

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Электромагнитные колебания — это повторяющийся процесс взаимного превращения электрических и магнитных полей.

Микроисточником электромагнитных колебаний является возбужденный атом, макроисточником — колебательный контур.

*Колебательный контур* — это цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности (рис. 188).

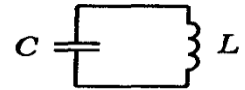


Рис. 188

Если сопротивлением проводов контура можно пренебречь, то такой контур называется идеальным. При зарядке конденсатора в идеальном колебательном контуре возникают свободные, незатухающие электромагнитные колебания заряда и напряжения на обкладках конденсатора, а также силы тока и ЭДС в катушке индуктивности. Электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре являются высокочастотными и гармоническими. Уравнениями гармонических колебаний заряда, силы тока, напряжения и ЭДС являются уравнения 253)–256).

На рис. 189 изображены графики колебаний заряда, напряжения и силы тока в идеальном колебательном контуре.

Ниже приведены уравнения электромагнитных колебаний и волн.

*Уравнения электромагнитных колебаний заряда, силы тока, напряжения и ЭДС*

$$253) q = q_m \cos(\omega t + \alpha_0)$$

$$254) i = I_m \sin(\omega t + \alpha_0)$$

$$255) u = U_m \cos(\omega t + \alpha_0)$$

$$256) e = \mathcal{E}_m \sin(\omega t + \alpha_0)$$

$$257) \mathcal{E}_m = B\omega S$$

$$258) U_m = \frac{q_m}{C}$$

Здесь  $q$  — мгновенный заряд (Кл),  $q_m$  — максимальный заряд (Кл),  $\omega$  — циклическая частота колебаний (рад/с),  $t$  — время колебаний (с),  $\alpha_0$  — начальная фаза (рад),  $i$  — мгновенная сила тока (А),  $I_m$  — максимальная сила тока (А),  $u$  — мгновенное напряжение (В),  $U_m$  — максимальное напряжение (В),  $e$  — мгновенная ЭДС (В),  $\mathcal{E}_m$  — максимальная

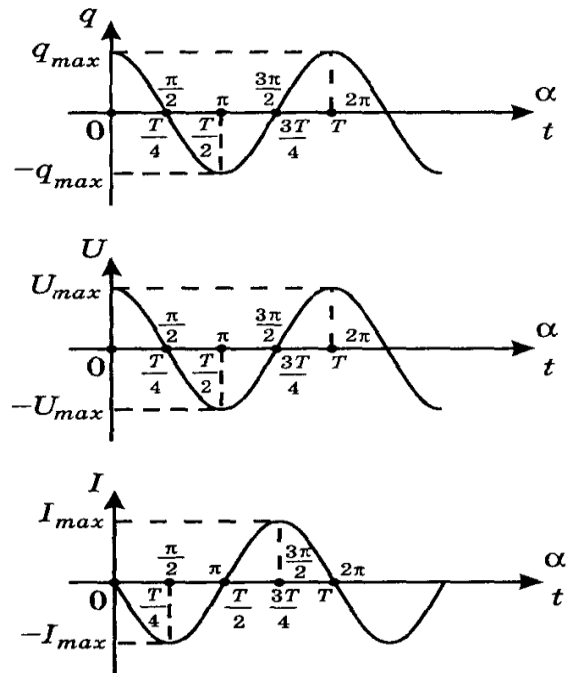


Рис. 189

ЭДС (В),  $S$  — площадь вращающегося контура ( $\text{м}^2$ ),  $C$  — емкость конденсатора (Ф).

*Период, циклическая частота и частота свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре (формула Томсона)*

$$259) T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$260) \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$261) \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Здесь  $T$  — период колебаний (с),  $L$  — индуктивность катушки (Гн),  $C$  — емкость конденсатора (Ф),  $\omega$  — циклическая частота колебаний (рад/с),  $\nu$  — частота колебаний (Гц).

*Формула силы переменного тока*

$$262) i = q'$$

$$263) I_m = \omega q_m$$

Здесь  $i$  — мгновенная сила тока (А),  $q'$  — первая производная заряда по времени (А),  $I_m$  — максимальная сила тока (А),  $q_m$  — максимальный заряд (Кл).

*Действующие значения переменного тока*

$$264) I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$265) U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$266) \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$$

Здесь  $I$  — действующее значение силы переменного тока (А),  $I_m$  — максимальное значение силы тока (А),  $U$  — действующее значение напряжения (В),  $U_m$  — максимальное напряжение (В),  $\mathcal{E}$  — действующая ЭДС (В),  $\mathcal{E}_m$  — максимальная ЭДС (В).

**Индуктивное, емкостное и полное сопротивления в цепи переменного тока**

$$267) X_L = \omega L$$

$$268) X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$269) Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Здесь  $X_L$  — индуктивное сопротивление (Ом),  $X_C$  — емкостное сопротивление (Ом),  $\omega$  — циклическая частота переменного тока (рад/с),  $Z$  — полное сопротивление (Ом),  $R$  — активное сопротивление (Ом).

**Закон Ома для полной цепи переменного тока**

$$270) I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z}$$

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

Здесь  $I$  — действующее значение силы переменного тока (А),  $U$  — действующее значение напряжения переменного тока (В),  $I_m$  — максимальная сила переменного тока (А),  $U_m$  — максимальное напряжение переменного тока (В), Остальные величины названы в предыдущей формуле.

**Средняя мощность в цепи переменного тока**

$$271) P = U I \cos \varphi$$

Здесь  $P$  — мощность переменного тока (Вт),  $U$  — его действующее напряжение (В),  $I$  — действующая сила тока (А),  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности переменного тока (безразмерный),  $\varphi$  — сдвиг фаз между током и напряжением (рад).

**Коэффициент мощности переменного тока**

$$272) \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Здесь все величины названы в формулах 268)–269).

### *Коэффициент трансформации трансформатора*

$$273) k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Здесь  $k$  — коэффициент трансформации трансформатора (безразмерный),  $U_1$  — напряжение на первичной обмотке (В),  $U_2$  — напряжение на вторичной обмотке (В),  $N_1$  — число витков в первичной обмотке (безразмерное),  $N_2$  — число витков во вторичной обмотке (безразмерное).

### *Формулы длины электромагнитной волны в вакууме (воздухе)*

$$274) \lambda = cT$$

$$275) \lambda = \frac{c}{\nu}$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны (м),  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме,  $T$  — период колебаний (с),  $\nu$  — частота колебаний (Гц).

### *Плотность потока электромагнитного излучения*

$$276) I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}$$

Здесь  $I$  — плотность потока электромагнитного излучения (Вт/м<sup>2</sup>),  $\Delta W$  — электромагнитная энергия, проходящая через некоторую поверхность (Дж),  $S$  — площадь этой поверхности (м<sup>2</sup>),  $\Delta t$  — время прохождения энергии (с).

Свободные электромагнитные колебания в идеальном колебательном контуре подчиняются закону сохранения энергии: полная энергия электромагнитных колебаний  $E_{\text{эл-м}}$  равна максимальной энергии электрического поля конденсатора  $E_{\text{эл max}}$  или равна максимальной энергии магнитного поля катушки индуктивности  $E_{\text{м max}}$ , или равна сумме мгновенных электрической  $E_{\text{эл}}$  и магнитной  $E_{\text{м}}$  энергий поля конденсатора и катушки в любой промежуточный момент времени:

$$E_{\text{эл-м}} = E_{\text{эл max}} = E_{\text{м max}} = E_{\text{эл}} + E_{\text{м}}.$$

Этот закон можно записать, развернув значения энергии электрического и магнитного полей через их параметры согласно уравнениям 161) — 163), а также 227):

$$E_{\text{эл-м}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2}.$$

**Электрический резонанс** — это явление резкого возрастания максимальной силы тока в контуре (амплитуды силы тока), когда частота пополнения контура энергией становится равной собственной частоте колебаний в контуре.

При вращении проводящего контура в магнитном поле в нем вследствие явления электромагнитной индукции возникает переменный ток.

**Действующим (эффективным) значением переменного тока** называют силу такого постоянного тока, который, проходя по контуру, выделяет в единицу времени столько же тепла, что и данный переменный ток. Действующие силу, напряжение и ЭДС переменного тока определяют формулы 264)–266):

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}}.$$

Измерительные приборы, включенные в цепь переменного тока, показывают его действующие значения.

Если в цепь переменного тока включить катушку индуктивности, то в ней возникнет ток самоиндукции, который, согласно правилу Ленца, будет препятствовать изменению переменного тока. Из-за этого колебания силы тока в контуре будут отставать по фазе от колебаний напряжения, поэтому катушка индуктивности, включенная в контур, оказывает *индуктивное сопротивление*  $X_L$  переменному току, величину которого определяет формула 267):

$$X_L = \omega L.$$

Если в цепь переменного тока включить конденсатор, то изменение напряжения на его обкладках будет отставать по фазе от изменения силы тока, поэтому конденсатор будет оказывать *емкостное сопротивление*  $X_C$  переменному току, величину которого определяет формула 268):

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

**Индуктивное и емкостное сопротивления** вместе называются **реактивным сопротивлением**.

Сопротивление  $R$ , которое оказывают проводники цепи, называется **активным сопротивлением**. Джоулево тепло выделяется только на активном сопротивлении — в этом состоит главное отличие **активного сопротивления** от емкостного и индуктивного сопротивлений.

Если цепь переменного тока содержит **активное, емкостное и индуктивное сопротивления**, то **полное сопротивление** такой цепи определяет формула 269):

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

Закон Ома для данной цепи имеет вид 270), где слева от равенства и в числителе могут быть записаны только действующие или амплитудные значения силы и напряжения переменного тока:

$$I = \frac{U}{Z} \quad \text{или} \quad I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Устройство для изменения напряжения переменного тока называется **трансформатором**. Его обозначение на схемах показано на рис. 193.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. **Трансформатор** состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника, на который надеты обмотки. Та обмотка, которую подключают к источнику изменяемого напряжения, называется **первичной**, а та, с которой измененное напряжение подается на потребитель, — **вторичной**.



Рис. 193

Если число витков во **вторичной обмотке** больше числа витков в **первичной**, то трансформатор называется **повышающим**, а если меньше — **понижающим**. Величина  $k$ , показывающая, во сколько раз трансформатор изменяет напряжение переменного тока, называется **коэффициентом трансформации трансформатора** (формула 273)

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

Из нее следует, что **напряжения на обмотках** прямо пропорционально числу витков в них.

Поскольку КПД трансформатора очень высок, работа тока в его обеих обмотках примерно одинакова. Поэтому, согласно формуле работы тока 193), силы тока в обмотках  $I_1$  и  $I_2$  обратно пропорциональны числу витков  $N_1$  и  $N_2$  в них:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

*Электромагнитные волны* — это распространение в пространстве электромагнитных колебаний.

Электромагнитные волны являются *поперечными волнами*, т. к. векторы электрической напряженности  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$  в электромагнитной волне колеблются перпендикулярно ее перемещению  $\vec{S}$  (рис. 194).

В вакууме электромагнитные волны распространяются с максимальной скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Длину электромагнитной волны в вакууме определяют формулы 249)–250), где  $v = c$ :

$$\lambda = cT, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряженные частицы.

Амплитуда электромагнитной волны пропорциональна квадрату ее частоты, а ее энергия — частоте в четвертой степени. Электромагнитные волны обладают всеми свойствами волн: интерференцией, дифракцией, дисперсией и поляризацией.

На рис. 195 изображена *шкала электромагнитных волн*, на которой электромагнитные волны расположены в порядке возрастания их частоты (слева направо) или в порядке убывания длины волны.

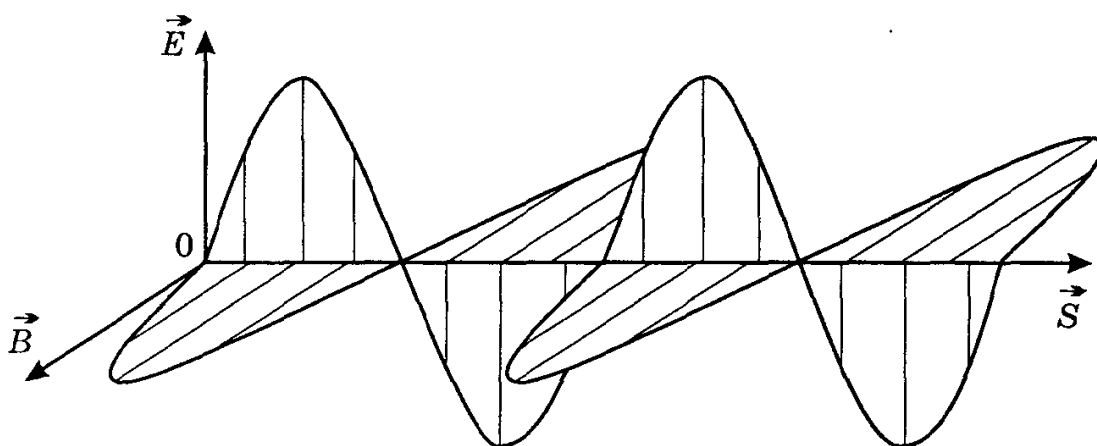


Рис. 194

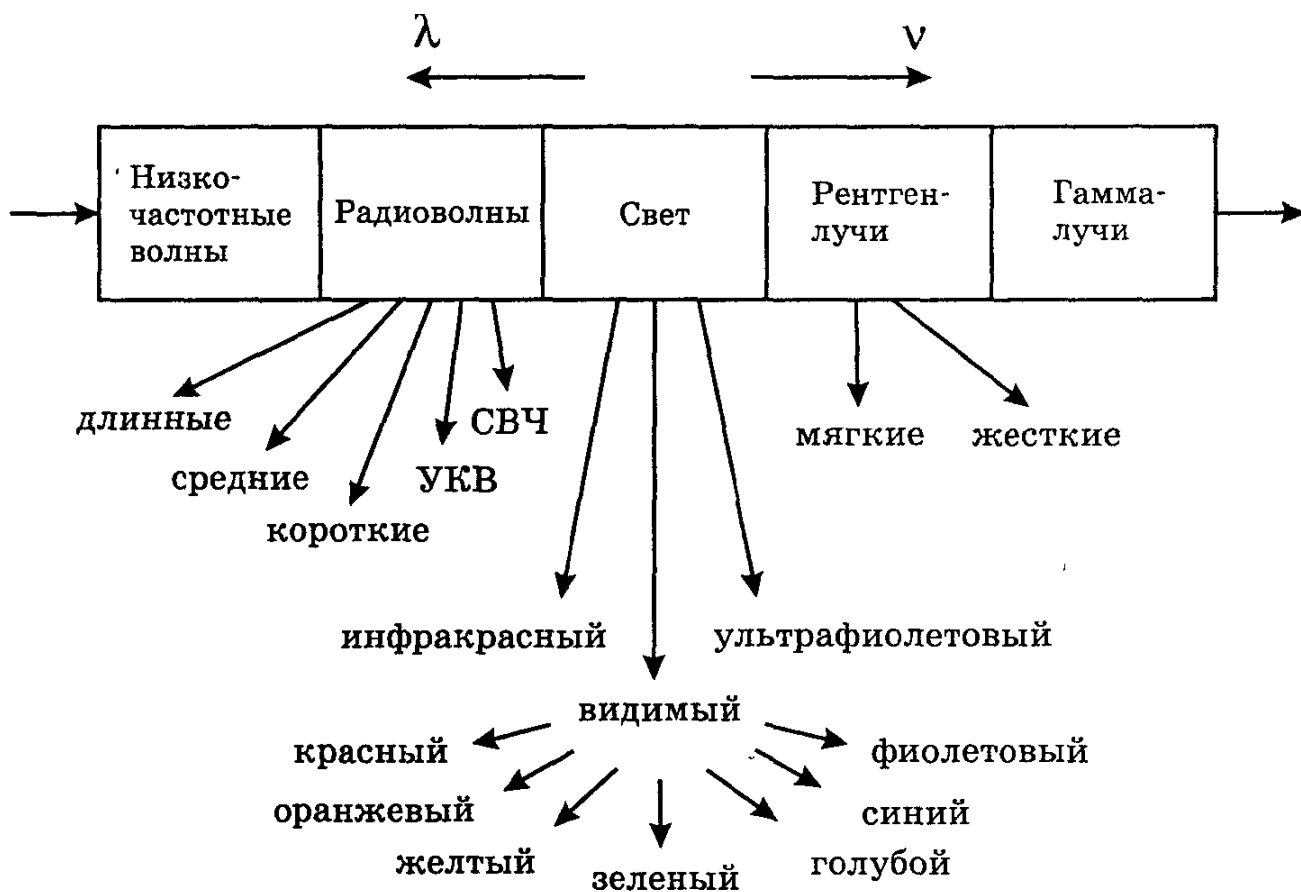


Рис. 195



**A1.** На рис. 230 изображены графики двух гармонических колебаний 1 и 2. Как соотносятся их частоты?

1)  $\frac{\nu_1}{\nu_2} = 2$       2)  $\frac{\nu_2}{\nu_1} = 2$       3)  $\frac{\nu_1}{\nu_2} = 4$       4)  $\frac{\nu_2}{\nu_1} = 4$

**A2.** В процессе гармонических колебаний не изменяются

- 1) амплитуда и фаза      2) смещение и период  
3) фаза и частота      4) амплитуда и частота

**A3.** С какой скоростью проходит через положение равновесия пружинный маятник массой 50 г, если жесткость его пружины 20 Н/м, а амплитуда колебаний 4 см?

- 1) 1,6 м/с      2) 0,8 м/с      3) 4 м/с      4) 0,2 м/с

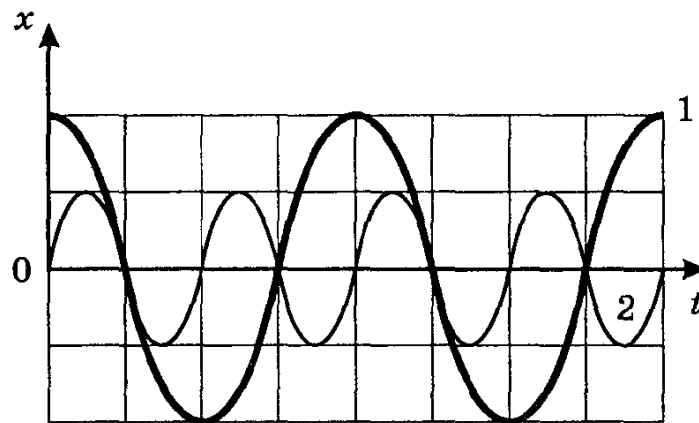


Рис. 230

**А4.** Чему равен период колебаний, уравнение которых имеет вид:  $x = 0,4 \sin 0,5(0,5\pi t + \pi)$ ? Все величины выражены в единицах СИ.

- 1) 2 с                      2) 4 с                      3) 8 с                      4) 5 с

**А5.** Нить математического маятника отклонили от вертикали на угол  $\alpha$ , и при этом он поднялся на высоту  $h$  над прежним положением. Когда его отпустили, циклическая частота колебаний маятника стала равна

- 1)  $\sqrt{\frac{h}{g}(1 - \sin \alpha)}$     2)  $\sqrt{\frac{h \sin \alpha}{g}}$     3)  $\sqrt{\frac{g}{h(1 - \cos \alpha)}}$     4)  $\sqrt{\frac{g}{h}(1 - \cos \alpha)}$

**А6.** На рис. 231 изображена поперечная волна. Частота колебаний частиц среды, в которой она распространяется, 4 Гц. Чему равна скорость волны?

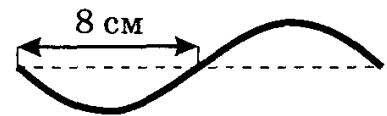


Рис. 231

- 1) 0,16 м/с    2) 0,32 м/с  
3) 0,64 м/с    4) 0,8 м/с

**А7.** Ход одной волны до места их наложения друг на друга 2 м, а другой — 5 м. Длина волны 1 м. В месте их наложения наблюдается

- 1) максимум вследствие явления дифракции  
2) минимум вследствие явления интерференции  
3) минимум вследствие явления дисперсии  
4) максимум вследствие явления интерференции

**А8.** На рис. 232 изображен колебательный контур. Циклическая частота колебаний в нем равна

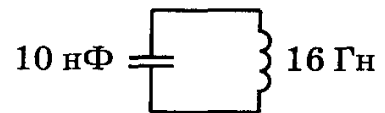


Рис. 232

- 1)  $4 \cdot 10^4$  рад/с                      2)  $2,5 \cdot 10^3$  рад/с  
3)  $8 \cdot 10^3$  рад/с                      4)  $5,5 \cdot 10^3$  рад/с

**А9.** Пробивное напряжение конденсатора 300 В. Будет ли пробит этот конденсатор, если его включить в сеть переменного тока на 220 В?

- 1) не будет  
2) будет  
3) недостаточно данных  
4) это зависит от металла, из которого изготовлены обкладки

**А10.** В колебательном контуре частота электромагнитных колебаний 0,1 МГц, а максимальная сила тока 0,628 А. Какой максимальный заряд проходит через поперечное сечение проводника?

- 1) 6,28 нКл                      2) 10 пКл                      3) 3,14 нКл                      4) 1 мКл

**A1.** Периоду колебаний 1 соответствуют 4 клетки, а периоду колебаний 2 — только две. Значит, период колебаний 1 вдвое больше периода колебаний 2. А так как частота обратна периоду, значит, частота колебаний 2 вдвое больше частоты колебаний 1, т.е.  $\frac{\nu_2}{\nu_1} = 2$ .

*Правильный ответ 2).*

**A2.** Параметрами, не изменяющимися в процессе гармонических колебаний, являются амплитуда, циклическая частота, период и начальная фаза.

*Правильный ответ 4).*

**A3.** По закону сохранения механической энергии максимальная потенциальная энергия пружинного маятника  $E_{p \max}$  равна его максимальной кинетической энергии  $E_{k \max}$ . А согласно формуле 62), когда деформация пружины  $x$  равна амплитуде  $A$ ,

$$E_{p \max} = \frac{kA^2}{2},$$

согласно формуле 68)

$$E_{k \max} = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$

следовательно,  $\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$ , откуда

$$v_{\max} = A\sqrt{\frac{k}{m}} = 0,04\sqrt{\frac{20}{0,05}} \text{ м/с} = 0,8 \text{ м/с}.$$

*Правильный ответ 2).*

**А4.** Внесем в наше уравнении число 0,5 в скобки. Получим:  $x = 0,4 \sin(0,25\pi t + 0,5\pi)$ . Теперь сравним полученное уравнение с уравнением гармонических колебаний 229), записанным в общем виде:  $x = A \cos(\omega t + 0,5\pi)$ . Из сравнения следует, что выражение  $0,25\pi$ , стоящее между скобкой и временем  $t$ , и есть циклическая частота  $\omega$ . Значит,

$$\omega = 0,25\pi. \text{ Но, согласно формуле 234) } \omega = \frac{2\pi}{T},$$

следовательно,  $0,25\pi = \frac{2\pi}{T}$ , откуда  $T = 8 \text{ с}$ .

*Правильный ответ 3).*

**А5.** Циклическую частоту математического маятника определяет формула 236):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Длину маятника можно связать с высотой, на которую его подняли, следующим образом. Из рис. 236 следует, что

$$l - h = l \cos \alpha, \quad \text{откуда } l - l \cos \alpha = h$$

$$\text{и } l = \frac{h}{1 - \cos \alpha}.$$

С учетом этого

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{h}(1 - \cos \alpha)}.$$

*Правильный ответ 4).*

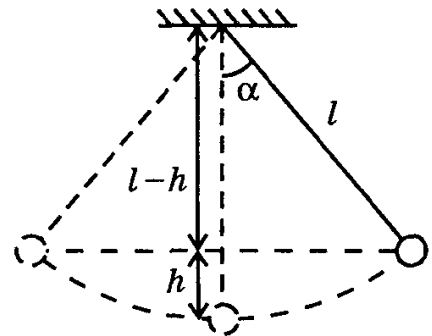


Рис. 236

**А6.** Из рис. 231 следует, что половина длины волны  $\frac{\lambda}{2} = 8 \text{ см}$ , значит, вся длина волны  $\lambda = 16 \text{ см} = 0,16 \text{ м}$ . Из формулы 250)  $\lambda = \frac{v}{\nu}$  следует, что скорость волны  $v = \lambda \nu = 0,16 \cdot 4 \text{ м/с} = 0,64 \text{ м/с}$ .

*Правильный ответ 3).*

**А7.** Наложение когерентных волн друг на друга с образованием максимумов и минимумов называется интерференцией. Чтобы узнать, что будет наблюдаться в месте их наложения, разделим разность хода волн на половину длины волны:

$$\frac{\Delta r}{0,5\lambda} = \frac{3 \cdot}{0,5 \cdot 1} = 6.$$

Значит, разность хода содержит четное число полуволн, что, согласно формуле 251)

$$\Delta r = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

соответствует максимуму.

*Правильный ответ 4).*

**А8.** Согласно формуле 260) циклическая частота электромагнитных колебаний в колебательном контуре равна

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{16 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}} \text{ рад/с} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ рад/с.}$$

*Правильный ответ 2).*

**А9.** На первый взгляд, конденсатор пробит не будет, ведь, чтобы его пробить, надо подать на его обкладки напряжение, превышающее пробивное напряжение 300 В, а в сети всего 220 В. Но надо знать, что 220 В — это действующее напряжение переменного тока, а его максимальное напряжение, как это следует из формулы 265)

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

равно:

$$U_{\max} = U\sqrt{2} = 220\sqrt{2} \text{ В} = 308 \text{ В} > 300 \text{ В}$$

значит, конденсатор будет пробит.

*Правильный ответ 2).*