,7 мкм.)

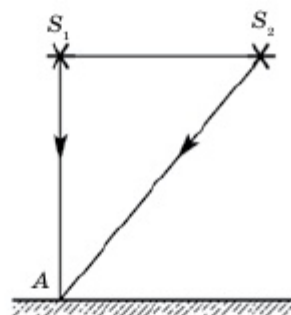


Рис. 5.2.8

Уровень С

- 5.2.9. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 550 нм, падающим по нормали к поверхности пластины. Найдите толщину воздушного зазора между линзой и стеклянной пластиной в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в отраженном свете. (Ответ: 1,1 мкм.)
- 5.2.10. Какой минимальной толщины должна быть прозрачная пленка с показателем преломления $n = 1,2$, чтобы можно было наблюдать максимум освещенности для длины волны красного цвета (800 нм) при отражении от верхней и нижней поверхностей пленки? Свет падает под углом 30° . (Ответ: 184 нм.)

§ 5.3**Дифракция света. Дифракционные решетки**

1. Изучая механические волны, мы называли *дифракцией* огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути. В более широком смысле *дифракцией называют любое отклонение распространения волн вблизи препятствий от законов геометрической оптики.*

Таковыми же волновыми действиями обладает свет. Однако для наблюдения дифракции световых лучей нужны особые условия, это связано с малой длиной световых волн.

Дифракцией света называется явление огибания лучами света контура непрозрачных тел; в результате чего световые лучи проникают в область геометрической тени.

Между интерференцией и дифракцией нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. Разница заключается в том, что при интерференции происходит наложение лучей от дискретных когерентных источников, а при дифракции встречаются лучи от одного источника.

Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса (см. главу 3). Решающую роль в утверждении волновой природы света сыграл О. Френель. Он объяснил явление дифракции и дал метод ее количественного расчета, который позволил в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Френель вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля, *волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции (принцип Гюйгенса – Френеля).*

На рис. 5.3.1 для примера представлены дифракционные картины от различных

препятствий: дифракция от нити (а); дифракция на диске (б); дифракция на круглом отверстии по мере приближения к экрану с отверстием (в).

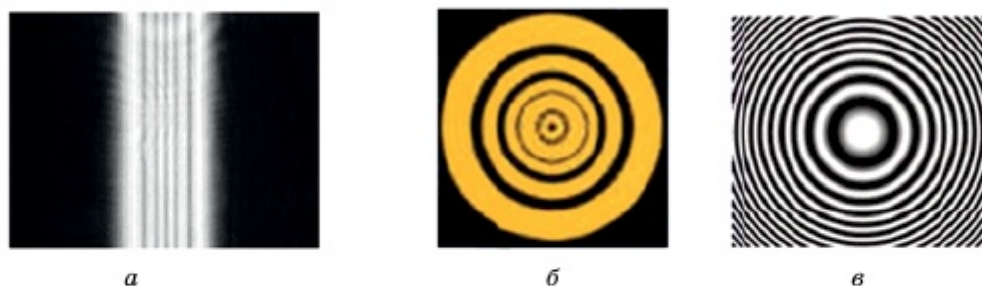


Рис. 5.3.1. Дифракционные картины

Как видно из рисунка, дифракционная картина может быть в виде светлых и темных полос или концентрических колец.

Волновая природа света налагает предел на возможность различия деталей предмета или очень мелких предметов, т.к. свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Поэтому изображения получаются нечеткими. Это возникает в том случае, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны. Огибание светом препятствий налагает предел на разрешающую способность важнейших оптических инструментов – телескопа и микроскопа. Таким образом, дифракция света определяет границы применимости законов геометрической оптики.

2. Начиная с середины XIX века, **дифракционная решетка** (рис. 5.3.2) стала важнейшим инструментом спектроскопии – с ее помощью ученые исследуют спектры излучения светящихся объектов и спектры поглощения различных веществ и по ним определяют их химический состав. Одним из важнейших открытий Фраунгофера стало обнаружение темных линий в спектре Солнца. Сегодня мы знаем, что они возникают в результате поглощения световых волн определенной длины относительно холодным веществом солнечной короны, и благодаря этому можем судить о химическом составе нашего светила.

Дифракционной решеткой называется оптический прибор, представляющий собой периодическую структуру из большого числа регулярно расположенных непрозрачных элементов или разделенных промежутков.

Чтобы изготовить решетку, на стеклянную пластинку алмазным резцом с помощью делительной машины наносят ряд параллельных штрихов. Штрихи являются непрозрачными промежутками, а неповрежденные места между ними – прозрачными щелями. На каждый миллиметр длины решетки наносится от 100 до 1200 штрихов, а всего решетка может содержать более 100 000 штрихов и, значит, такое же количество щелей. **Виды дифракционных решеток:** *отражательные* (штрихи нанесены на зеркальную металлическую поверхность; наблюдение на такой решетке ведется в отраженном свете); *прозрачные* (штрихи нанесены на прозрачную поверхность (или вырезаются в виде щелей на непрозрачном экране), наблюдение ведется в проходящем свете).

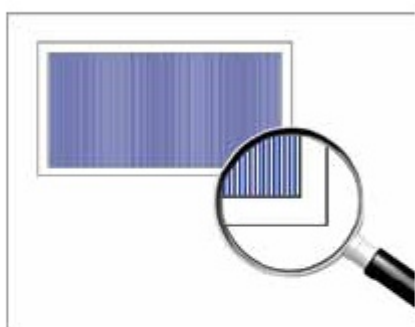


Рис. 5.3.2. Дифракционная решетка

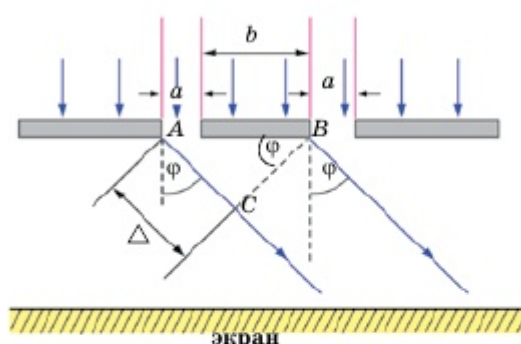


Рис. 5.3.3. Дифракционная решетка с периодом $d = a + b$

Рассмотрим дифракционную решетку (рис. 5.3.3), в которой щели шириной a чередуются с непрозрачными промежутками шириной b .

Величина $d = a + b$ называется периодом дифракционной решетки (или постоянной решетки).

Если известно число штрихов (N), приходящихся на 1 мм решетки, то период решетки находят по формуле: $d = \frac{1}{N}$.

На решетку направляют параллельный пучок лучей, устанавливают линзу и экран в ее фокальной плоскости. На щелях решетки происходит дифракция света. Каждая щель является источником вторичных волн. Лучи расходятся из каждой щели по всевозможным направлениям. На экране, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы, в результате интерференции света от различных щелей будет наблюдаться система дифракционных максимумов и минимумов.

Дифракционная картина, создаваемая решеткой, существенно отличается от дифракционной картины, создаваемой одной щелью. Характерным отличием дифракционной картины от решетки является наличие узких и ярких главных максимумов, в которых сосредоточена практически вся энергия.

3. Найдем условие главного максимума. Выделим пучки, идущие из щелей под произвольным углом φ к первоначальному направлению (рис. 5.3.3). Чтобы пучки при сложении максимально усилили друг друга, нужно, чтобы разность хода Δ между ними, то есть разность расстояний, которые пройдут эти пучки до точки сложения, равнялась целому числу длин волн. Иначе говоря, разность хода Δ равняется целому числу длин волн, т.е. $\Delta = k\lambda$, где k – целое число. Из прямоугольного треугольника ABC на рис. 5.3.3 определим разность хода пучков: $\Delta = d \sin \varphi$, где $d = a + b$.

Таким образом, условие главного максимума дифракционной картины можно записать как

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (5.7)$$

где целое число $k = 0, 1, 2, \dots$ называется порядком максимума. Например, может быть максимум нулевого порядка, первого порядка и т.д. Во всех точках, где не выполняется условие главного максимума, вторичные волны при сложении практически гасят друг друга.

**Вопросы**

1. Какое явление называется дифракцией света? На основе каких принципов можно объяснить явление дифракции?
2. Какой прибор называется дифракционной решеткой? Где и в каких целях он применяется?
3. Что называется периодом дифракционной решетки? Как его находят?
4. Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть тесно расположены друг к другу? Почему их должно быть большое количество? Как определяется условие главного максимума дифракционной картины?
5. Почему в центральной части спектра, полученного на экране при освещении дифракционной решетки белым светом, всегда наблюдается белая полоса?

**Задание (экспериментальное исследование)**

В куске картона сделайте иглой отверстие и посмотрите через него на раскаленную нить электрической лампы. Что вы наблюдаете? Объясните.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. На дифракционную решетку длиной 15 мм, содержащую 3000 штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Определите число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; а также угол, соответствующий последнему максимуму.

Д а н о:	СИ	Р е ш е н и е:
$l = 15 \text{ мм}$	$15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	Из условия для дифракционных максимумов
$N = 3000$		$d \sin \varphi = k\lambda$ (1)
$\lambda = 550 \text{ нм}$	$5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$	можно найти максимальное значение:
$N_{\max} - ?$		$k_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}$ (2)
$\varphi_{\max} - ?$		

Зная длину и число штрихов дифракционной решетки, найдем ее период:

$$d = \frac{l}{N}. \quad (3)$$

Подставив (3) и (2), получаем

$$k_{\max} = \frac{l}{\lambda N}. \quad (4)$$

Естественно, k должно быть целым. Общее число максимумов, даваемых дифракционной решеткой:

$$N_{\max} = 2k_{\max} + 1,$$

так как максимумы наблюдаются как справа, так и слева от центрального мак-

сумма. Угол дифракции, соответствующий последнему максимуму, найдем, записав условие (1) в виде:

$$d \sin \varphi_{\max} = k_{\max} \lambda,$$

откуда с учетом формул (3) и (4):

$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{k_{\max} \lambda N}{l};$$

$$k_{\max} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7}} = 9,09; \quad N_{\max} = 19.$$

$$\varphi_{\max} = \arcsin \frac{9,09 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^3}{15 \cdot 10^{-3}} = \arcsin 0,99 = 81^{\circ}54'.$$

О т в е т: $N_{\max} = 19$; $\varphi_{\max} = 81^{\circ}54'$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 5.3.1. Определите число штрихов на 1 мм дифракционной решетки, если углу 30° для монохроматического света с длиной волны 500 нм соответствует максимум второго порядка. (Ответ: 500.)
- 5.3.2. На дифракционную решетку падает нормально пучок света. Для того чтобы увидеть красную линию (700 нм) в спектре порядка, зрительную трубу пришлось установить под углом 30° к оси коллиматора. Найдите постоянную решетки. Какое число штрихов нанесено на единицу длины этой решетки? (Ответ: 0,0028 мм; 357.)
- 5.3.3. На дифракционную решетку, имеющую 400 штрихов на 1 мм, падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Свет падает на решетку перпендикулярно. Какой наибольший порядок спектра можно наблюдать? (Ответ: 5.)
- 5.3.4. Один миллиметр дифракционной решетки содержит 20 штрихов. Под каким углом идут лучи красного света, дающие на экране максимум второго порядка? Считать, что длина волны красного света равна 600 нм. (Ответ: $1,4^{\circ}$.)

Уровень В

- 5.3.5. На щель шириной 0,1 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,5 мкм. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном параллельно щели. Определите расстояние от щели до экрана, если ширина центрального дифракционного максимума равна 1 см. (Ответ: 1 м.)
- 5.3.6. На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Найдите общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определите угол дифракции φ , соответствующий последнему максимуму. (Ответ: 9; 74° .)

- 5.3.7. Дифракционная решетка освещена белым светом, падающим нормально. Спектры второго и третьего порядков частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре третьего порядка накладывается середина желтой части спектра второго порядка, соответствующая длине волны 575 нм? (Ответ: 383 нм.)

Уровень С

- 5.3.8. Период дифракционной решетки, на которую нормально падает монохроматическая волна, равен 7 мкм. Определите длину волны, если угол между дифракционными максимумами первого и третьего порядков равен 8° . Углы считать малыми. (Ответ: 499 нм.)
- 5.3.9. Какова ширина всего спектра второго порядка (длины волн заключены в пределах от 380 нм до 760 нм), полученного на экране, отстоящем на 2 м от дифракционной решетки с периодом 0,01 мм? (Ответ: 15,2 см.)

Лабораторная работа № 3.

Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Цель работы: определить длину световой волны в различных областях спектра с помощью дифракционной решетки.

Необходимое оборудование: дифракционная решетка; источник света; линейная установка для определения длины волны света.

Краткая теория. Дифракция света наиболее отчетливо наблюдается с помощью дифракционной решетки. Длина волны λ определяется по формуле $\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$, где d – период решетки; k – порядок спектра; φ – угол, под которым наблюдается максимум света соответствующего цвета.

Так как угол φ очень мал (так как расстояние между решеткой и экраном a много больше, чем расстояние b от щели до места, где наблюдается максимум волны определенной длины), его значение равно:

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi = \frac{b}{a}.$$

Следовательно, длина волны равна:

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

Порядок работы:

1. Поместите дифракционную решетку в рамку прибора и укрепите ее на подставке подъемного столика.
2. Экран установите на расстоянии 50 см от дифракционной решетки.



3. Глядя сквозь дифракционную решетку и щель в экране на источник света и перемещая решетку в держателе, установите ее так, чтобы дифракционные спектры располагались параллельно шкале экрана.
4. Вычислите длину волны красного света в спектре 1-го порядка справа и слева от щели в экране, определите среднее значение результатов измерения.
5. Прделайте то же для фиолетового света.
6. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения. Для этого воспользуйтесь п. 5 лабораторной работы № 1.
7. Запишите вывод.
8. Для осмысления результата работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 3

1. В чем состоит явление дифракции? Когда дифракция наиболее заметно выражена?
2. Что такое дифракционная решетка? Для чего подобные решетки используются?
3. Что обычно представляет собой прозрачная дифракционная решетка?
4. Каково назначение линзы, используемой вместе с дифракционной решеткой? Что служит линзой в данной работе?
5. Почему при освещении белым светом в центральной части дифракционной картины возникает белая полоса?

§ 5.4

Поляризация света

1. Рассмотренные явления интерференции и дифракции света – прямое доказательство его волновой природы. Однако существует еще одно явление – *поляризация света*, которая также объясняется волновой теорией.

Поляризацией света называется характеристика светового излучения, описывающая поперечную неэквивалентность различных его направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

Элементарная световая частица (квант света) представляет собой волну, которую можно сравнить для наглядности с волной, которая побежит по канату, если закрепив один его конец, другой встряхнуть рукой. Направление колебаний каната может быть различным, смотря по тому, в каком направлении встряхивать канат. Точно так же и направление колебаний волны кванта может быть разным. Пучок света состоит из множества квантов. Если их колебания различны, такой свет *не поляризован*, если же все кванты имеют абсолютно одинаковую ориентацию, свет называют *полностью поляризованным*. Степень поляризации может быть различной в зависимости от того, какая доля квантов в нем обладает одинаковой ориентацией колебаний.

Существуют *светофильтры*, пропускающие только ту часть света, волны которой ориентированы определенным образом. Если через такой фильтр смотреть на поляризованный свет и при этом поворачивать фильтр, яркость пропускаемого света будет меняться. Она будет максимальна при совпадении направления пропускания фильтра с поляризацией света и минимальна при полном (на 90°) расхождении этих направлений. С помощью фильтра можно обнаружить поляризацию, превышающую примерно 10%, а специальная аппаратура обнаруживает поляризацию порядка 0,1%.

Излучение естественных источников света представляет собой пример электромагнитных волн со всевозможными равновероятными ориентациями вектора напряженности электрического поля, т.е. с неопределенным состоянием поляризации (рис. 5.4.1, а).

Свет с преимущественным (но не исключительным) направлением колебаний вектора называют *частично поляризованным светом* (рис. 5.4.1, б).

В природе существует обширный класс электромагнитных волн, в которых колебания электрического и магнитного полей совершаются в строго определенных направлениях. Такое свойство определяет состояние поляризации электромагнитной волны.

Если вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны колеблется вдоль некоторого направления в пространстве, говорят о *линейной поляризации* рассматриваемой электромагнитной волны (рис. 5.4.1, в). Электромагнитная волна в этом случае называется *полностью поляризованной*.

На практике установлено, что поляризацию света могут осуществлять кристаллы *турмалина, исландского шпата*, которые используются как светофильтры.

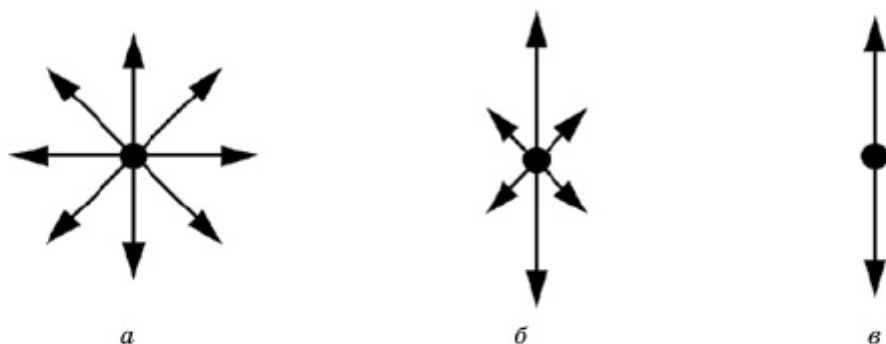


Рис. 5.4.1: а) неполяризованный; б) частично поляризованный; в) полностью поляризованный свет

2. Опыты с турмалином. Рассмотрим подробно один из таких экспериментов, очень простой и эффектный. Это опыт с *кристаллами турмалина* (прозрачными кристаллами зеленой окраски).

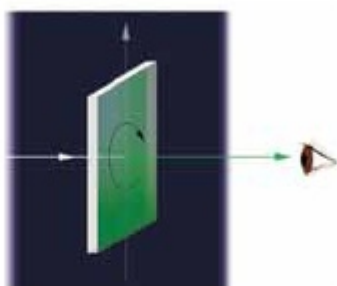


Рис. 5.4.2. Прохождение света через пластину турмалина

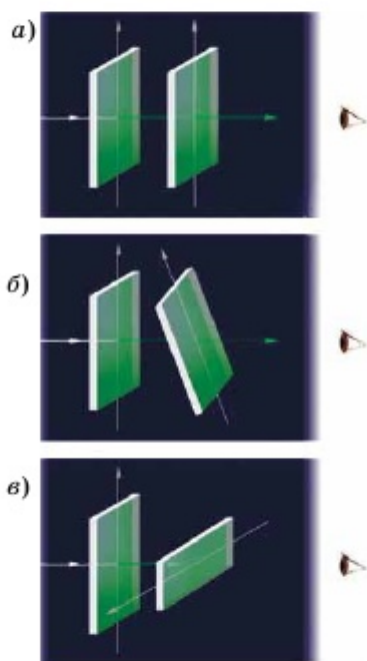


Рис. 5.4.3. Прохождение света через две пластины турмалина: а) свет проходит через двойную пластину; б) свет слабо проходит, когда вторую пластину поворачивают; в) свет вообще не проходит

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла.

Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 5.4.2). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. В этом случае световая волна проявила лишь часть новых свойств.

Эти новые свойства ярко проявляются, если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 5.4.3, а), параллельный первому. В этом случае при одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 5.4.3, б), то обнаружится удивительное явление – гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 5.4.3, в). Он целиком поглощается вторым кристаллом.

Дихроизмом называется явление, состоящее в различном поглощении веществом света в зависимости от его поляризации.

Поляририд представляет собой пленку сильно дихроичного кристалла. Например, поляридом может служить тонкая пленка из целлулоида или целлофана, в которую вкраплены одинаково ориентированные кристаллики герпатита. **Герпатит – двояко-преломляющее вещество с очень сильным дихроизмом в области видимого света.** В пластинке герпатита толщиной всего в 0,1 мм полностью поглощаются все обыкновенные лучи видимой области спектра. Достоинством поляридов является то, что их можно изготавливать с площадью поверхности до нескольких квадратных дециметров.

**Вопросы**

1. Что собой представляет поляризация света?
2. Чем отличается естественный свет от поляризованного? Как описывается степень поляризации света?
3. Как осуществляется наблюдение поляризации света?
4. Какое явление называется дихроизмом? Что представляет собой поляроид?
5. Почему защитные стекла, сделанные из поляризующих материалов, имеют явные преимущества по сравнению со стеклами, действие которых зависит просто от поглощения света?

**Задание (практическое исследование)**

При просмотре фильмов в формате 3D зрители надевают специальные очки, которые позволяют «сделать» изображение объемным. Объясните принцип работы данных очков.

Лабораторная работа № 4.**Наблюдение интерференции, дифракции и поляризации света**

Цель работы: изучить характерные особенности интерференции и дифракции света.

Часть I. Наблюдение интерференции света.

Необходимое оборудование: 1) спички; 2) спиртовка; 3) на проволоке в пробирке комочек ваты, смоченный раствором хлорида натрия; 4) проволочное кольцо с ручкой; 5) стакан с раствором мыла; 6) трубка стеклянная; 7) пластинки стеклянные – 2 шт.; 8) CD-диск.

Краткая теория. Для наблюдения интерференции при монохроматическом излучении в пламя спиртовки вносят комочек ваты, смоченной раствором хлорида натрия. При этом пламя окрашивается в желтый цвет. Опуская проволочное кольцо в раствор мыла, получают мыльную пленку, располагают ее вертикально и рассматривают на темном фоне при освещении желтым светом спиртовки. Наблюдается образование темных и желтых горизонтальных полос и изменение их ширины по мере уменьшения толщины пленки.

В тех местах пленки, где разность хода когерентных лучей равна четному числу полуволин (длина волны равна $\frac{\lambda}{2}$), наблюдаются светлые полосы, а при нечетном числе полуволин – темные полосы.

При освещении пленки белым светом возникает окрашивание светлых полос. С помощью стеклянной трубки на поверхности мыльного раствора выдувают небольшой мыльный пузырь. При освещении его белым светом наблюдают образование цветных интерференционных колец. По мере уменьшения толщины пленки кольца, на пузырьке расширяясь, перемещаются вниз.

Интерференция наблюдается и при рассмотрении контактной поверхности двух сжатых друг другом стеклянных пластинок.

Из-за неидеальности формы соприкасающихся поверхностей между пластинками образуются тончайшие воздушные прослойки, дающие яркие радужные кольцеобразные или замкнутые неправильной формы полосы.

При изменении силы, сжимающей пластинки, расположение и форма полос изменяются как в отраженном, так и в проходящем свете.

Особенно наглядно явление интерференции отраженных световых лучей наблюдается при рассмотрении поверхности CD-диска.

Порядок работы:

1. Зажгите спиртовку.
2. Внесите в пламя комочек ваты, смоченной раствором хлорида натрия.
3. Опустите проволочное кольцо в раствор мыла для получения мыльной пленки.
4. Зарисуйте интерференционную картину, полученную на пленке при освещении желтым светом спиртовки.
5. Объясните порядок чередования цветов на интерференционной картине при освещении пленки белым светом.
6. Выдуйте с помощью стеклянной трубки небольшой мыльный пузырь на поверхности мыльного раствора. Объясните причину перемещения интерференционных колец вниз.
7. Опишите интерференционную картину, наблюдаемую от двух сжатых стеклянных пластинок.
8. Как изменяется наблюдаемая картина при увеличении силы, сжимающей пластинки вместе?
9. Опишите интерференционную картину при освещении CD-диска.

Часть II. Наблюдение дифракции света.

Необходимое оборудование: 1) штангенциркуль; 2) лампа с прямой нитью накала; 3) рамка картонная с вырезом, в котором натянута проволока диаметром 0,1–0,3 мм; 4) капроновая ткань черного цвета.

Краткая теория. Дифракция света проявляется в нарушении прямолинейности распространения световых лучей, огибания светом препятствий, в проникновении света в область геометрической тени. Пространственное распределение интенсивности света за неоднородностью среды характеризует дифракционную картину.

В качестве неоднородности среды в работе используют щель между губками штангенциркуля. Сквозь эту щель смотрят на вертикально расположенную нить горячей лампы. При этом по обе стороны нити параллельно ей видны радужные полосы. При уменьшении ширины щели полосы раздвигаются, становятся шире и образуют ясно различимые спектры. Этот эффект наблюдается особенно хорошо при плавном повороте штангенциркуля вокруг вертикальной оси.

Другую дифракционную картину наблюдают на тонкой нити. Рамку с нитью располагают на фоне горячей лампы параллельно нити накала. Удаляя и приближая рамку к глазу, получают дифракционную картину, когда светлые и темные полосы располагаются по сторонам нити, а в середине, в области ее геометрической тени, наблюдается светлая полоса.

На капроновой ткани можно наблюдать дифракционную картину. В капроновой ткани имеется два выделенных взаимно перпендикулярных направления. Поворачивая ткань вокруг оси, смотрят сквозь ткань на нить горячей лампы, добиваясь четкой дифракционной картины в виде двух скрещенных под прямым углом дифракционных полос (дифракционный крест). В центре креста виден дифракционный максимум белого цвета, а в каждой полосе – по несколько цветов.

Порядок работы:

1. Зарисуйте две дифракционные картины, наблюдаемые при рассмотрении (при ширине щели 0,05 и расстоянии между губками для измерений 0,8 мм).
2. Опишите изменение характера интерференционной картины при плавном повороте штангенциркуля вокруг вертикальной оси (расстояние между губками для измерений 0,8 мм).
3. Рамку с нитью расположите на фоне горячей лампы параллельно нити накала. Перемещая рамку относительно глаза, добейтесь того, чтобы в середине, в области геометрической тени нити, наблюдалась светлая полоса. Зарисуйте дифракционную картину, наблюдаемую за тонкой нитью.
4. Посмотрите сквозь черную капроновую ткань на нить горячей лампы. Поворачивая ткань вокруг оси, добейтесь четкой дифракционной картины в виде двух скрещенных под прямым углом дифракционных полос. Зарисуйте наблюдаемый дифракционный крест, опишите его.

Часть III. Наблюдение и исследование поляризации света.

Цель: изучить свойства поляризованного света и применить их на практике.

Необходимое оборудование: 1) поляроиды из жидкокристаллических экранов мобильного телефона; 2) оргстекло (линейка); 3) образец из прозрачного скотча различной толщины; 4) микрокристаллы поваренной соли на стекле, полученные при испарении раствора; 5) микрокристаллы сахара на стекле, полученные при испарении раствора; 6) стопа стеклянных пластин; 7) трубка от медицинской капельницы.

Порядок работы:

1. Поставьте поляроиды на одной прямой. Поворачивая один из них, добейтесь максимального гашения света.
2. Между поляроидами поместите образец со скотчем различной толщины. Поверните образец вокруг оси, совпадающей с поляризованным лучом.

3. Между поляроидами поместите:
 - пластинку из оргстекла;
 - трубку от капельницы.
4. Между поляроидами поместите:
 - стекло с кристаллами сахара;
 - стекло с кристаллами поваренной соли.
5. Посмотрите через один поляроид на облака, блики на мебели, блики от стопы стекол, блики от окон.
6. Проанализируйте наблюдаемые явления и сделайте вывод.
7. Для осмысления результатов работы ответьте на следующие вопросы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 4

1. Когда проявляется явление интерференции, дифракции и поляризации света?
2. Как получается интерференционная картина на пленке?
3. При освещении белым светом пленки объясните появление цветов на возникающей интерференционной картине.
4. Объясните принцип работы поляроидов.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 5

- **Скорость света c** является одной из основных мировых констант, она и определяет предельную скорость передачи взаимодействий в вакууме.
- **Показатель преломления** демонстрирует, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в веществе.
- **Дисперсией света** называется зависимость показателя преломления от длины волны проходящего света.
- **Интерференцией света** называется явление наложения двух или более когерентных световых волн, в результате которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства, т.е. возникает интерференционная картина.
- **Интерференция в тонких пленках** – это явление, возникающее в результате интерференции света, отраженного от передней и задней границ пленки.
- **Дифракцией света** называется явление огибания лучами света контура непрозрачных тел, в результате чего световые лучи проникают в область геометрической тени.

- **Дифракционной решеткой** называется оптический прибор, представляющий собой периодическую структуру из большого числа регулярно расположенных прозрачных и непрозрачных элементов или разделенных промежутков.
- **Периодом дифракционной решетки (или постоянной решетки)** является общая ширина прозрачных и непрозрачных элементов (промежутков): $d = a + b$. Она разлагает белый свет в спектр, и с ее помощью можно определить длину световой волны, исходя из условия главного максимума: $d \sin \varphi = k\lambda$.
- **Поляризацией света** называется характеристика светового излучения, описывающая поперечную неэквивалентность различных его направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.









Глава 6



ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ГЛАВА 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ЦЕЛИ ПРОГРАММЫ В ГЛАВЕ:

-  объяснять закон отражения света с помощью принципа Гюйгенса;
-  строить ход лучей в сферических зеркалах и применять формулы сферического зеркала при решении задач;
-  объяснять закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса;
-  объяснять преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов;
-  экспериментально определять показатель преломления стекла и предлагать пути улучшения постановки эксперимента;
-  строить ход лучей в системе линз;
-  применять формулу тонкой линзы, образованной двумя сферическими поверхностями разного радиуса, при решении задач;
-  строить и объяснять ход лучей в лупе, телескопе, микроскопе.

Минимум физических терминов в главе на трех языках

казахский	русский	английский
жарықтың шағылу заңы	закон отражения света	law of reflection
жазық айна	плоское зеркало	plane mirror
сфералық айна	сферическое зеркало	spherical mirror
сызықтық үлкейту	линейное увеличение	linear magnification
жарықтың сыну заңы	закон преломления света	law of refraction
салыстырмалы сыну көрсеткіші	относительный показатель преломления	relative refractive index
толық ішкі шағылу	полное внутреннее отражение	total internal reflection

оптикалық талшық	оптическое волокно	optical fiber
линза	линза	lens
жұқа линза	тонкая линза	thin lens
линзаның оптикалық күші	оптическая сила линзы	lens power
оптикалық аспап	оптический прибор	optical instruments
бұрыштық үлкейту	угловое увеличение	angular magnification
лупа	лупа	magnifying glass
телескоп	телескоп	telescope
микроскоп	микроскоп	microscope

В этой главе рассматриваются следующие физические термины, обязательные для усвоения согласно учебным целям: «закон отражения света», «плоское зеркало», «сферическое зеркало», «линейное увеличение», «закон преломления света», «относительный показатель преломления», «полное внутреннее отражение», «оптическое волокно», «линза», «тонкая линза», «оптическая сила линзы», «оптический прибор», «угловое увеличение», «лупа», «телескоп», «микроскоп».

§ 6.1

Принцип Гюйгенса. Закон отражения света

1. Согласно принципу Гюйгенса, *каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн*. Следовательно, зная положение волновой поверхности (фронта волны) в момент времени t , можно найти ее положение в следующий момент времени $t + \Delta t$, рассматривая каждую точку фронта как источник вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, как было показано в главе 3, представляет собой *волновую поверхность* в следующий момент времени. Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения волн любой природы: механических, световых и т.д. Гюйгенс сформулировал его первоначально именно для световых волн.

С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон, которому подчиняются

волны при отражении от границы раздела двух сред.

2. Рассмотрим отражение плоской волны.

Волна называется плоской, если поверхности равной фазы (волновые поверхности) представляют собой плоскости.

На рис. 6.1.1 MN – отражающая поверхность, прямые A_1A и B_1B – два луча падающей плоской волны (они параллельны друг другу). Плоскость AC – волновая поверхность этой волны. Угол α между падающим лучом A_1A и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча A называют *углом падения*. Угол γ между отраженным лучом AA_2 и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке отражения луча A называют *углом отражения*.

Волновую поверхность отраженной волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела сред. Различные участки волновой поверхности AC достигают отражающей границы не одновременно. Возбуждение колебаний в точке A начнется раньше, чем в точке B ,

на время $\Delta t = \frac{CB}{v}$ (где v – скорость волны). В момент, когда волна достигнет точки B

и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу радиусом $r = AD = v\Delta t = CB$. Радиусы полусфер вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B , постепенно уменьшаются так, как показано на рис. 6.1.1. Огибающей вторичных волн является плоскость DB , касательная к сферическим поверхностям. Она представляет собой волновую поверхность отраженной волны. Отраженные лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны волновой поверхности DB . Угол γ между перпендикуляром к отражающей поверхности и отраженным лучом называют *углом отражения*. Так как $AD = CB$ и треугольники ADB и ACB – прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\alpha = \angle CAB$ и $\gamma = \angle DBA$ как углы с перпендикулярными сторонами равны:

$$\alpha = \gamma. \tag{6.1}$$

Исходя из вышеизложенного, закон отражения света можно сформулировать следующим образом: *падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости; при этом угол отражения равен углу падения.*

Если обратить направление распространения световых лучей, то отраженный луч станет падающим, а падающий – отраженным. *Обратимость хода световых лучей – их важное свойство.*

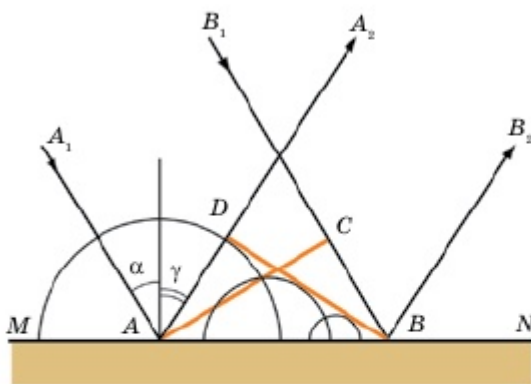


Рис. 6.1.1. Отражение лучей на границе двух сред



Вопросы

1. Какая волна называется плоской?
2. Как определяются углы падения и отражения световых лучей?
3. В каком случае происходит явление отражения света? Что является важным свойством световых лучей?
4. Как формулируется закон отражения света?

§ 6.2

Плоские и сферические зеркала

1. Зеркала были известны с древности. Сначала их делали из металла: бронзы, меди, серебра. Позже появились стеклянные зеркала, которые покрывались с обратной стороны оловом. Зеркало являлось предметом роскоши и порой стоило целое состояние. В XIX веке зеркала стали производить с использованием серебра. Эта технология практически без изменений сохранилась до наших дней. Зеркало представляет собой стеклянную пластину, покрытую с одной стороны серебряным напылением. Оно предназначено для отражения света. Рассматривают две геометрические формы зеркала: *плоское* и *сферическое*.

Плоским зеркалом называется гладкая поверхность, при отражении от которой параллельный пучок остается параллельным.

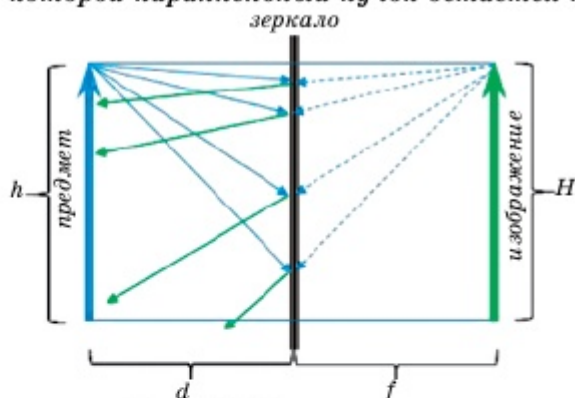


Рис. 6.2.1. Плоское зеркало

Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от зеркальной поверхности. Это изображение является *мнимым*, так как оно образуется пересечением не самих отраженных лучей, а их «продолжением» в зазеркалье (рис. 6.2.1).

Вследствие закона отражения света мнимое изображение предмета располагается симметрично относительно зеркальной поверхности.

Изображение в плоском зеркале формируется за плоскостью зеркала

на том же расстоянии от зеркала f , на каком находится предмет перед зеркалом d : $f = d$. Размер изображения равен размеру самого предмета ($h = H$). Наблюдателю кажется, что лучи исходят из точки за зеркалом.

2. Отражающие поверхности не обязательно должны быть плоскими. Изогнутые зеркала чаще всего бывают *сферическими*.

Сферическим зеркалом называют зеркало, отражающая поверхность которого имеет вид сегмента сферы.

Сферическое зеркало может быть *выпуклым* или *вогнутым* – в зависимости от того, какая сторона сегмента сферы – выпуклая или вогнутая – является отражающей. Центр соответствующей сферическому зеркалу сферы называется его центром, или *оптическим центром* (O); середина сегмента – *полюсом зеркала* (P); прямая OP (рис. 6.2.2), проходящая через центр и полюс, – *главной оптической осью зеркала*. Другие прямые, проходящие через центр зеркала и точку, отличную от полюса, называются его *побочными оптическими осями*.

Фокусное расстояние у сферического зеркала равно половине радиуса кривизны

$F = \frac{R}{2}$, причем принято: у вогнутого зеркала $F > 0$, у выпуклого $F < 0$.

Изображение какого-либо предмета AB в сферическом зеркале можно построить с помощью следующих лучей (рис. 6.2.2):

- луч AOC , проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч COA идет по той же прямой;
- луч AFD , идущий через фокус зеркала; отраженный луч DA' идет параллельно главной оптической оси;

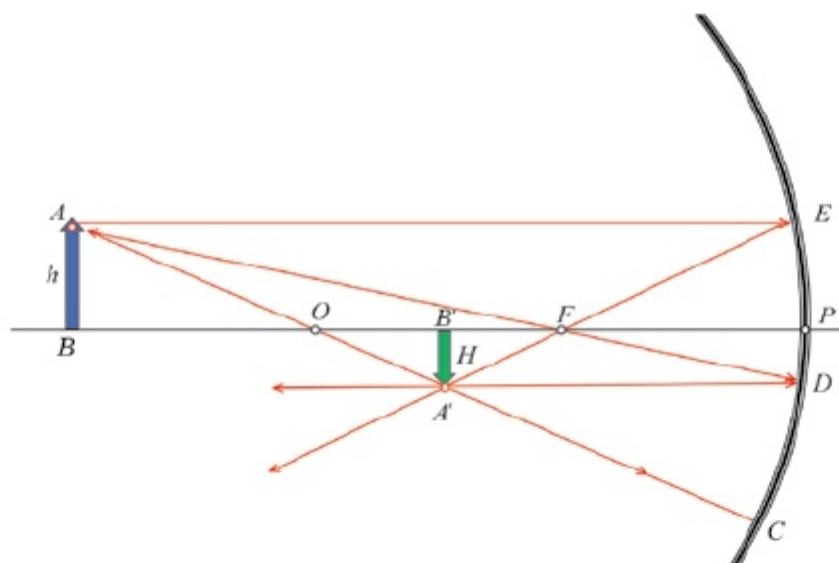


Рис. 6.2.2. Лучи, определяющие изображение предмета в сферическом зеркале

- луч AE , параллельный главной оптической оси; отраженный луч EFA' проходит через фокус зеркала.

3. Положение изображения и его размер можно определить с помощью

формулы сферического зеркала: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$, (6.2)

где d – расстояние от предмета до зеркала; f – расстояние от зеркала до изображения. Величины d и f подчиняются определенному правилу знаков:

- $d > 0$ и $f > 0$ – для действительных предметов и изображений;
- $d < 0$ и $f < 0$ – для мнимых предметов и изображений.

Для случая, изображенного на рис. 6.2.2, имеем: $F > 0$ (зеркало вогнутое), $d = 3F > 0$ (действительный предмет). По формуле сферического зеркала получаем: $f = \frac{3}{2}F > 0$. Следовательно, изображение *действительное*. Если бы на месте вогнутого зеркала стояло выпуклое зеркало с тем же по модулю фокусным расстоянием, мы получили бы следующий результат:

$$F < 0, d = -3F > 0, f = -\frac{3}{4}F < 0 - \text{изображение мнимое.}$$

Линейное увеличение сферического зеркала Γ определяется как отношение линейных размеров изображения H и предмета h . Величине H удобно приписывать определенный знак в зависимости от того, является изображение прямым ($H > 0$) или перевернутым ($H < 0$). Величина h всегда считается положительной. При таком определении линейное увеличение сферического зеркала выражается формулой, которую можно получить из подобия двух прямоугольных треугольников (ABP и $A'B'P$) с соответствующими катетами H и f ; h и d на рис. 6.2.2:

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \quad (6.3)$$

Задачи со сферическими зеркалами в целом разделяются на два огромных класса: *задачи на построение* и *задачи на формулу* для сферического зеркала.

Дополнительный материал



«Умное» зеркало – это необычный медианоситель, который предназначен для отбора и демонстрации рекламы на целевую аудиторию. Как только приближается человек, зеркало оживает и показывает видео, которое потенциально может заинтересовать подошедшего человека. В чудо-зеркало вмонтирована специальная система, которая распознает и обрабатывает изображение. Она определяет возраст, пол, эмоциональный настрой зрителя и демонстрирует на экране подходящий видеоролик.



Вопросы

1. Какое зеркало называется плоским? Как построить изображение точечного источника света в плоском зеркале?
2. Три точки, расположенные на одной прямой, отражаются в плоском зеркале. Будут ли изображения этих точек располагаться на одной прямой?
3. Какое зеркало называется сферическим? С помощью каких лучей следует построить изображение в сферическом зеркале?
4. Как определяется положение изображения и его размер в сферическом зеркале? Как определяется линейное увеличение сферического зеркала?



Задание (экспериментальное исследование)

1. Поставьте два обычных зеркала перпендикулярно друг другу и посмотрите на свое отражение от объединения. Опишите наблюдаемое.

- Установите соответствие между направлением луча света и углом к горизонту, под которым нужно поставить зеркало, чтобы этот луч после отражения был направлен горизонтально. Опишите наблюдаемое.
- На столе лежит зеркало. Как изменится изображение люстры в этом зеркале, если закрыть половину зеркала? Как изменится область, из которой можно увидеть изображение люстры?

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В комнате длиной $L = 5$ м и высотой $H = 3$ м на стене висит плоское зеркало. Человек смотрит в него, находясь на расстоянии $h = 1$ м от стены, на которой оно висит (рис. 6.2.3). Какова должна быть наименьшая высота l зеркала, чтобы человек мог видеть стену, находящуюся за его спиной, во всю высоту?

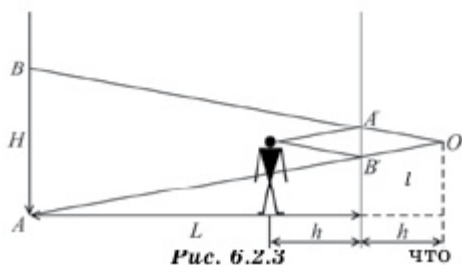


Рис. 6.2.3

Дано:

$$L = 5 \text{ м}$$

$$H = 3 \text{ м}$$

$$h = 1 \text{ м}$$

$$l - ?$$

Решение:

Из рисунка видно, что треугольники ABO и $A'B'O$ подобны. Из подобия этих треугольников следует,

$$\frac{l}{h} = \frac{H}{L+h}, \text{ откуда } l = \frac{Hh}{L+h}, l = \frac{3 \cdot 1}{5+1} = 0,5 \text{ (м).}$$

Ответ: $l = 0,5$ (м).

Задача 2. Расстояние между предметом и его изображением в выпуклом зеркале составляет 20 см, а уменьшение изображения равно 0,5 (рис. 6.2.4). Чему равны фокусное расстояние и радиус кривизны?

Дано:

$$l = 20 \text{ см}$$

$$\Gamma = 0,5$$

$$F - ?$$

$$R - ?$$

СИ

$$20 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Решение:

Построим изображение A_1B_1 предмета AB в выпуклом зеркале. Оно будет мнимым, прямым, уменьшенным. Его уменьшение:

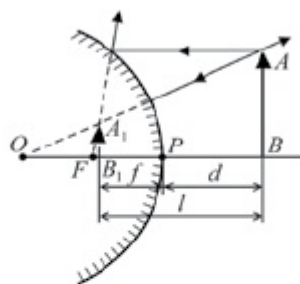


Рис. 6.2.4

$$\Gamma = \frac{f}{d}.$$

Согласно формуле выпуклого зеркала $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}$ или $\frac{1}{d} - \frac{1}{l-d} = -\frac{1}{F}$.

Определим F :
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{l-d} - \frac{1}{d} = \frac{d-l+d}{d(l-d)} = \frac{2d-l}{d(l-d)},$$

$$F = \frac{d(l-d)}{2d-l}.$$

Учитывая формулу для $d = \frac{l}{\Gamma+1}$,

$$F = \frac{l\left(l - \frac{l}{\Gamma+1}\right)}{(\Gamma+1)\left(2\frac{l}{\Gamma+1} - l\right)} = \frac{l^2\left(1 - \frac{1}{\Gamma+1}\right)}{l(2 - \Gamma - 1)} = \frac{l(\Gamma+1-1)}{(1-\Gamma)(1+\Gamma)},$$

$$F = \frac{l\Gamma}{1-\Gamma^2}. \text{ Радиус кривизны сферического сегмента: } R = 2F.$$

$$F = \frac{20 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5}{1 - 0,25} = 0,133 \text{ (м); } R = 2 \cdot 0,133 = 0,266 \text{ (м).}$$

Ответ: $F = 0,133$ (м); $R = 0,266$ (м).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.2.1. Под каким углом должен падать луч на плоское зеркало, чтобы отраженный луч был перпендикулярен падающему? (Ответ: 45° .)
- 6.2.2. Угол падения света на плоское зеркало равен 16° . Каков угол между отраженным лучом и зеркалом? (Ответ: 74° .)
- 6.2.3. Человек стоял перед плоским зеркалом, затем отошел от него на 1,5 м. На сколько увеличилось расстояние между человеком и его изображением? (Ответ: на 3 м.)

Уровень В

- 6.2.4. Человек ростом 1,5 м, стоящий на берегу озера, видит в небе по направлению, составляющему угол 60° с горизонтом, Луну. На каком расстоянии от себя увидит человек отражение Луны в воде озера? (Ответ: 87 см.)
- 6.2.5. Плоское зеркало движется по направлению к источнику света со скоростью 5 см/с. С какой скоростью движется изображение источника, создаваемое зеркалом? Плоскость зеркала перпендикулярна вектору скорости. (Ответ: 10 см/с.)
- 6.2.6. Два плоских зеркала располагаются под углом друг к другу, и между ними помещается точечный источник света. Расстояние от этого источника до одного зеркала составляет 3 см, до другого – 4 см. Расстояние между первыми изображениями равно 10 см. Найдите угол между зеркалами. (Ответ: 90° .)
- 6.2.7. Определите фокусное расстояние вогнутого сферического зеркала, если оно дает действительное изображение предмета, увеличенное в 4 раза. Расстояние между предметом и его изображением составляет 15 см. (Ответ: –4 см.)

- 6.2.8. Радиус кривизны вогнутого зеркала равен 40 см. Найдите положение предмета, при котором его изображение будет действительным и увеличенным в 2 раза; мнимым и увеличенным в 2 раза. (Ответ: -60 см; 20 см.)
Уровень С
- 6.2.9. На стене висит вертикальное зеркало высотой 1 м. Человек стоит на расстоянии 2 м от зеркала. Какова высота участка противоположной стены комнаты, который может увидеть в зеркале человек, не изменяя положения головы? Стена находится на расстоянии 4 м от зеркала. (Ответ: 3 м.)
- 6.2.10. Найдите число изображений точечного источника, полученных в двух плоских зеркалах, образующих друг с другом угол 60° . Источник находится на биссектрисе угла. (Ответ: 5.)
- 6.2.11. Предмет расположен на расстоянии 15 см от вершины вогнутого зеркала на его оптической оси. Изображение получилось на расстоянии 30 см от зеркала. Найдите, куда и на сколько сместится изображение, если предмет приблизить к зеркалу на 1 см. (Ответ: изображение сместится влево на 5 см.)
- 6.2.12. В качестве отражателя используют вогнутое сферическое зеркало диаметром 20 см с фокусным расстоянием 1 м. На каком расстоянии от зеркала нужно расположить точечный источник, чтобы лучи, отразившиеся от зеркала, образовали на стене пятно диаметром 4 см? Расстояние от зеркала до стены составляет 12 м. (Ответ: 1,11 м; 1,07 м.)

§ 6.3

Закон преломления света

1. На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т.е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, также меняя при этом направление распространения. **Преломлением света принято называть явление, при котором световые лучи, проходя через границу двух сред, изменяют первоначальное направление распространения.**

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас может убедить простое наблюдение. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если смотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону (рис. 6.3.1). Это явление объясняется изменением направления луча на границе двух сред – преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча (рис. 6.3.2), преломленного луча и перпендикуляра к поверхности раздела сред, восстановленного в точке падения. Угол α называется углом падения, угол γ – углом отражения, а угол β – углом преломления.



Рис. 6.3.1. Преломление предмета на границе раздела воздух – вода

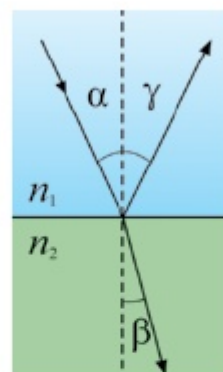


Рис. 6.3.2. Преломление светового луча на границе раздела двух сред

2. Закон преломления света был известен в Древней Греции, затем был установлен опытным путем в XVII веке. Выведем его с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в той и другой среде. Обозначим скорость волны в первой среде через v_1 , а во второй – через v_2 .

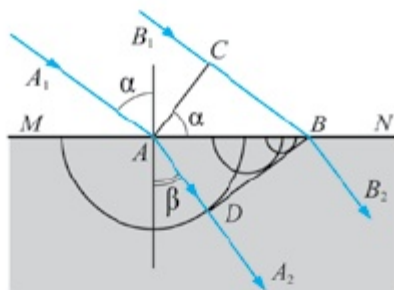


Рис. 6.3.3. Преломление параллельных лучей на границе раздела двух сред

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, из воздуха в воду) падает плоская световая волна (рис. 6.3.3). Волновая поверхность AC перпендикулярна лучам A_1A и B_1B . Поверхности MN сначала достигнет луч A_1A . Луч B_1B достигнет поверхности спустя время:

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

Поэтому в момент, когда вторичная волна в точке B только начнет возбуждаться, волна от точки A уже имеет вид полусферы радиусом: $AD = v_2 \Delta t$.

Волновую поверхность преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем вторичным волнам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. В данном случае это плоскость BD . Она является огибающей вторичных волн.

Угол падения α луча равен $\angle CAB$ в треугольнике ABC (стороны одного из этих углов перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (6.4)$$

Угол преломления β равен $\angle ABD$ треугольника ABD . Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (6.5)$$

Разделив почленно (6.4) на (6.5), получим уравнение:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (6.6)$$

где n – постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Исходя из вышеприведенных результатов, сможем сформулировать закон преломления света: *падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред.*

3. *Постоянная величина, входящая в закон преломления света, называется относительным показателем преломления (кратко показателем преломления), или показателем преломления второй среды относительно первой.*

Из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но и раскрывается **физический смысл показателя преломления**. Действительно, показатель преломления равен отношению скоростей света в двух средах, на границе которых происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \quad (6.7)$$

Если угол преломления β меньше угла падения α , то согласно (6.6) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления этой среды. Он равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду.

Пользуясь формулой (6.7), можно выразить *относительный показатель преломления n* через *абсолютные показатели n_1 и n_2* первой и второй сред:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6.8)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть оптически менее плотной средой.

Исходя из вышеприведенных утверждений, закон преломления света можно сформулировать и таким образом: *преломленный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль (перпендикуляр) к поверхности раздела двух сред; при этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления, а также отношение абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды равны и постоянны:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n = \text{const}, \quad (6.6')$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй сред.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физического состояния среды, т.е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от характеристик самого света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого – меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведенных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух – твердое тело или воздух – жидкость, а не через границу вакуум – среда.

Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен примерно $n_1 = 1,000292 \approx 1$. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2.$$

С помощью закона преломления света можно *рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме*, изготовленной из стекла или другого прозрачного материала.

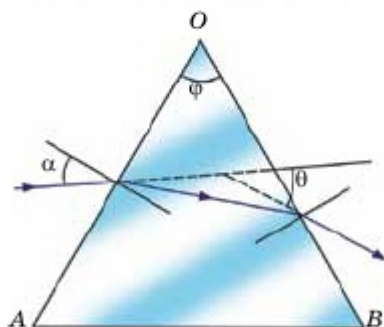


Рис. 6.3.4. Преломление луча на гранях призмы

из стекла или другого прозрачного материала.

На рис. 6.3.4 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной ее боковым ребрам. Луч в призме отклоняется к основанию, преломляясь на гранях OA и OB . Угол φ между этими гранями называют *преломляющим углом призмы*. Угол θ отклонения луча зависит от преломляющего угла φ призмы, показателя преломления n , материала призмы и угла падения α .

Он может быть вычислен с помощью закона преломления (см. формулу (6.6)). При малых углах α и φ его можно приблизительно вычислить по формуле:

$$\theta \approx (n - 1) \varphi, \quad (6.9)$$

где n – относительный показатель преломления.



Вопросы

1. Какое явление называется преломлением света? Почему карандаш, поставленный в стакан с водой, кажется согнутым?
2. Как формулируется закон преломления света? Какая связь существует между углами падения и преломления, с одной стороны, а также между абсолютными показателями первой и второй сред, с другой стороны?
3. Какие показатели преломления называются относительными и абсолютными? Каков их физический смысл?
4. Какую среду называют оптически менее плотной? Если луч переходит из среды оптически менее плотной в среду более плотную, что происходит с углом преломления?
5. Где находит применение закон преломления света? Объясните на примере треугольной призмы.



Задание (экспериментальное исследование)

Проведите наблюдение преломления света в струе воды. Опишите наблюдение.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Луч падает на поверхность стекла под углом $\alpha_1 = 60^\circ$. Под каким углом α_2 он должен упасть на поверхность воды, чтобы угол преломления в стекле был равен углу преломления в воде? Показатель преломления стекла $n_1 = 1,5$, показатель преломления воды $n_2 = 1,33$.

Д а н о:

$$\alpha_1 = 60^\circ$$

$$n_1 = 1,5$$

$$n_2 = 1,33$$

$$\beta_1 = \beta_2$$

$$\alpha_2 = ?$$

Р е ш е н и е:

Запишем закон преломления применительно к воде и стеклу:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n_1 \text{ и } \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = n_2, \text{ откуда}$$

$$\sin \beta_1 = \frac{\sin \alpha_1}{n_1} \text{ и } \sin \beta_2 = \frac{\sin \alpha_2}{n_2}.$$

Так как $\beta_1 = \beta_2$ и $\sin \beta_1 = \sin \beta_2$ или $\frac{\sin \alpha_1}{n_1} = \frac{\sin \alpha_2}{n_2}$,

$$\text{откуда } \sin \alpha_2 = \frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_1 \text{ и } \alpha_2 = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \alpha_1 \right),$$

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{1,33}{1,5} \sin 60^\circ \right) = 49^\circ.$$

О т в е т: $\alpha_2 = 49^\circ$.



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.3.1. Определите показатель преломления стекла для фиолетового света, если его длина волны в воздухе равна $3,97 \cdot 10^{-7}$ м, а в стекле – $2,32 \cdot 10^{-7}$ м. (Ответ: 1,7.)
- 6.3.2. Абсолютные показатели преломления алмаза и стекла соответственно равны 2,42 и 1,5. Во сколько раз толщина стекла больше толщины алмаза, если время распространения света в них одинаково? (Ответ: в 1,6 раза.)
- 6.3.3. Под каким углом световой луч падает на плоскую поверхность стекла, если отраженный и преломленный лучи образуют между собой прямой угол? Скорость света в стекле составляет $2 \cdot 10^8$ м/с. (Ответ: 56° .)
- 6.3.4. Луч света выходит из призмы под тем же углом, под каким входит в призму, причем отклоняется от первоначального направления на угол 15° , преломляющий угол призмы 45° . Найдите показатель преломления материала призмы. (Ответ: 1,3.)

Уровень В

- 6.3.5. Кажущаяся глубина водоема, если смотреть по вертикали вниз, равна 0,9 м. Определите истинную глубину этого водоема. Показатель преломления воды равен 1,33. (Ответ: 1,2 м.)
- 6.3.6. На стеклянную трехгранную призму с преломляющим углом 45° падает луч света и выходит из нее под углом 30° . Найдите угол падения луча на призму. Показатель преломления стекла равен 1,5. (Ответ: 40° .)

6.3.7. У призмы с показателем преломления 1,41 и преломляющим углом 30° одна грань посеребрена. Луч света падает на непосеребренную грань под углом 45° и после отражения выходит из призмы через эту же грань. Найдите угол между падающим и выходящим лучами. (Ответ: $0,17^\circ$.)

Уровень С

6.3.8. На поверхности водоема глубиной 5 м плавает фанерный круг радиусом 1 м, над центром которого на высоте 2 м расположен точечный источник света. Определите радиус тени на дне водоема от круга. Показатель преломления воды равен 1,33. (Ответ: 2,8 м.)

6.3.9. На дне ручья лежит камешек, турист решил достать его. Прицелившись, он опустил руку в воду под углом 45° к поверхности. На каком расстоянии от камешка рука коснется дна ручья, если его глубина равна 32 см? Показатель преломления воды составляет $\frac{4}{3}$. (Ответ: 12 см.)

6.3.10. Луч света падает под углом 58° на поверхность воды, налитой слоем толщины 10 мм в стеклянное блюдо с плоскопараллельным дном. Показатель преломления воды составляет 1,33. Найдите показатель преломления стекла блюда, если вышедший под блюдцем луч смещен относительно падающего на расстояние 6,2 мм, а в стекле луч проходит путь, равный 5 мм. (Ответ: 1,55.)

§ 6.4

Полное внутреннее отражение

1. При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например, из воздуха в стекло или воду, то $v_1 > v_2$ и, следовательно, согласно закону преломления (6.6), показатель преломления $n > 1$. Поэтому $\alpha > \beta$, в результате преломления луч приближается к нормали, к границе раздела сред (рис. 6.4.1).

А если свет проходит из оптически более плотной среды в менее плотную среду (рис. 6.4.1), то $\alpha < \beta$ и закон преломления принимает следующий вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}. \quad (6.10)$$

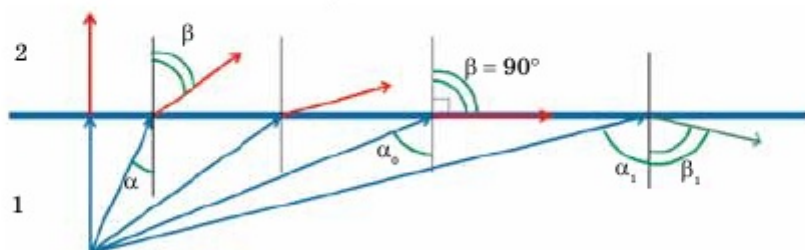


Рис. 6.4.1. Преломление света при переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду

В этом случае $\alpha < \beta$, т.е. преломленный луч отклоняется на сей раз от нормали (рис. 6.4.1). По мере увеличения угла α угол преломления β также увеличивается, оставаясь все время больше угла α . Наконец, при некотором угле падения α значение угла преломления β приблизится к 90° и преломленный луч будет направлен почти по границе раздела двух сред (рис. 6.4.1). Наибольшему возможному углу преломления $\beta = 90^\circ$ соответствует угол падения α_0 .

Полным внутренним отражением света называется отражение всего светового излучения при его падении на границу раздела двух прозрачных сред из среды с большим показателем преломления, когда угол падения превосходит некоторый предельный угол α_0 .

2. Для наблюдения полного внутреннего отражения света можно использовать стеклянный полуцилиндр с матовой плоской поверхностью. Полуцилиндр закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпадала с центром диска (рис. 6.4.2). Узкий пучок света от осветителя направляют на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности, т.е. вдоль радиуса. На этой поверхности луч не преломляется. На плоской поверхности луч частично преломляется и частично отражается. Отражение происходит в соответствии с законом отражения, а преломление – в соответствии с законом преломления.

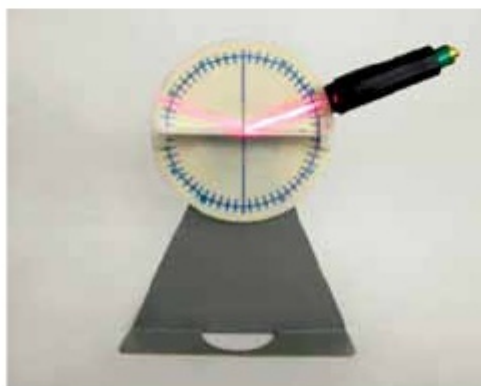


Рис. 6.4.2. Прибор для исследования отражения света

Если увеличивать угол падения, то можно заметить, что яркость (и следовательно, энергия) отраженного пучка усиливается, в то время как яркость (энергия) преломленного пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломленного пучка, когда угол преломления приближается к 90° . Наконец, когда угол падения становится α_0 , преломленный пучок идет вдоль границы раздела двух сред, при этом доля отраженной энергии составляет почти 100%. Если дальше повернем осветитель, увеличив угол падения, то увидим, что преломленный пучок полностью исчезает и весь свет отражается от границы раздела двух сред, т.е. происходит полное внутреннее отражение света.

На рис. 6.4.3 изображен пучок лучей от источника, помещенного в воде недалеко от ее поверхности, где показана область, в которой происходит полное внутреннее отражение света.

Угол падения α_0 , соответствующий углу преломления 90° , называют предельным углом полного отражения. При $\sin \beta = 1$ формула (6.10) принимает вид

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (6.11)$$

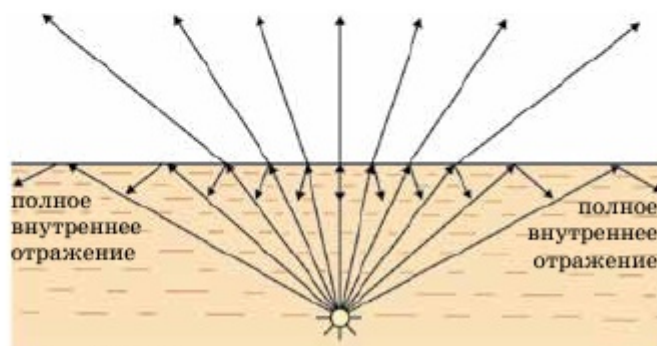


Рис. 6.4.3. Отражения светового пучка, исходящего из источника в воде

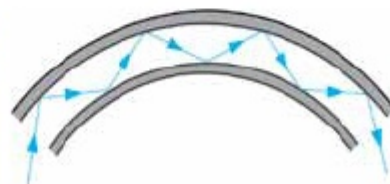


Рис. 6.4.4. Световод

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения α_0 . Для воды ($n = 1,33$) оно равно $48^\circ 35'$, для стекла ($n = 1,5$) принимает значение $41^\circ 51'$, а для алмаза ($n = 2,42$) составляет $24^\circ 40'$. Во всех случаях второй средой является воздух.

3. Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду и поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать ее снизу сквозь стенку, кажется блестящей, словно посеребрянной, вследствие полного отражения света.

Во многих приборах, например, в биноклях, полное внутреннее отражение используется при отражении света в призмах. Преимущество состоит в том, что при этом отражается почти 100% света и изображение получается более ярким.

Полное внутреннее отражение света используют в так называемой **волоконной оптике** для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон – **световодов** (оптическое волокно). **Световод** (оптическое волокно) представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 6.4.4). Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды. Из оптических волокон изготавливают кабели (рис. 6.4.5) для оптоволоконной связи.



Рис. 6.4.5. Кабели волоконной оптики

Например, в г. Атырау имеется завод по выпуску оптоволоконного кабеля, покрывающий до 30% потребности всего Казахстана в оптоволоконной продукции. Оптоволоконная связь применяется для телефонной связи и высокоскоростного интернета.

4. Оптическое волокно в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи информации, а также самой перспективной средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Оптоволоконный кабель обеспечивает большую пропускную способность: до 10 Гбит/с и выше. Это лучшие показатели, чем у медного кабеля. Оптика полностью устойчива к радио- и электромагнитным излучениям, взаимным помехам, проблемам с сопротивлением и многим другим факторам. Оптоволоконный кабель можно прокладывать рядом с промышленным оборудованием без каких-либо опасений. С оптоволоконным кабелем вся ваша информация находится в безопасности. Сигнал, передаваемый по оптике, не излучается и его очень сложно перехватить.

Важное свойство оптического волокна – долговечность. Время жизни волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет проложить оптоволоконный кабель один раз и по мере необходимости наращивать пропускную способность канала путем замены приемников и передатчиков на более быстродействующие без замены самого кабеля.

**Вопросы**

1. Что называется полным внутренним отражением света?
2. Может ли возникнуть явление полного внутреннего отражения, если свет проходит из воды в стекло?
3. При каком условии наблюдается полное внутреннее отражение?
4. Где используется полное внутреннее отражение?
5. В чем заключается принцип работы световода? Каковы преимущества кабелей волоконной оптики?
6. Для чего необходима огранка камней в ювелирном деле?

**Задание (теоретическое исследование)**

Рассмотрите рефракцию света в атмосфере. Исследуйте причины возникновения миражей. Где их можно наблюдать? Результаты наблюдения и исследования оформите в виде реферата.

**Задание (экспериментальное исследование)**

Опустите пластину из оргстекла в сосуд с прозрачными стенками, а затем залейте в сосуд подсолнечное масло. Опишите наблюдаемое.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача. Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол отражения для этого луча равен $42^{\circ}23'$. Найдите скорость распространения света в скипидаре.

$$\begin{array}{l} \text{Дано:} \\ \alpha_0 = 42^{\circ}23' \\ v_{ск} = ? \end{array}$$

Решение:

При полном внутреннем отражении угол преломления равен 90° .

$$\text{По закону преломления: } \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_{ск}}{c}, \quad v_{ск} = c \sin \alpha_0.$$

$$v_{ск} = 3 \cdot 10^8 \sin 42^{\circ}23' = 2,02 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}.$$

О т в е т: $v_{ск} = 2,02 \cdot 10^8 \text{ (м/с)}$.

**ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ****Уровень А**

- 6.4.1. Вычислите предельный угол полного внутреннего отражения для каменной соли, абсолютный показатель преломления которой равен 1,54. (*Ответ:* $40,5^{\circ}$.)

6.4.2. Луч света выходит из жидкости в воздух. Предельный угол полного внутреннего отражения составляет 45° . Определите скорость распространения света в жидкости. (Ответ: $2,1 \cdot 10^8$ м/с.)

6.4.3. Луч света, идущий из толщи воды, претерпевает полное внутреннее отражение на ее поверхности. Выйдет ли луч в воздух, если на поверхность воды вылить слой кедрового масла?

Уровень В

6.4.4. Точечный источник света расположен на дне водоема глубиной 3 м. Определите максимальный путь, который свет проходит в воде до выхода

в воздух. Относительный показатель преломления воды составляет $\frac{4}{3}$.

(Ответ: 4,5 м.)

6.4.5. В стекле имеется воздушная сферическая полость радиусом 15 мм. На полость падает широкий пучок, параллельный лучам света. Определите радиус светового пучка, который проникает в полость. Показатель преломления стекла – 1,5. (Ответ: 10 мм.)

6.4.6. Определите показатель преломления и скорость света в слюде, если при угле падения 54° угол преломления равен 30° . Найдите предельный угол полного внутреннего отражения для слюды. (Ответ: 1,62; $1,85 \cdot 10^8$ м/с; 38° .)

Уровень С

6.4.7. Луч света падает на поверхность стеклянной призмы, перпендикулярной ей. При каком минимальном значении преломляющего угла призмы свет будет испытывать полное внутреннее отражение на второй поверхности? Показатель преломления стекла равен 1,5. (Ответ: 42° .)

6.4.8. На поверхности жидкости с показателем преломления $\sqrt{2}$ плавает черный диск радиусом 80 см. Под диском вдоль его оси с глубины 1 м начинается подниматься вертикально вверх с постоянной скоростью 5 мм/с точечный источник света. Через какое время источник перестанет быть видимым для внешнего наблюдателя? (Ответ: 40 с.)

6.4.9. Световод представляет собой длинную тонкую нить из однородного прозрачного материала с показателем преломления, равным 1,2. Вблизи одного из торцов находится источник света S , другой торец размещен на расстоянии 50 см от экрана. Найдите диаметр d светового пятна на экране. (Ответ: 88,6 см.)

6.4.10. Длинная, очень тонкая прямая нить – световод – изготовлена из прозрачного материала с показателем преломления $n = \sqrt{1,25}$. Один из концов нити прижат к источнику рассеянного света. Другой конец нити размещен на расстоянии 7 см от расположенного перпендикулярно световоду экрана. Найдите диаметр светового пятна на экране. Считать, что диаметр световода много меньше, чем диаметр светового пятна. (Ответ: 8,1 см.)

Лабораторная работа № 5.

Определение показателя преломления стекла

Цель работы: измерить показатель преломления стекла с помощью плоскопараллельной пластинки.

Необходимое оборудование: 1) плоскопараллельная пластинка со скошенными гранями; 2) линейка измерительная; 3) угольник ученический.

Краткая теория. Метод измерения показателя преломления с помощью плоскопараллельной пластинки основан на том, что луч, прошедший плоскопараллельную пластинку, выходит из нее параллельно направлению падения.

Согласно закону преломления показателя преломления среды:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (1)$$

Для вычисления $\sin \alpha$ и $\sin \beta$ на листе бумаги проводят две параллельные прямые AB и CD на расстоянии 5–10 мм друг от друга и кладут на них стеклянную пластинку так, чтобы ее параллельные грани были перпендикулярны этим линиям. При таком расположении пластинки параллельные прямые не смещаются (рис. 6.4.6, а).

Располагают глаз на уровне стола и, следя за прямыми AB и CD сквозь стекло, поворачивают пластинку вокруг вертикальной оси против часовой стрелки (рис. 6.4.6, б). Поворот осуществляют до тех пор, пока луч QC будет казаться продолжением BM и MQ .

Для обработки результатов измерений обводят карандашом контуры пластинки, отмечают точки входа и выхода лучей и снимают ее с бумаги. Через точку M проводят перпендикуляр O_1O_2 к параллельным граням пластинки и прямую MF .

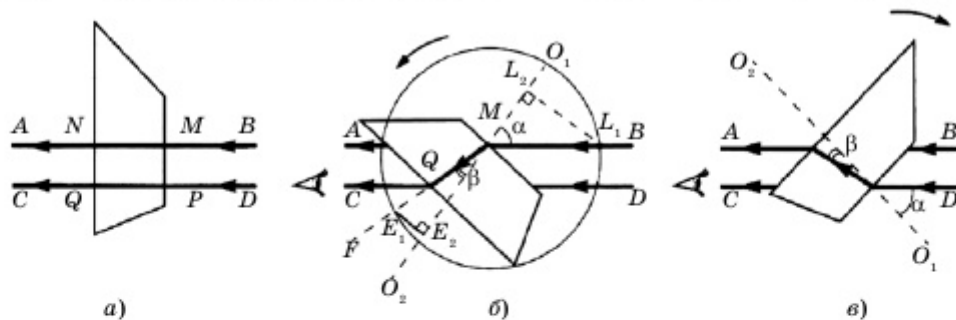


Рис. 6.4.6

Затем на прямых BM и MF откладывают равные отрезки $ME_1 = ML_1$ и опускают с помощью угольника из точек L_1 и E_1 перпендикуляры L_1L_2 и E_1E_2 на прямую O_1O_2 . Из прямоугольных треугольников L_1L_2M и E_1E_2M находим $\sin \alpha = \frac{L_1L_2}{ML_1}$, а $\sin \beta = \frac{E_1E_2}{ME_1}$.

Следовательно,

$$n = \frac{L_1L_2}{E_1E_2}, \quad (2)$$

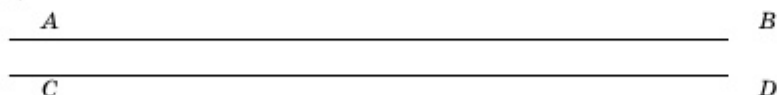
т.е. измерение коэффициента преломления сводится к измерению линейкой длин отрезков $L_1 L_2$ и $E_1 E_2$.

Отметим и другой способ построения рассмотренных выше прямоугольных треугольников, например: можно с помощью циркуля построить окружность с центром в точке M и радиусом ME_1 , а затем построить с помощью треугольника прямоугольные треугольники $L_1 L_2 M$ и $E_1 E_2 M$.

Аналогичные построения можно сделать и при повороте плоскопараллельной пластинки по часовой стрелке (рис. 1, в) и найти второе числовое значение показателя преломления стекла. Тогда за окончательный результат берут их среднее значение.

Порядок работы:

1. Положите ребром плоскопараллельную пластинку на параллельные прямые AB и CD .



а) Сначала ориентируйте параллельные грани пластинки перпендикулярно AB и CD . Убедитесь, что параллельные линии при этом не смещаются.

б) Расположите глаз на уровне стола и, следя за линиями AB и CD сквозь стекло, поворачивайте пластинку вокруг вертикальной оси против часовой стрелки до тех пор, пока луч QC не будет казаться продолжением BM и MQ .

2. Обведите карандашом контуры пластинки, после чего снимите ее с бумаги.

3. Через точку M (см. рис. 6.4.б, б) проведите с помощью угольника перпендикуляр $O_1 O_2$ к параллельным граням пластинки и прямую MF (продолжение MQ).

4. С центром в точке M проведите окружность произвольного радиуса, отметьте на прямых BM и MF точки L_1 и E_1 ($ML_1 = ME_1$).

5. Опустите с помощью угольника перпендикуляры из точек L_1 и E_1 на прямую $O_1 O_2$.

6. Измерьте линейкой длину отрезка $L_1 L_2$.

$$L_1 L_2 = a \quad ; \quad \Delta a =$$

7. Запишите окончательный результат измерения.

$$a \pm \Delta a =$$

8. Измерьте линейкой длину отрезка $E_1 E_2$.

$$E_1 E_2 = b \quad ; \quad \Delta b =$$

9. Запишите окончательный результат измерения.

$$b \pm \Delta b =$$

10. Рассчитайте показатель преломления стекла.

$$n = \frac{L_1 L_2}{E_1 E_2} = \frac{a}{b} =$$

11. Найдите абсолютную погрешность измерения показателя преломления стекла.

$$\Delta n = n \cdot \varepsilon = n \left(\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \right) = b \Delta a + a \Delta b =$$

12. Запишите окончательный результат измерения коэффициента преломления стекла.

$$n \pm \Delta n =$$

§ 6.5

Построение изображения в системах линз. Формула тонкой линзы. Оптические приборы

Линза является одним из величайших изобретений человечества. Линза позволила еще в XVII в., с одной стороны, создать телескоп и разрушить представления о том, что Земля – центр Вселенной, с другой – создать микроскоп и открыть микроорганизмы.

Линзами называются прозрачные тела, ограниченные с двух сторон сферическими поверхностями (рис. 6.5.1).

Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то она называется **тонкой линзой**. Главное свойство тонких линз заключается в том, что все приосевые лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета и прошедшие сквозь тонкую линзу, собираются этой линзой снова в одной точке.

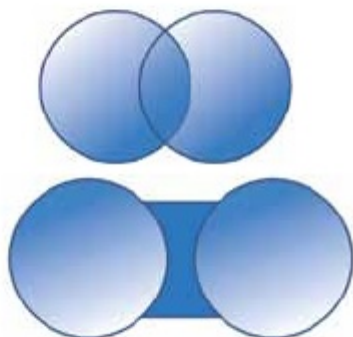


Рис. 6.5.1. Линзы выпуклые и вогнутые

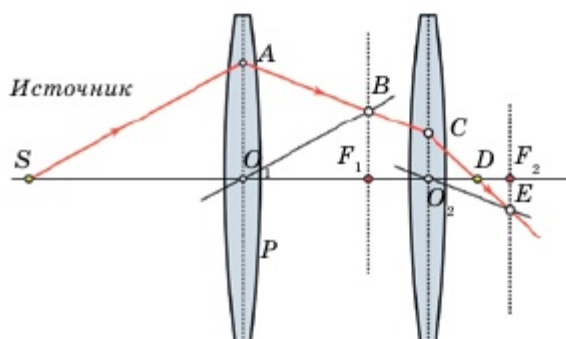


Рис. 6.5.2. Ход лучей в системе линз

В реальных оптических системах обычно используют систему линз, изображение в которых получают построением хода луча в первой линзе, а затем во второй и т.д.

Ход лучей в системе линз строится теми же методами, что и для одной линзы. Рассмотрим систему из двух линз, одна из которых имеет фокусное расстояние O_1F_1 , а вторая – O_2F_2 (рис. 6.5.2). Строим путь SAB для первой линзы и продолжаем отрезок AB до вхождения во вторую линзу в точке C .

Из точки O_2 строим луч O_2E , параллельный AB . При пересечении с фокальной плоскостью второй линзы этот луч даст точку E . Согласно второму свойству тонкой линзы луч AB после прохождения через вторую линзу пойдет по пути CE . Пересечение этой линии с оптической осью второй линзы даст точку D , где сфокусируются все лучи, вышедшие из источника S и прошедшие через обе линзы.

Изображение предмета, даваемое первой линзой, служит предметом (действительным или мнимым) для второй линзы, которая строит второе изображение предмета. Это второе изображение также может быть действительным или мнимым. Расчет оптической системы из двух тонких линз сводится к двукратному применению формулы линзы.

Линзы можно комбинировать друг с другом для построения сложных оптических систем. Оптическая сила D системы из двух линз может быть найдена как простая сумма оптических сил каждой линзы (при условии, что обе линзы можно считать тонкими и они расположены вплотную друг к другу на одной оси):

$$D = D_1 + D_2, \text{ или } \frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}. \quad (6.12)$$

Если линзы расположены на некотором расстоянии друг от друга и их оси совпадают (система из произвольного числа линз, обладающих таким свойством, называется *центрированной системой*), то их общую оптическую силу с достаточной степенью точности можно найти из следующего выражения:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} - \frac{L}{F_1 F_2}, \quad (6.13)$$

где L – расстояние между главными плоскостями линз.

Наиболее известными примерами систем, в которых используются сразу несколько линз, являются микроскоп, телескоп, которые будут рассмотрены далее.

Чем ближе к линзе ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше оптическая сила линзы. Оптическая сила D линзы зависит как от радиусов кривизны R_1 и R_2 ее сферических поверхностей, так и от показателя преломления ее вещества относительно окружающей среды n . В оптике доказывается следующая формула:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (6.14)$$

Радиус кривизны выпуклой поверхности считается положительным, вогнутой – отрицательным. Эта формула используется при изготовлении линз с заданной оптической силой.

2. Оптические приборы сложными комбинациями собирающих и рассеивающих линз открыли человеку два мира – *космический* с его огромными протяженностями и *микроскопический*, населенный мельчайшими организмами.

Оптические приборы – это устройства, в которых свет от изучаемого объекта с помощью системы линз преобразуется (преломляется, отражается).

По своему назначению оптические приборы, вооружающие глаз, можно разбить на следующие две большие группы:

- 1) приборы, служащие для рассматривания очень мелких предметов (лупа, микроскоп), которые зрительно увеличивают рассматриваемые предметы;
- 2) приборы, предназначенные для рассматривания удаленных объектов (зрительная труба, бинокль, телескоп и т.п.), которые зрительно приближают рассматриваемые предметы.

Отношение угла зрения φ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом называется **угловым увеличением**:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi}. \quad (6.15)$$

Угловое увеличение является важной характеристикой оптических приборов для визуальных наблюдений.



Рис. 6.5.3. Лупа

Самым простым оптическим прибором для визуальных наблюдений является **лупа** (рис. 6.5.3). Лупы, изобретенные в XVII веке нидерландским естествоиспытателем А. Левенгуком, давали увеличение в 300 раз.

Принцип действия лупы основан на использовании свойства собирающей линзы создавать мнимое, прямое, увеличенное изображение.

Предмет виден через лупу (рис. 6.5.4, б) под углом $\varphi = \frac{h}{F}$ (так как угол φ – очень малая величина $\text{tg } \varphi = h/F \approx \varphi$), где h – размер предмета; F – фокусное расстояние лупы. При рассматривании этого же предмета невооруженным глазом его следует расположить на расстоянии $d_0 = 25$ см – наилучшего зрения нормального глаза. Предмет при этом будет виден под углом (рис. 6.5.4, а):

$$\psi = \frac{h}{d_0}. \quad (6.16)$$

Отсюда следует, что **угловое увеличение лупы** равно $\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{d_0}{F}$. (6.17)

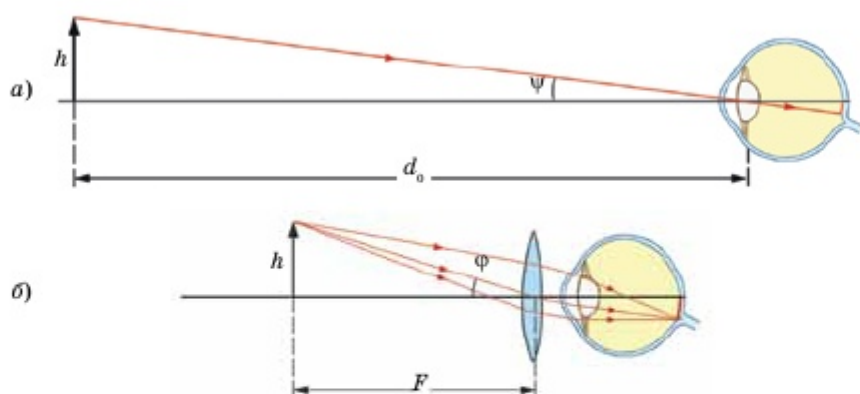


Рис. 6.5.4. Ход лучей при просмотре предмета без лупы (а) и с лупой (б)

Микроскоп применяют для получения больших увеличений при наблюдении мелких предметов. Увеличенное изображение предмета в микроскопе получается с помощью оптической системы, состоящей из двух короткофокусных линз – объектива O_1 и окуляра O_2 (рис. 6.5.6). Объектив даст действительное перевернутое увеличенное изображение предмета. Это промежуточное изображение рассматривается глазом через окуляр, действие которого аналогично действию лупы. Окуляр располагают так, чтобы промежуточное изображение находилось в его фокальной плоскости; в этом случае лучи от любой точки предмета распространяются после окуляра параллельным пучком. Мнимое изображение предмета, рассматриваемое через окуляр, всегда перевернуто. Если же это оказывается неудобным (например, при прочтении мелкого шрифта), можно перевернуть сам предмет перед объективом. Поэтому угловое увеличение микроскопа принято считать положительной величиной.

Как следует из рис. 6.5.6 (где ход лучей показан красным цветом), угол зрения φ предмета, рассматриваемого через окуляр в приближении малых углов,

$$\varphi = \frac{h'}{F_2} = \frac{f \cdot h}{d \cdot F_2}.$$

Приближенно можно предположить, что $d \approx F_1$ и $f \approx l$, где l – расстояние между объективом и окуляром микроскопа («длина тубуса»).



Рис. 6.5.5. Микроскоп

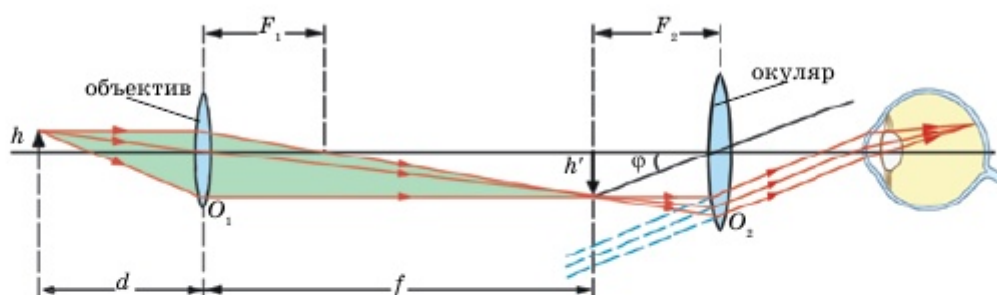


Рис. 6.5.6. Ход лучей в микроскопе

При рассмотрении того же предмета невооруженным глазом согласно формуле (6.16) угол видимости равен: $\psi = \frac{h}{d_0}$. В результате **формула для углового увеличения микроскопа** приобретает вид

$$\gamma = \frac{\phi}{\psi} = \frac{l \cdot d_0}{F_1 \cdot F_2}. \quad (6.18)$$

Хороший микроскоп может давать увеличение в несколько сотен раз. При больших увеличениях начинают проявляться дифракционные явления.

В 1609 г. Галилео Галилей на основании дошедших до него сведений об изобретенной в Голландии зрительной трубе строит свой первый телескоп, дающий приблизительно трехкратное увеличение. Вскоре ученый построил телескоп с увеличением в 32 раза, и с помощью него были обнаружены горы, кратеры на Луне и пятна на Солнце; открыты четыре спутника Юпитера; фазы Венеры.

Зрительные трубы бывают двух типов:

- зрительная труба Кеплера, предназначенная для астрономических наблюдений. Она дает увеличенные перевернутые изображения удаленных предметов и поэтому неудобна для земных наблюдений;
- зрительная труба Галилея, предназначенная для земных наблюдений, дающая увеличенные прямые изображения. Окулярюм в трубе Галилея служит рассеивающая линза.

Телескопы (зрительные трубы) предназначены для наблюдения удаленных объектов. Они состоят из двух линз – обращенной к предмету собирающей линзы с большим фокусным расстоянием (объектив) и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляр), обращенной к наблюдателю. Например, современные телескопы используются для наблюдений за звездами и космосом в Тянь-Шаньской астрономической обсерватории (рис. 6.5.7), в обсерватории Ассы-Тургень (рис. 6.5.8), действующих в Алматинской области.



Рис. 6.5.7. Телескоп Тянь-Шаньской обсерватории



Рис. 6.5.8. Ассы-Тургенская обсерватория

На рис. 6.5.9 красным цветом изображен ход лучей в астрономическом телескопе. Предполагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность, поэтому лучи от каждой точки удаленного предмета выходят из окуляра параллельным пучком. Такой ход лучей называется *телескопическим*. В астрономической трубе телескопический ход лучей достигается при условии, что расстояние между объективом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний $l = F_1 + F_2$. Зрительную трубу (телескоп) принято характеризовать *угловым увеличением* γ .

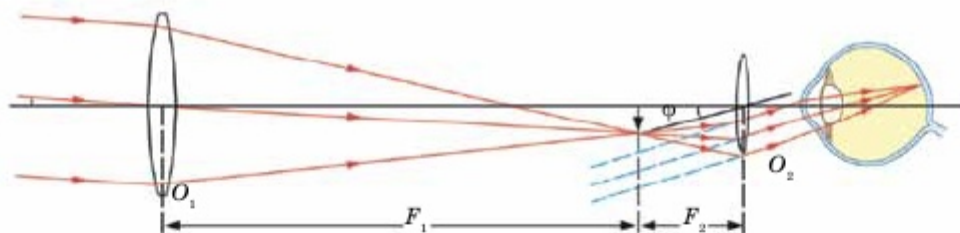


Рис. 6.5.9. Ход лучей в астрономическом телескопе

В отличие от микроскопа, предметы, наблюдаемые в телескоп, всегда удалены от наблюдателя. Если удаленный предмет виден невооруженным глазом под углом ψ , а при наблюдении через телескоп под углом φ , то угловым увеличением называют отношение $\gamma = \frac{\varphi}{\psi}$. Угловому увеличению γ , как и линейному увеличению Γ , можно приписать знаки плюс и минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Угловое увеличение астрономической трубы Кеплера отрицательно, а земной трубы Галилея – положительно. *Угловое увеличение зрительных труб* выражается через фокусные расстояния:

$$\gamma = \frac{F_1}{F_2}. \quad (6.19)$$

В качестве объектива в больших астрономических телескопах применяются не линзы, а сферические зеркала. Такие телескопы называются *рефлекторами*.

**Дополнительный материал**

У рыб-четырёхглазок на самом деле по два глаза, однако каждый из них разделен горизонтальной перепонкой. Благодаря этому четырёхглазки могут плавать у самой поверхности воды и видеть как над, так и под водой – единственные из всех позвоночных. Не мешают такому зрению и разные коэффициенты преломления света в воздухе и воде: специально для этого верхняя и нижняя половинки глазных линз изогнуты по-разному.

**Вопросы**

1. Какой предмет называется линзой? Какую линзу называют собирающей, рассеивающей?
2. Как проходят лучи света от источника в системе из двух тонких линз?
3. Как определяется оптическая сила системы из двух линз?
4. Зависит ли фокусное расстояние линзы от показателя преломления среды, в которой она находится? Как в этом случае определяется оптическая сила линзы?
5. Какие приборы относятся к оптическим? Каковы их особенности?
6. Как определить угловое увеличение линзы, микроскопа, телескопа?
7. Как можно строить и объяснять ход лучей в лупе, микроскопе и телескопе?

**Задание (теоретическое исследование)**

1. Дайте определение фокусного расстояния с помощью Солнца.
2. Исследуйте принцип действия астрономической зрительной трубы Кеплера и зрительной трубы Галилея.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Система состоит из двух линз с одинаковыми по модулю фокусными расстояниями. Одна из линз собирающая, другая – рассеивающая. Линзы расположены на одной оси на некотором расстоянии друг от друга. Известно, что если поменять линзы местами, то действительное изображение Луны, даваемое этой системой, сместится на $l = 20$ см. Найдите фокусное расстояние каждой из линз.

Д а н о:

 $l = 20$ см $F = ?$

Р е ш е н и е:

Рассмотрим случай, когда параллельные лучи 1 и 2 падают на рассеивающую линзу (рис. 6.5.10). После преломления их продолжения пересекаются в точке S , являющейся фокусом рассеивающей линзы. Точка S является «предметом» для собирающей линзы.

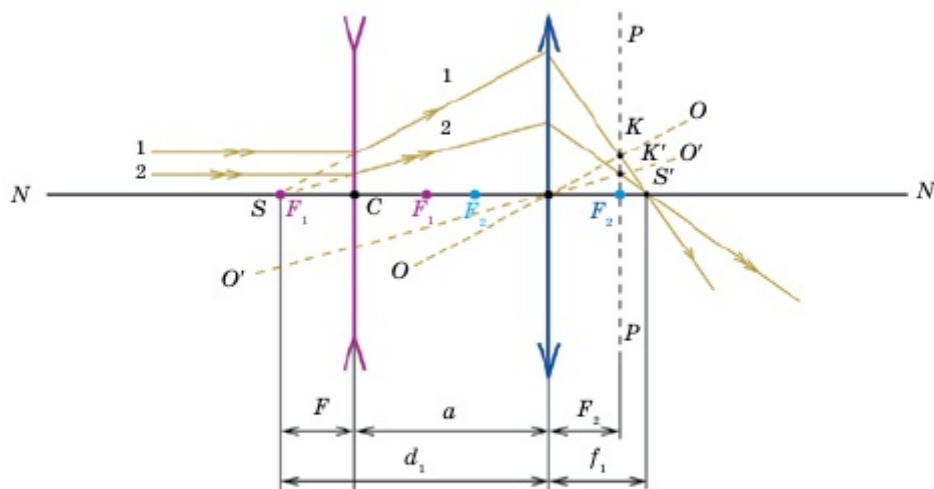


Рис. 6.5.10. Ход лучей в линзе

Ее изображение в собирающей линзе получим по правилам построения: лучи 1 и 2, падающие на собирающую линзу, после преломления проходят через точки пересечения соответствующих побочных оптических осей OO и $O'O'$ с фокальной плоскостью PP собирающей линзы и пересекаются в точке S' на главной оптической оси NN на расстоянии f_1 от собирающей линзы. Применим для собирающей линзы формулу:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1},$$

где $d_1 = F + a$; $F = F_1 = F_2$ (по условию задачи).

Пусть теперь лучи падают на собирающую линзу (рис. 6.5.11). Параллельные лучи 1 и 2 после преломления соберутся в точке S (фокусе собирающей линзы).

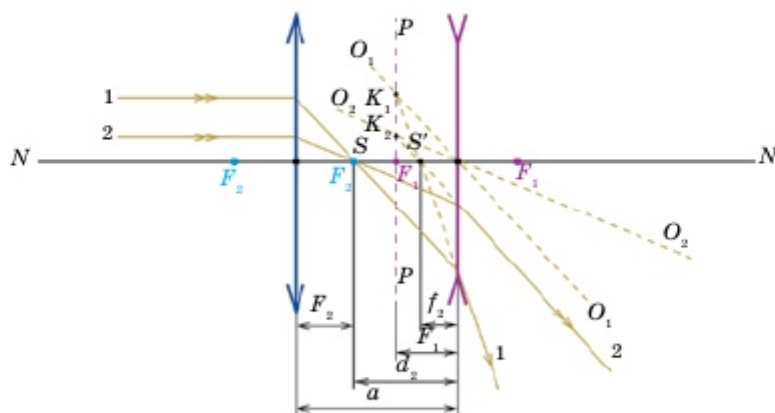


Рис. 6.5.11. Ход лучей в линзе

Падая на рассеивающую линзу, лучи преломляются в рассеивающей линзе так, что продолжения этих лучей проходят через точки пересечения K_1 и K_2 соответствующих побочных осей O_1O_1 и O_2O_2 с фокальной плоскостью PP рассеивающей линзы. Изображение S' находится в точке пересечения продолжений вышедших лучей 1 и 2 с главной оптической осью NN на расстоянии f_2 от рассеивающей линзы. Для рассеивающей линзы

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2},$$

где $d_2 = a - F$.

Найдем f_1 и $-f_2$:

$$f_1 = \frac{F(F+a)}{a}; \quad -f_2 = \frac{F(F-a)}{a}.$$

Разность между ними по условию равна

$$l = f_1 - (-f_2) = \frac{F(F+a)}{a} - \frac{F(F-a)}{a} = \frac{2Fa}{a} = 2F.$$

Откуда $F = \frac{l}{2} = 10$ см.

Ответ: 10 см.

Задача 2. Двояковыпуклая линза из стекла ($n = 1,5$) имеет оптическую силу 5 дптр. После погружения линзы в жидкость с показателем преломления 1,67 она действует как рассеивающая. Определите оптическую силу и фокусное расстояние линзы в жидкости.

Дано:
 $n = 1,5$
 $D = 5$ дптр
 $n_1 = 1,67$

Решение:

Если линза находится в воздухе, то формула линзы принимает вид

$$D = \frac{1}{F} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

$D_1 = ?$

$F_1 = ?$

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{D}{n-1}. \quad (2)$$

Если линза погружена в жидкость, то формула линзы имеет вид

$$D_1 = \frac{1}{F_1} = \left(\frac{n}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

Подставив уравнения, получим:

$$D_1 = \left(\frac{n}{n_1} - 1 \right) \frac{D}{n-1} = D \frac{(n-n_1)}{n_1(n-1)}.$$

$$F_1 = \frac{1}{D_1}.$$

$$1) D_1 = \frac{5(1,5 - 1,67)}{1,67(1,5 - 1)} = -1,018 \text{ (дптр)}.$$

$$2) F_1 = \frac{1}{-1,018} = -0,98 \text{ (м)}.$$

О т в е т: $-1,018$ (дптр); $-0,98$ (м).



ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уровень А

- 6.5.1. Две собирающие линзы с оптическими силами 5 дптр и 6 дптр расположены на расстоянии 60 см друг от друга. Найдите, используя построение в линзах, где находится изображение предмета, расположенного на расстоянии 40 см от первой линзы. (Ответ: 1 м.)
- 6.5.2. Оптическая система состоит из двух собирающих линз с фокусными расстояниями $F_1 = 20$ см и $F_2 = 10$ см. Расстояние между линзами составляет 30 см, предмет находится на расстоянии 30 см от первой линзы. На каком расстоянии от второй линзы получится изображение? (Ответ: 7,5 см.)
- 6.5.3. Рассеивающая линза дает изображение предмета, помещенного на расстоянии d перед ней, с увеличением Γ_1 . Собирающая линза с таким же фокусным расстоянием дает изображение того же предмета, находящегося на том же расстоянии d , с увеличением $\Gamma_2 = 2\Gamma_1$. Фокусные расстояния линз равны 2 см. Найдите d . (Ответ: 6 см.)

Уровень В

- 6.5.4. Стеклолинза имеет в воздухе оптическую силу 5 дптр. Найдите фокусное расстояние той же линзы, погруженной в воду. Показатель преломления стекла – 1,5, а воды – 1,33. (Ответ: 0,8 м.)
- 6.5.5. Большой кусок стекла с показателем преломления 1,5 имеет воздушную полость в виде двояковыпуклой линзы с радиусами кривизны 10 см. На главной оптической оси линзы внутри стекла на расстоянии 20 см от линзы находится песчинка. Найдите расстояние от линзы до изображения песчинки. (Ответ: $-8,57$ см.)
- 6.5.6. Параллельный пучок света падает перпендикулярно на собирающую линзу, оптическая сила которой $D_1 = 2,5$ дптр. На расстоянии 20 см от нее находится рассеивающая линза с оптической силой $D_2 = -5$ дтр. Диаметр линз равен 5 см. На расстоянии 30 см от рассеивающей линзы расположен экран Э. Каков диаметр светлого пятна, создаваемого линзами, на экране? (Ответ: 2,5 см.)

Уровень С

- 6.5.7. Собирающая линза с радиусами кривизны 12,5 см и 26 см дает в воздухе действительное изображение предмета, расположенное на расстоянии 24 см от линзы, когда предмет находится на расстоянии 50 см от линзы. Та же линза, погруженная в жидкость, действует как рассеивающая с фокусным расстоянием 1 м. Найдите показатель преломления жидкости. (Ответ: 1,66.)
- 6.5.8. Двояковыпуклая стеклянная линза имеет радиусы кривизны поверхностей 0,3 м и 0,5 м. Определите оптическую силу линзы и главное фокусное расстояние. Как изменятся искомые величины, если линзу погрузить в воду? Учтем, что показатель преломления $n_{\text{стекла}} = 1,47$ и показатель воды $n_{\text{воды}} = 1,24$. (Ответ: 2,5 дптр; 0,4 м; 1 дптр; 1 м.)

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ГЛАВЫ 6

- **Закон отражения света.** Падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости, угол отражения равен углу падения: $\alpha = \gamma$.
- **Плоским зеркалом** называется гладкая поверхность, при отражении от которой параллельный пучок остается параллельным.
- **Сферическим зеркалом** называют зеркало, отражающая поверхность которого имеет вид сегмента сферы. Формула сферического зеркала: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$.
Линейное увеличение сферического зеркала Γ определяется как отношение линейных размеров изображения H и предмета h : $\Gamma = \frac{H}{h}$.
- **Закон преломления света:** преломленный луч лежит в плоскости, проходящей через падающий луч и нормаль (перпендикуляр) к поверхности раздела двух сред; при этом углы падения α и преломления β связаны соотношением: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n$, где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй сред.
- Постоянная величина n , входящая в закон преломления света, называется **относительным показателем преломления**, или **показателем преломления второй среды относительно первой**.

- **Полным внутренним отражением света** называется отражение светового излучения при его падении на границу раздела двух прозрачных сред из среды с большим показателем преломления, когда угол падения превосходит некоторый предельный угол α_0 .
- **Световод (оптическое волокно)** представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.
- **Линзой** называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов.
- Линза, у которой толщина пренебрежимо мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхностей, называется **тонкой**.
- Величину D , обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой линзы**:
$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$
- Отношение угла зрения φ при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения ψ при наблюдении невооруженным глазом называется **угловым увеличением**:
$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Практическое задание «Компьютерное моделирование электромагнитных колебаний»

Проанализировать графические зависимости заряда и силы тока от времени можно посредством компьютерного моделирования, а именно реализовать численную модель колебаний в электрических цепях, используя табличную программу Excel.

Последовательность действий.

1. Откройте программу Excel. В столбец А внесите необходимые формулы для вычисления (используя формулы из § 1.2) и подготовьте ячейки для внесения исходных данных, как показано на *рис. 1*.

	A	B
1	Формулы для вычисления	
2	$\omega(0) = 1/\sqrt{LC}$	
3	$q = q(\max)\cos(\omega(0)t + \varphi)$	
4	$I = \omega(0)q(\max)\cos(\omega(0)t + \varphi + (\pi/2))$	
5		
6	Исходные данные	
7	Заряд конденсатора в начальный момент времени (Кл)	$q(\max) =$
8	Индуктивность катушки (Гн)	$L =$
9	Емкость конденсатора (Ф)	$C =$

Рис. 1

2. Подготовьте таблицу для построения графиков $I(t)$ и $q(t)$ (рис. 2), желательно не менее 500 ячеек (столбец E).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Формулы для вычисления				N	Время, с	Заряд, Кл	Время, с	Сила тока, А
2	$\omega(0)=1/\sqrt{LC}$				1				
3	$q=q(\max)\cos(\omega(0)t+\varphi)$				2				
4	$I=\omega(0)q(\max)\cos(\omega(0)t+\varphi+(\pi/2))$				3				
5					4				
6	Исходные данные				5				
7	Заряд конденсатора в начальный момент времени (Кл)	$q(\max)=$			6				
8	Индуктивность катушки (Гн)	$L=$			7				
9	Емкость конденсатора (Ф)	$C=$			8				
10					9				
11					10				

Рис. 2

3. Рассчитайте шаг программы (интервал времени Δt). Как показано на рис. 3, в ячейку B12 задайте начальное значение времени «0»; в ячейку B13 – максимальное значение времени, например, «0,005»; в ячейку B14 – интервал времени Δt «=(B13-B12)/E501».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Формулы для вычисления				N	Время, с	Заряд, Кл	Время, с	Сила тока, А
2	$\omega(0)=1/\sqrt{LC}$				1				
3	$q=q(\max)\cos(\omega(0)t+\varphi)$				2				
4	$I=\omega(0)q(\max)\cos(\omega(0)t+\varphi+(\pi/2))$				3				
5					4				
6	Исходные данные				5				
7	Заряд конденсатора в начальный момент времени (Кл)	$q(\max)=$			6				
8	Индуктивность катушки (Гн)	$L=$			7				
9	Емкость конденсатора (Ф)	$C=$			8				
10					9				
11	Временной интервал				10				
12	$t(0)=$	0			11				
13	$t(\max)=$	0,005			12				
14	$\Delta t=$	0,00001			13				

Рис. 3

4. Заполните исходные данные. Например, заряд конденсатора в начальный момент времени $q_{\max} = 0,000002$ Кл, $L = 0,5$ Гн, $C = 0,00000005$ Ф.

5. Вычислите частоту. В ячейку B2 запишите формулу «=1/(C8*C9)».

6. Заполните столбец времени (F) следующим образом: ячейка F2 «=B12»; ячейка F3 «=F2+B\$14»; ячейка F4 «=F3+B\$14»; ячейка F5 «=F4+B\$14» и т.д.

7. Заполните столбец заряда (G) следующим образом: ячейка G2 «=C7»; ячейка G3 «=C\$7*cos(B\$2*F3)»; ячейка G4 «=C\$7*cos(B\$2*F4)»; ячейка G5 «=C\$7*cos(B\$2*F5)» и т.д.

8. Заполните столбец времени (H) следующим образом: ячейка H2 «=F2»; ячейка H3 «=F3»; ячейка H4 «=F4»; ячейка H5 «=F5» и т.д.

9. Заполните столбец силы тока (I) следующим образом: ячейка I2 «0»; ячейка I3 «=B\$2*C\$7*cos(B\$2*H3+(3,14/2))»; ячейка I4 «=B\$2*C\$7*cos(B\$2*H4+(3,14/2))»; ячейка I5 «=B\$2*C\$7*cos(B\$2*H5+(3,14/2))» и т.д.

Полученный результат представлен на рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Формулы для вычисления				<i>N</i>	<i>Время, с</i>	<i>Заряд, Кл</i>	<i>Время, с</i>	<i>Сила тока, А</i>
2	$\omega(0)=1/\sqrt{LC}$	6324,555			1	0	0,000002	0	0
3	$q=q(max)\cos(\omega(0)t+\varphi)$				2	0,00001	1,996E-06	0,00001	-0,000789414
4	$I=\omega(0)q(max)\cos(\omega(0)t+\varphi+(\pi/2))$				3	0,00002	1,984E-06	0,00002	-0,001585744
5					4	0,00003	1,964E-06	0,00003	-0,002375733
6	Исходные данные				5	0,00004	1,936E-06	0,00004	-0,003156223
7	Заряд конденсатора в начальный момент времени (Кл)	$q(max)=$	0,000002		6	0,00005	1,901E-06	0,00005	-0,003924091
8	Индуктивность катушки (Гн)	$L=$	0,5		7	0,00006	1,858E-06	0,00006	-0,004676269
9	Емкость конденсатора (Ф)	$C=$	5E-08		8	0,00007	1,807E-06	0,00007	-0,005409748
10					9	0,00008	1,749E-06	0,00008	-0,006121595
11	Временной интервал				10	0,00009	1,685E-06	0,00009	-0,006808963
12	$t(0)=$	0			11	0,0001	1,613E-06	0,0001	-0,007469105
13	$t(max)=$	0,005			12	0,00011	1,535E-06	0,00011	-0,008099381
14	$\Delta t=$	0,00001			13	0,00012	1,451E-06	0,00012	-0,00869727

Рис. 4

10. Выделите столбцы F и G с 2-й по 501-ю строку. Выберите на главном меню Вставка → Диаграмма → Точечная.

11. Выделите столбцы H и I с 2-й по 501-ю строку. Выберите на главном меню Вставка → Диаграмма → Точечная.

12. Получились графики зависимости заряда от времени (в красном цвете) и силы тока от времени (в зеленом цвете) (рис. 5).

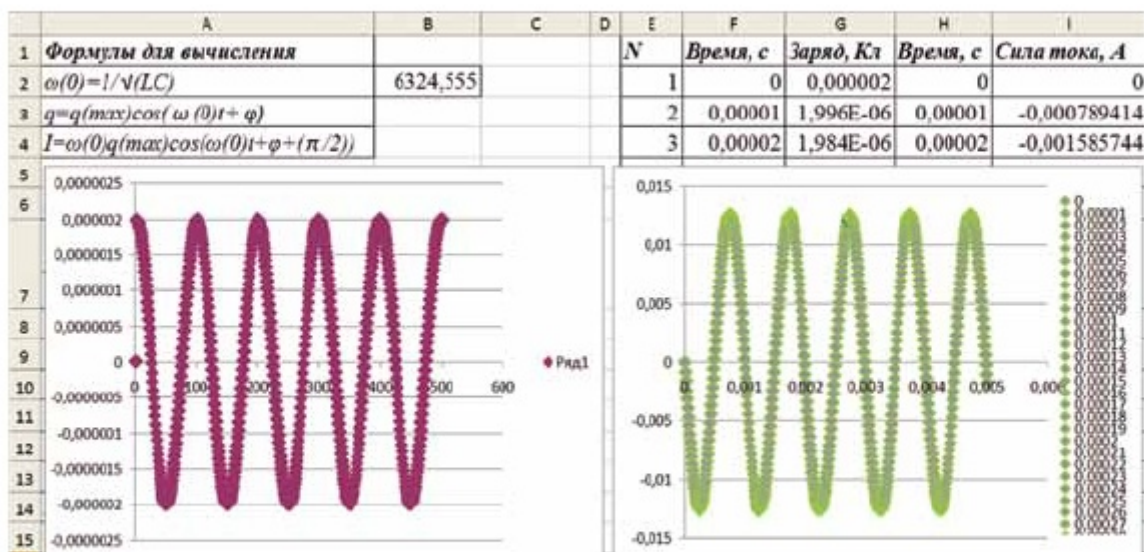


Рис. 5

13. Изменяя исходные данные, наблюдайте за изменением графиков зависимости $I(t)$ и $q(t)$. Сделайте вывод.

Приложение 2

1. Фундаментальные физические постоянные

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Элементарный электрический заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$

2. Десятичные приставки к названиям единиц

Наименование	Обозначение	Множитель	Наименование	Обозначение	Множитель
пета	П	10^{15}	деци	д	10^{-1}
тера	Т	10^{12}	санتي	с	10^{-2}
гига	Г	10^9	милли	м	10^{-3}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
кило	к	10^3	нано	н	10^{-9}
гекто	г	10^2	пико	п	10^{-12}
дека	да	10^1	фемто	ф	10^{-15}

3. Скорость звука в различных средах

Газ, 0°C	v, м/с	Жидкость, 18°C	v, м/с	Твердое тело	v, м/с
Азот	334	Бензин	1166	Алюминий	6260
Водород	1284	Вода	1497	Вольфрам	5460
Воздух	331,45	Глицерин	1923	Железо	5850
Гелий	965	Керосин	1330	Медь	4700
Кислород	316	Нефть	1330	Олово	3320
Метан	430	Ртуть	1451	Свинец	2160
Хлор	206	Спирт этиловый	1180	Сталь твердая	до 6000

**4. Удельное электрическое сопротивление проводников
(при t 20°C, мкОм · м)**

Алюминий	0,028	Молибден	0,057
Висмут	1,06	Никель	0,073
Вольфрам	0,055	Олово	0,12
Графит	8,0 – 20,0	Свинец	0,21
Дюралюмин	0,038	Серебро	0,016
Железо	0,098	Сталь	0,10 – 0,14
Золото	0,024	Цинк	0,050
Медь	0,017	Чугун	0,5

5. Показатель преломления различных сред

Азот	1,000207	Бензин	1,38 – 1,41	Алмаз	2,417
Водород	1,000138	Вода	1,333	Каменная соль	1,544
Водяной пар	1,000252	Глицерин	1,47	Кварц	1,54
Воздух	1,000292	Соляная кислота	1,254	Лёд	1,31
Гелий	1,000035	Касторовое масло	1,48	Рубин	1,76
Кислород	1,000272	Льняное масло	1,48	Слюда	1,56 – 1,60
Ксенон	1,000702	Скипидар	1,47	Стекло оптическое	1,51 – 1,77
Неон	1,000067	Спирт этиловый	1,354	Янтарь	1,546

6. Предельный угол внутреннего отражения

Алмаз	24°	Спирт этиловый	47°
Вода	49°	Стекло различных сортов	30 – 42°
Глицерин	43°	Эфир этиловый	47°

7. Основные цвета видимого спектра

<i>Цвет</i>	<i>Длина волны</i>		<i>Цвет</i>	<i>Длина волны</i>	
	10 ⁻⁷ м	нм		10 ⁻⁷ м	нм
красный	7,6–6,2	760–620	голубой	5,0 – 4,8	500 – 480
оранжевый	6,2–5,9	620–590	синий	4,8 – 4,5	480 – 450
желтый	5,9–5,6	590–560	фиолетовый	4,5 – 3,8	450 – 380
зеленый	5,6–5,0	560–500			

Аналоговый сигнал – сигнал данных, у которого каждый из представляющих параметров описывается функцией времени и непрерывным множеством возможных значений.

Гальванический элемент – химический источник электрического тока, основанный на взаимодействии двух металлов или их оксидов в электролите, приводящем к возникновению в замкнутой цепи электрического тока.

Дискретный сигнал (от лат. *discretus* – «прерывистый», «разделенный») – сигнал, который является прерывистым (в отличие от аналогового) и который изменяется во времени и принимает любое значение из списка возможных значений.

Дисперсия света – зависимость показателя преломления от длины волны проходящего света.

Дифракционная решетка – оптический прибор, представляющий собой периодическую структуру из большого числа регулярно расположенных непрозрачных элементов или разделенных промежутков.

Дифракция света – явление огибания лучами света контура непрозрачных тел, в результате чего световые лучи проникают в область геометрической тени.

Дихроизм – явление, состоящее в различном поглощении веществом света в зависимости от его поляризации.

Интерферометр – оптический прибор, позволяющий определять незначительные изменения показателя преломления прозрачных тел (газов, жидких и твердых тел) в зависимости от давления, температуры, примесей и т.д.

Интерференция света – явление наложения двух или более когерентных световых волн, в результате которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства, т.е. возникает интерференционная картина.

Инфразвук – волны, частота которых меньше 16 Гц.

Когерентные волны – волны, у которых разность их фаз остается постоянной во времени. Когерентными могут быть лишь волны, имеющие одинаковую частоту.

Колебательный контур – простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания. Контур состоит из конденсатора и катушки, присоединенной к его обкладкам.

Кольца Ньютона – интерференционная картина в виде концентрических колец, возникающая в прослойке воздуха между плоской стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой с большим радиусом кривизны.

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

Коэффициент трансформации k – отношение числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной. В зависимости от того, какое значение принимает коэффициент трансформации, различают повышающий ($k < 1$) и понижающий ($k > 1$) трансформатор.

Линза – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов.

Механические колебания – движения тел, повторяющиеся точно (или приблизительно) через одинаковые промежутки времени.

Невозобновляемые ресурсы – ресурсы, запасы которых могут быть исчерпаны в ближайшее время, например: уголь, сырая нефть, природный газ, нефтеносный сланец, урановая руда.

Неисчерпаемые возобновляемые энергетические ресурсы – природные ресурсы, запасы которых или восстанавливаются быстрее, чем используются, или не зависят от того, используются они или нет, например: энергия солнца, ветра, морских приливов.

Период дифракционной решетки (или постоянная решетки) – величина, равная $d = a + b$, где a – ширина щели; b – ширина непрозрачных промежутков.

Период переменного тока – промежуток времени, в течение которого ЭДС (или напряжение, или сила тока) совершает одно полное колебание.

Плоское зеркало – гладкая поверхность, при отражении от которой параллельный пучок остается параллельным.

Полное внутреннее отражение света – отражение светового излучения при его падении на границу раздела двух прозрачных сред из среды с большим показателем преломления, когда угол падения превосходит некоторый предельный угол α_0 .

Поляризация света – характеристика светового излучения, описывающая поперечную неэквивалентность различных его направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

Показатель преломления показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в веществе: $n = \frac{c}{v}$.

Радиолокация – обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиосвязь – передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Радиотелефонная связь – передача речи или музыки с помощью электромагнитных волн.

Резонансная частота – частота, при которой амплитуда колебаний силы тока достигает максимального значения.

Ротор – вращающаяся часть генератора, аналогична рамке с током.

Световод (оптическое волокно) – стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

Скорость света c – одна из основных констант нашего мира и определяет предельную скорость передачи взаимодействий в вакууме, приблизительно равна 300 000 км/с.

Солнечная батарея – объединение фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) – полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток, в отличие от солнечных коллекторов, производящих нагрев материала-теплоносителя.

Статор – неподвижная часть генератора, аналогичная магниту.

Сферическое зеркало – зеркало, отражающая поверхность которого имеет вид сегмента сферы. Формула сферического зеркала: $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$. Линейное увеличение сферического зеркала Γ определяется как отношение линейных размеров изображения H и предмета h : $\Gamma = \frac{H}{h}$.

Тепловая электростанция (ТЭС) – предприятие, где тепловая энергия, образующаяся при сжигании органического топлива (уголь, газ, мазут, торф, сланцы и т.д.), используется для вращения турбин, приводящих в движение электрогенератор.

Термобатарея преобразует тепловую энергию в электрическую. В термобатареях используется несколько термопар, подключенных последовательно или параллельно.

Трансформатор – устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.

Узел – точка, которая остается в покое вследствие наложения падающей и отраженной волн, колеблющихся в противофазе.

Ультразвук – волны, частота которых больше 20 000 Гц.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли.

Упругие (или механические) волны – механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Формула Томсона – $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

Цифровой сигнал – сигнал, который можно представить в виде последовательности дискретных (цифровых) значений.

Частота переменного тока – число колебаний переменного тока за одну секунду.

Электрический резонанс – явление возрастания амплитуды колебаний силы электрического тока при некотором значении частоты до максимального значения.

Электронный осциллограф – прибор для наблюдения и исследования колебаний, происходящих с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний.

Электростатическая машина – машина, которая преобразует механическую энергию, используя явление электростатической индукции, при этом на полюсах машины (лейденских банках) накапливаются электрические заряды, разность потенциалов на разрядниках достигает нескольких сотен тысяч вольт.

Электроэнергетика – базовая инфраструктурная отрасль, снабжающая электричеством и теплом все остальные сектора хозяйства.

Якорь – обмотка в генераторе, в которой индуцируется ЭДС.

1. Акылбеков А., Ермекова Ж., Даулетбекова А. Физика. – Астана: Фолиант, 2015. – 440 с.
2. Астрономия. История, теории и практики. Большая научная энциклопедия. – М.: АСТ, 2019. – 224 с.
3. Бендриков Г. А., Буховцев Б. Б., Керженцев В. В., Мякишев Г. Я. Задачи по физике для поступающих в вузы. – М.: МГУ, 1968. – 336 с.
4. Воробьев И. И., Зубков П. И., Кутузова Г. А., Савченко О. Я., Трубачев А. М., Харитонов В. Г. Задачи по физике. – М.: Наука, 1988. – 416 с.
5. Вселенная на ладони. Колин Стюарт. – М.: Эксмо, 2019. – 352 с.
6. Гампсон В., Шеффер К. Парадоксы природы: Книга в помощь юношеству для объяснения явлений, по-видимому, противоречащих повседневному опыту. – Либроком, 2010. – 200 с.
7. Гарднер М. Теория относительности для миллионов. – Либроком, 2010. – 240 с.
8. Глазами физика. Путешествие от края радуги к границе времени. Уолтер Левин и Уоррен Гольдштейн. – Изд-во: Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 352 с.
9. Гинзбург В. Л., Левин Л. М., Сивухин Д. В., Четверикова Е. С., Яковлев И. А. Сборник задач по общему курсу физики. Оптика. М., 1977. – 320 с.
10. Гольдфарб Н. И. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Высшая школа, 1973. – 352 с.
11. Квантовая Вселенная. Как устроено то, что мы не можем видеть. Брайан Кокс и Джефф Форшоу. Изд-во: Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 288 с.
12. Косов В. Н., Красиков С. А. Численное моделирование на уроках физики. – Алматы: Алматыкітап, 2015. – 240 с.
13. Московкина Е. Г., Волков В. А. Сборник задач по физике. – М.: ВАКО, 2017. – 320 с.
14. Оськина В. Т. Физика и астрономия. 9–11 классы: олимпиадные задания. – Волгоград.: Учитель, 2011. – 143 с.
15. Романова В. В. Астрономия. Практикум. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2016. – 112 с.
16. Рымкевич А. П. Физика. Задачник. 10–11 кл. Пособие для общеобразовательных учебных заведений. – 6-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2002. – 192 с.
17. Сборник задач по курсу общей физики/Под редакцией Цедрика М. С. – М.: Просвещение, 1989. – 271 с.
18. Сборник задач и вопросов по физике/Под общей редакцией Жданова Л. С. – М.: Наука, 1974. – 368 с.
19. Трофимова Т. И., Фирсов А. В. Курс физики с примерами решения задач. Том 1. – М.: Кнорус, 2010. – 584 с.
20. Уокер Дж. Физический фейерверк. – М.: Мир, 1989. – 298 с.
21. Физика. 11 кл. Проф. уровень – п.р. Пинского, Кабардина. – 2011. – 420 с. PDF (91,3 Мб).

22. Физика. Механика. 10 кл. Проф. уровень_под ред. Мякишева Г. Я._2010. – 496 с. pdf (5,8 Мб).
23. Физика. Молекулярная физика. Термодинамика. 10 кл. Проф. ур_Мякишев Г. Я., Синяков А. З._2010 – 352 с. pdf (4,4 Мб).
24. Физика. Оптика. Квантовая физика. 11 кл. (углубл. изуч.)_Мякишев Г. Я., Синяков А. З._2002 – 464 с. djvu (8,7 Мб).
25. Физика. Электродинамика. 10–11 кл. Проф. уровень_Мякишев, Синяков, Слободсков_2010 – 480 с. pdf (5,8 Мб).
26. Физика. Часть 2. Энциклопедия для детей. М. Аксенова. – М.: Аванта +, 2007.
27. Физика будущего. Митио Каку. – Изд-во: Альпина-нон-фикшн, 2018. – 584 с.

Интернет-ресурсы

1. <https://fiz.1sept.ru/fizarchive.php> (Задачи, тесты; образовательные ресурсы; эксперимент.)
2. <http://www.edu.delfa.net/> (Тесты и задачи; это интересно.)
3. <http://www.eduspb.com> (Конспекты; библиотека/задачники; библиотека/литература по истории физики.)
4. <https://physics.ru/> (Учебник/Открытая Физика 2.6. Часть II 1. Электродинамика.)
5. <https://videouroki.net/> (Конспекты/физика/11 класс.)
6. <http://www.astronews.ru> (астрономические новости; астрофото; астрономический календарь; Луна онлайн).
7. <http://www.cosmoworld.ru> (новости космонавтики).
8. <https://www.elementy.ru/physics> (Большой адронный коллайдер; задачи; видеотека; 200 законов мироздания).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ	4
§ 1.1. Уравнения и графики гармонических колебаний	6
§ 1.2. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания.....	13
§ 1.3. Аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями...	19
Краткие выводы главы 1	23
Глава 2. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.....	24
§ 2.1. Генератор переменного тока.....	27
§ 2.2. Переменный ток	29
§ 2.3. Активное и реактивное сопротивления в цепи переменного тока	34
§ 2.4. Закон Ома для последовательной электрической цепи переменного тока, содержащей активное и реактивное сопротивления.....	41
§ 2.5. Мощность в цепи переменного тока	48
§ 2.6. Резонанс напряжений в электрической цепи	53
§ 2.7. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор.....	60
Лабораторная работа № 1. Определение числа витков в обмотках трансформатора.....	67
§ 2.8. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и мире..	68
Краткие выводы главы 2	73
ГЛАВА 3. ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ	74
§ 3.1. Распространение механических волн. Длина волны. Скорость распространения волны	76
§ 3.2. Уравнение бегущей волны	81
§ 3.3. Уравнение стоячей волны	85
Лабораторная работа № 2. Определение скорости звука в воздухе	89
§ 3.4. Интерференция механических волн	90
§ 3.5. Принцип Гюйгенса. Дифракция механических волн	93
Краткие выводы главы 3	95
ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ	96
§ 4.1. Излучение и прием электромагнитных волн	98
§ 4.2. Свойства электромагнитных волн	105
§ 4.3. Радиосвязь. Детекторный радиоприемник	110
§ 4.4. Аналого-цифровые преобразователи. Каналы связи	121
§ 4.5. Развитие средств связи	125
Краткие выводы главы 4	131
Глава 5. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	132
§ 5.1. Электромагнитная природа света. Скорость света	134
	205

§ 5.2. Дисперсия света. Интерференция света	136
§ 5.3. Дифракция света. Дифракционные решетки	144
Лабораторная работа № 3. Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки	149
§ 5.4. Поляризация света	150
Лабораторная работа № 4. Наблюдение интерференции, дифракции и поляризации света	153
Краткие выводы главы 5	156
ГЛАВА 6. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	158
§ 6.1. Принцип Гюйгенса. Закон отражения света	160
§ 6.2. Плоские и сферические зеркала	162
§ 6.3. Закон преломления света	167
§ 6.4. Полное внутреннее отражение	172
Лабораторная работа № 5. Определение показателя преломления стекла	178
§ 6.5. Построение изображения в системах линз. Формула тонкой линзы. Оптические приборы	180
Краткие выводы главы 6	190
Приложение	192
Глоссарий	199
Список использованной литературы	203

Учебное издание

**Башарулы Рахметолла
Шункеев Куанышбек Шункеевич
Мясникова Людмила Николаевна
Жантурина Нургул Нигметовна
Бармина Александра Александровна
Аймаганбетова Зухра Куралиевна**

ФИЗИКА

Учебник для 11 класса естественно-математического направления
общеобразовательной школы

В двух частях

Часть 1

Зав. редакцией *Н. Жиенгалиев*

Редактор *Г. Хасенова*

Художественные редакторы *А. Лукманов, Д. Сабитаева*

Слайды *А. Устиненко и др.*

Технический редактор *О. Рысалиева*

Компьютерная верстка *А. Чагимкуловой*

ИБ 044

Сдано в набор 27.04.2019. Подписано в печать 10.07.2020. Формат 70×90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура «Школьная». Печать офсетная. Усл. печ. л.15,21. Уч.-изд. л. 12,14. Тираж 1500 экз. Заказ №5177.

ТОО «Корпорация «Атамұра», 050000, г. Алматы, пр. Абылай хана, 75.

Полиграфкомбинат ТОО «Корпорация «Атамұра», Республика Казахстан, 050002,
г. Алматы, ул. М. Макатаева, 41.



Оглавление

page1
page2
page3
page4
page5
page6
page7
page8
page9
page10
page11
page12
page13
page14
page15
page16
page17
page18
page19
page20
page21
page22
page23
page24
page25
page26
page27
page28

page34

page35

page36

page37

page38

page39

page40

page41

page42

page43

page44

page45

page46

page47

page48

page49

page50

page51

page52

page53

page54

page55

page56

page57

page58

page59

page60

page61

page62

page63

page64

page69
page70
page71
page72
page73
page74
page75
page76
page77
page78
page79
page80
page81
page82
page83
page84
page85
page86
page87
page88
page89
page90
page91
page92
page93
page94
page95
page96
page97
page98
page99

page104
page105
page106
page107
page108
page109
page110
page111
page112
page113
page114
page115
page116
page117
page118
page119
page120
page121
page122
page123
page124
page125
page126
page127
page128
page129
page130
page131
page132
page133
page134

page139

page140

page141

page142

page143

page144

page145

page146

page147

page148

page149

page150

page151

page152

page153

page154

page155

page156

page157

page158

page159

page160

page161

page162

page163

page164

page165

page166

page167

page168

page169

page174
page175
page176
page177
page178
page179
page180
page181
page182
page183
page184
page185
page186
page187
page188
page189
page190
page191
page192
page193
page194
page195
page196
page197
page198
page199
page200
page201
page202
page203
page204