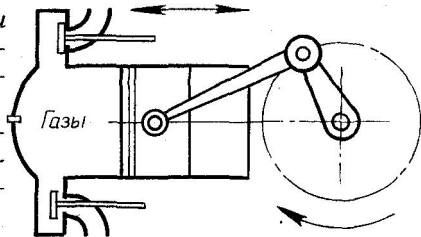


ОК-1

Механические колебания

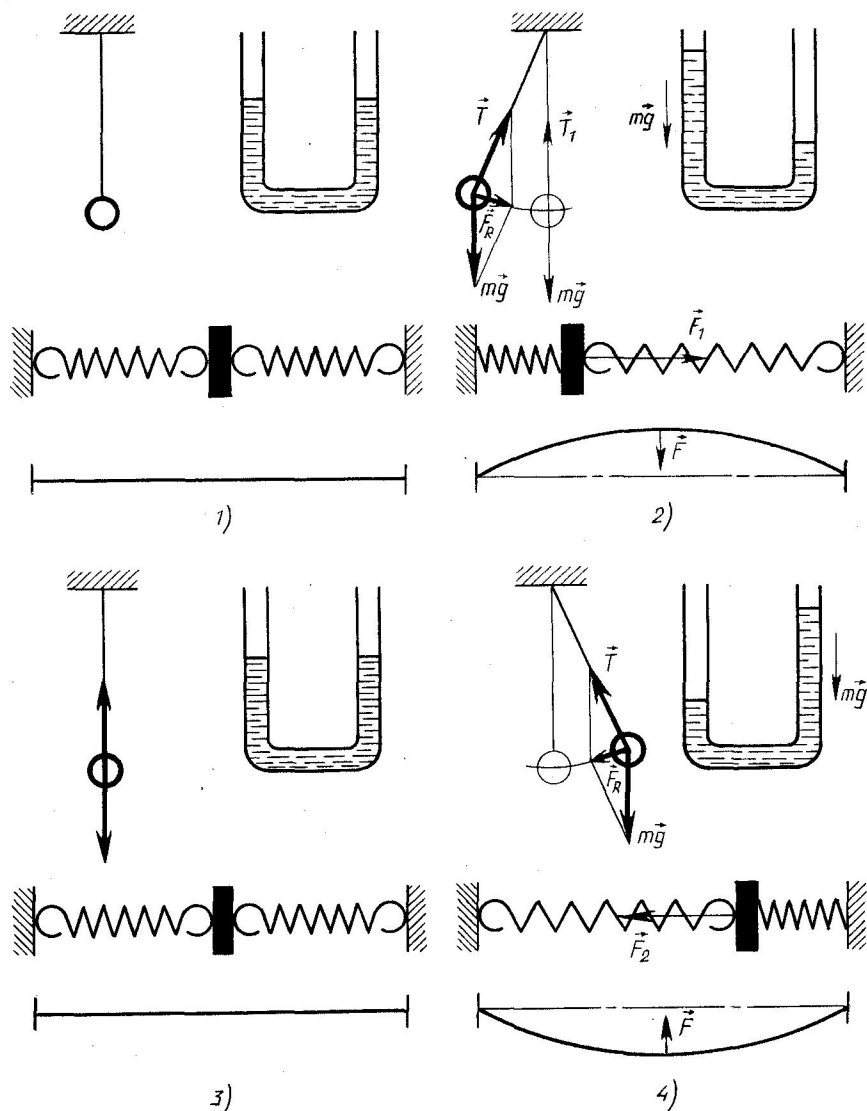
Механические колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Вынужденные колебания — это колебания, которые происходят под действием внешней, периодически изменяющейся силы.



Свободные колебания — это колебания, которые возникают в системе под действием внутренних сил, после того как система была выведена из положения устойчивого равновесия.

Колебательные системы

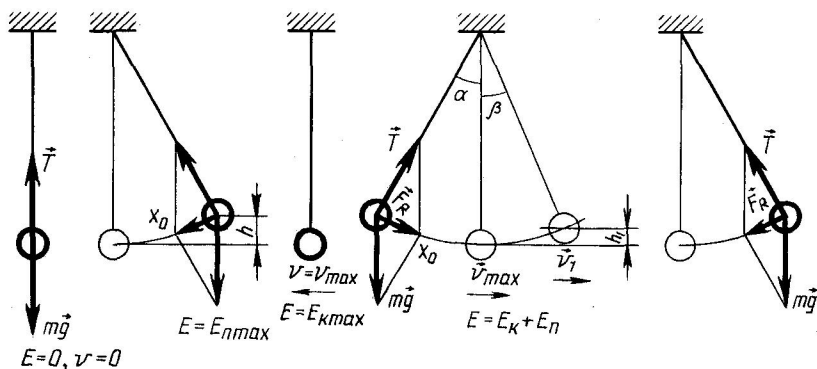


Условия возникновения механических колебаний

1. Наличие положения устойчивого равновесия, при котором равнодействующая равна нулю.

2. Хотя бы одна сила должна зависеть от координат.
3. Наличие в колеблющейся материальной точке избыточной энергии.
4. Если вывести тело из положения равновесия, то равнодействующая не равна нулю.
5. Силы трения в системе малы.

Превращение энергии при колебательном движении



В неустойчивом равновесии имеем

$$E_{п} \rightarrow E_{к} \rightarrow E_{п} \rightarrow E_{к} \rightarrow E_{п}.$$

За полное колебание

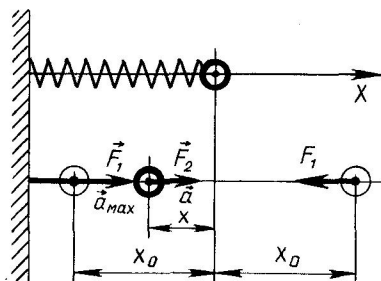
$$mgh_{\max} = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \text{const.}$$

Выполняется закон сохранения энергии.

Параметры колебательного движения

1. Смещение x — отклонение колеблющейся точки от положения равновесия в данный момент времени.

2. Амплитуда x_0 — наибольшее смещение от положения равновесия.



3. Период T — время одного полного колебания. Выражается в секундах (с).

4. Частота ν — число полных колебаний за единицу времени. Выражается в герцах (Гц).

$$T = \frac{1}{\nu}$$

$$\nu = \frac{1}{T}; \quad \frac{1}{c} = \Gamma_{ц}$$

5. Величину $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$ называют циклической (круговой) частотой колебаний. Циклическая частота равна числу колебаний, совершаемых материальной точкой за $2\pi/c$.

6. Колебательное движение, которое вновь повторяется, называют полным колебанием.

Пример колебательного движения — свободные колебания пружинного маятника:

$$F_x = -kx \text{ — закон Гука;}$$

$$F_x = ma_x \text{ — второй закон динамики;}$$

$$ma_x = -kx, \quad a_x = -\frac{kx}{m},$$

$$\frac{k}{m} = \text{const},$$

$$a_x = -\frac{k}{m} x$$

— уравнение свободных колебаний пружинного маятника.

Следовательно, $a \sim x$ в сторону равновесия.

Зависит ли ускорение колеблющегося тела пружинного маятника от силы тяжести?

Из второго закона Ньютона

$$m\vec{a} = \vec{F}_2 + m\vec{g},$$

$$F_1 + mg, \quad F_2 > mg,$$

где F_1 и F_2 — силы упругости пружины.

Проекция на ось OY :

$$ma = F_2 - mg = k|x_2| - mg =$$

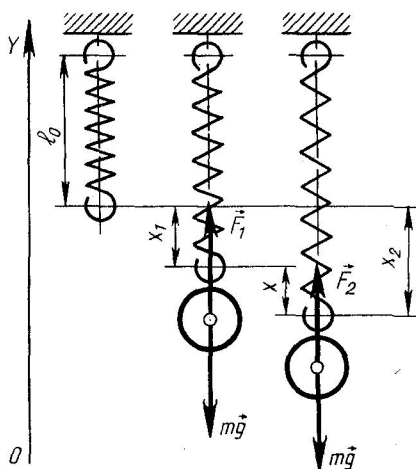
$$= k(x + x_1) - mg = kx + kx_1 - mg.$$

$$\text{Так как } x_1 = \frac{mg}{k},$$

то

$$ma = kx + \frac{kmg}{k} - mg \rightarrow ma = k|x|.$$

Ускорение \vec{a} тела, колеблющегося на пружине, не зависит от силы тяжести, действующей на это тело, но пропорционально смещению x .



ОК-2

Свободные колебания математического маятника

Математический маятник — модель — материальная точка, подвешенная на нерастяжимой невесомой нити.

Запись движения колеблющейся точки как функции времени.

Выведем маятник из положения равновесия. Равнодействующая (тангенциальная) $F_{\tau} = -mg \sin \alpha$, т. е. F_{τ} — проекция силы тяжести на касательную к траектории тела. Согласно второму закону динамики

$$ma_{\tau} = F_{\tau}.$$

Так как угол α очень мал, то

$$ma_{\tau} = -mg \sin \alpha.$$

Отсюда

$$a_{\tau} = g \sin \alpha, \quad \sin \alpha = \alpha = s/L,$$

$$a_{\tau} = g \frac{s}{L}$$

$$\frac{g}{L} = \text{const.}$$

Следовательно, $a \sim s$ в сторону равновесия.

Ускорение a материальной точки математического маятника пропорционально смещению s .

Таким образом, уравнение движения пружинного и математического маятников имеют одинаковый вид: $a \sim x$.

Период колебания

Пружинный маятник

Предположим, что собственная частота колебаний тела, прикрепленного к пружине, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

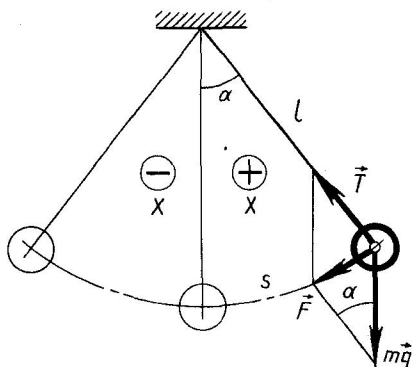
Период свободных колебаний $T = \frac{1}{\nu}$.

Циклическая частота $\omega = 2\pi \nu$.

Следовательно, $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Получаем

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m}}}, \quad \text{откуда } T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

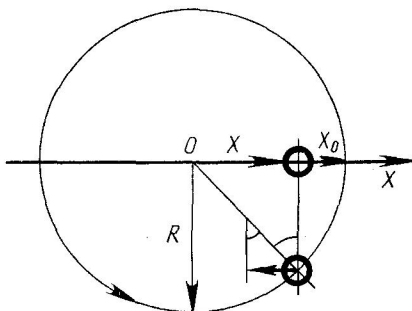


Математический маятник

Собственная частота математического маятника $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$.

Циклическая частота $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Следовательно, $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$



Законы колебаний математического маятника

1. При небольшой амплитуде колебаний период колебания не зависит от массы маятника и амплитуды колебаний.

2. Период колебания прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника и обратно пропорционален корню квадратному из ускорения свободного падения.

Гармонические колебания

Простейший вид периодических колебаний, при которых периодические изменения во времени физических величин происходят по закону синуса или косинуса, называют гармоническими колебаниями:

$$x = x_0 \sin \omega t \text{ или}$$

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где x — смещение в любой момент времени; x_0 — амплитуда колебаний; $\omega t + \varphi_0$ — фаза колебаний; φ_0 — начальная фаза.

Уравнение $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, описывающее гармонические колебания, является решением дифференциального уравнения $x'' + \omega^2 x = 0$.

Дважды продифференцировав это уравнение, получим

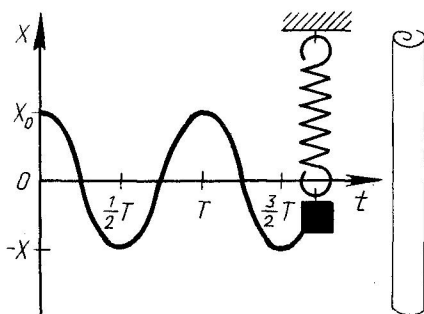
$$x' = -\omega x_0 \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$x'' = -\omega^2 x_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$\omega^2 x_0 \cos(\omega t + \varphi_0) - \omega^2 x_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = 0.$$

Если какой-либо процесс можно описать уравнением $x'' + \omega^2 x = 0$, то совершается гармоническое колебание с циклической частотой ω и периодом $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Таким образом, при гармонических колебаниях скорость и ускорение также изменяются по закону синуса или косинуса.



Так, для скорости

$$v_x = x' = (x_0 \cos \omega t)' = x_0 (\cos \omega t)',$$

т. е.

$$v = -\omega x_0 \sin \omega t,$$

или

$$v = \omega x_0 \cos (\omega t + \pi/2) = v_0 \cos (\omega t + \pi/2),$$

где $v_0 = x_0 \omega$ — амплитудное значение скорости.

Ускорение изменяется по закону

$$\begin{aligned} a_x = v'_x = x'' &= \\ &= -(\omega x_0 \sin \omega t)' = \\ &= -\omega x_0 (\sin \omega t)', \end{aligned}$$

т. е.

$$\begin{aligned} a &= -\omega^2 x_0 \cos \omega t = \\ &= \omega^2 x_0 \cos (\omega t + \pi) = \\ &= a_0 \cos (\omega t + \pi), \end{aligned}$$

где $a_0 = \omega^2 x_0$ — амплитудное значение ускорения.

Преобразование энергии при гармонических колебаниях

Если колебания тела происходят по закону $x = x_0 \sin (\omega t + \varphi_0)$, то *кинетическая энергия тела равна:*

$$W_k = \frac{mv_x^2}{2} = \frac{mx_0^2 \omega^2 \cos^2 (\omega t + \varphi_0)}{2}.$$

Потенциальная энергия тела равна:

$$W_n = \frac{kx^2}{2} = \frac{kx_0^2 \sin^2 (\omega t + \varphi_0)}{2}.$$

Так как $k = m\omega^2$, то

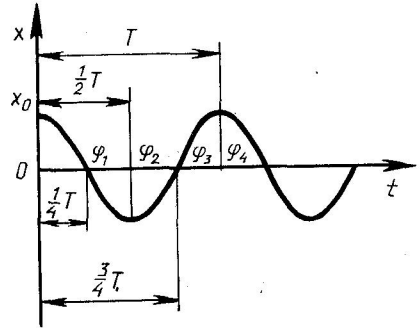
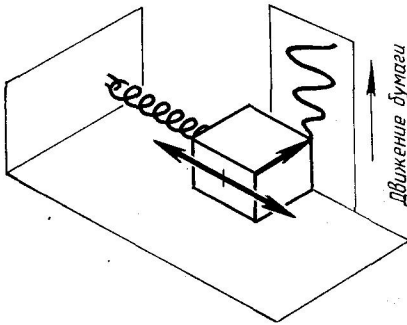
$$W_n = \frac{m\omega^2 x_0^2 \sin^2 (\omega t + \varphi_0)}{2}.$$

За нулевой уровень отсчета потенциальной энергии выбирается положение равновесия тела ($x=0$).

Полная механическая энергия системы равна:

$$W_0 = W_k + W_n = \frac{m\omega^2 x_0^2}{2}.$$

Кинематика гармонических колебаний



Фаза колебаний φ — физическая величина, которая стоит под знаком \sin или \cos и определяет состояние системы в любой момент времени согласно уравнению $x = x_0 \cos \varphi$.

Время в долях периода	Фаза в радианах
0	0
$1/4 T$	$\pi/2$
$1/2 T$	π
$3/4 T$	$3/2\pi$
T	2π

Смещение x тела в любой момент времени

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

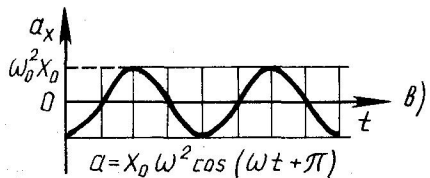
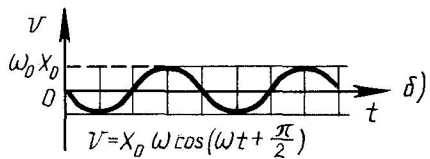
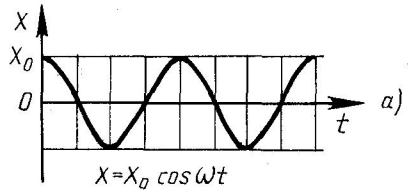
где x_0 — амплитуда; φ_0 — начальная фаза колебаний в начальный момент времени ($t=0$), определяет положение колеблющейся точки в начальный момент времени.

Скорость и ускорение при гармонических колебаниях

Если тело совершает гармонические колебания по закону $x = x_0 \cos \omega t$ вдоль оси Ox , то скорость движения тела v_x определяется выражением

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Более строго, скорость движения тела — производная координаты x по времени t :



$$v_x = x'(t) = -x\omega \sin \omega t = x_0\omega_0\omega \cos(\omega t + \pi/2).$$

Проекция ускорения:

$$a_x = v'_x(t) = -x_0\omega \cos \omega t = x_0\omega^2 \cos(\omega t + \pi),$$

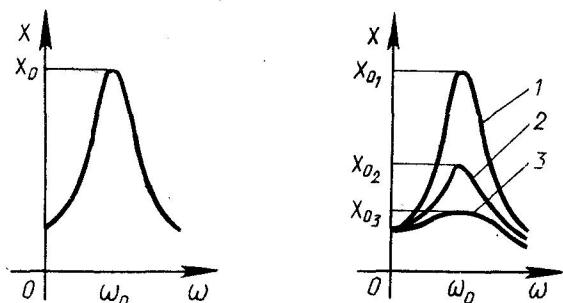
$$v_{\max} = \omega x_0,$$

$$a_{\max} = \omega^2 x.$$

Если $\varphi_{0x} = 0$, то $\varphi_{0v} = \pi/2$, $\varphi_{0a} = \pi$.

Резонанс

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний тела при совпадении частоты ω_F изменения действующей на это тело внешней силы с собственной частотой ω_c свободных колебаний данного тела — механический резонанс. Амплитуда возрастает, если $\omega_F \rightarrow \omega_c$; становится максимальной при $\omega_c = \omega_F$ (резонанс).



Возрастание x_0 при резонансе тем больше, чем меньше трение в системе. Кривые 1, 2, 3 соответствуют слабому, сильному критическому затуханию:

$$F_{\text{тр}3} > F_{\text{тр}2} > F_{\text{тр}1}.$$

При малом трении резонанс острый, при большом трении тупой. Амплитуда при резонансе равна:

$$x_0 = \frac{F_{\max}}{\mu \omega_c},$$

где F_{\max} — амплитудное значение внешней силы; μ — коэффициент трения.

Использование резонанса

Раскачивание качелей.

Машины для утрамбовки бетона.

Частотомеры.

Борьба с резонансом

Уменьшить резонанс можно, увеличив силу трения или

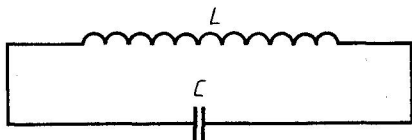
$$\omega_c \neq \omega_F.$$

На мостах поезд движется с определенной скоростью.

Электрические свободные колебания

Периодические изменения заряда q , силы тока I и напряжения U называют электрическими свободными колебаниями.

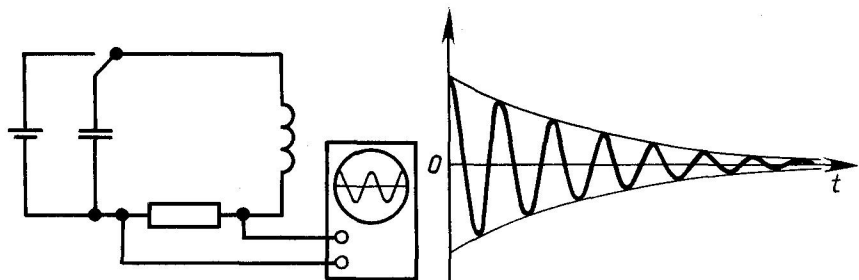
Колебательный контур



Он состоит из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C . Если зарядить конденсатор до напряжения U_0 , то в начальный момент времени $t_1=0$ на обкладках конденсатора установятся амплитудные значения напряжения U_0 и заряда $q_0=CU_0$. Свободные электромагнитные колебания можно наблюдать на экране осциллографа.

Полная энергия W системы равна энергии электрического поля $W_{эл}$:

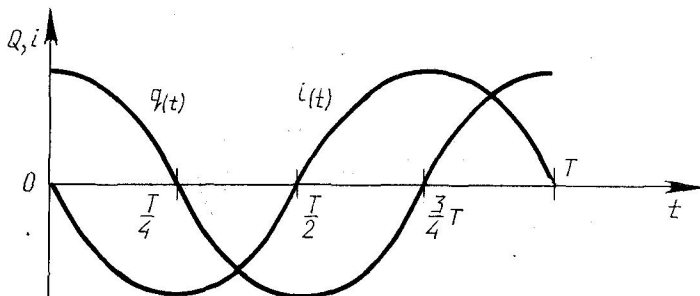
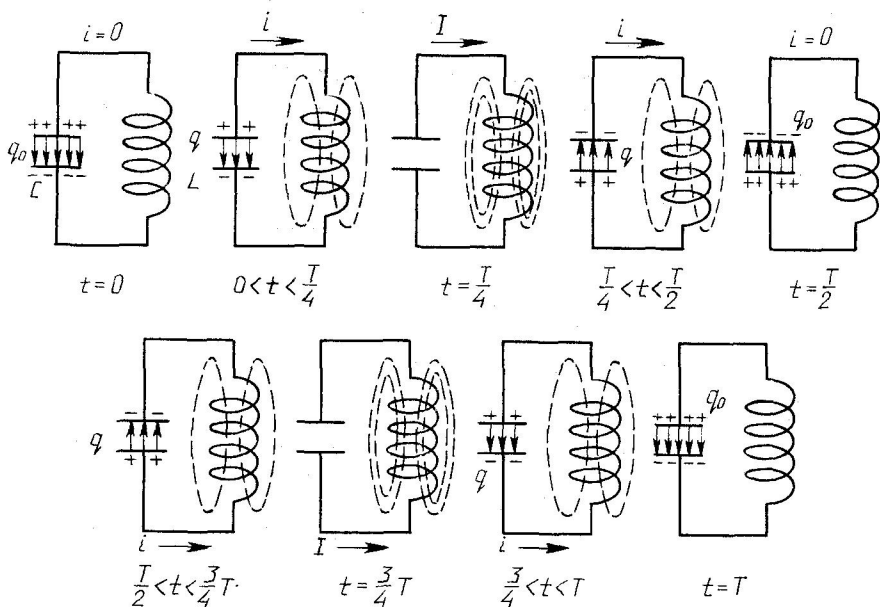
$$W = W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}.$$



Если цепь замыкают, то начинает течь ток. Вследствие самоиндукции в катушке конденсатор разряжается не мгновенно, а постепенно. При этом ток увеличивается, достигая своего максимального значения I_0 в момент времени $t_2=T/4$, а заряд на конденсаторе становится равным нулю: $W = W_m = \frac{LI^2}{2}$.

В следующий момент времени ток течет в том же направлении, уменьшаясь до нуля, что вызывает перезарядку конденсатора. В момент времени $t_3=T/2$ заряд $q=q_0$, напряжение $U=U_0$, ток $I=0$.

Затем конденсатор снова разряжается, ток через индуктивность течет в обратном направлении. Через промежуток времени T система приходит в исходное состояние. Завершается полное колебание, процесс повторяется.



В любой момент времени энергия:

$$W = W_{эл} + W_{м} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}.$$

Уравнение свободных электромагнитных колебаний

В контуре полная энергия W остается постоянной в течение всего времени:

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}.$$

Так как полная энергия контура является величиной постоянной, то $W' = 0$, тогда $\left(\frac{q^2}{2C}\right)' + \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = 0$.

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

откуда следует $ii' = -\frac{1}{LC} qq'$. При $i=0$, $i'=0$ $q'q'' = -\frac{1}{CL} qq'$,
 $q'' = -\frac{1}{LC} q$.

Если $L > 0$ и $C > 0$, то и $\frac{1}{LC} > 0$.

Следовательно, $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$, т. е. $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Тогда уравнение
 $q'' = -\frac{1}{LC} q$ принимает вид $q'' = -\omega_0^2 q$.

Его можно записать как $q = q_0 \cos \omega_0 t$.

Для тока $i = q' = -q \omega_0 \sin \omega_0 t$, $i = I \cos \omega_0 t + \frac{\pi}{2}$.

Следовательно,

для конденсатора

для катушки индуктивности

$$\begin{aligned} q &= q_0 \cos \omega_0 t, \\ U &= U_0 \cos \omega t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i &= I_0 \cos (\omega t + \pi/2), \\ U &= U_0 (\omega t + \pi), \end{aligned}$$

где q_{\max} , U_0 , I_0 — амплитудные значения заряда, напряжения и тока.

Амплитуда свободных электромагнитных колебаний

$$W = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{CU_0^2}{2},$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{CU_0^2}{L}}, \quad U_0 = \sqrt{\frac{I_0^2 L}{C}}.$$

Период колебания

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{1}{LC}},$$

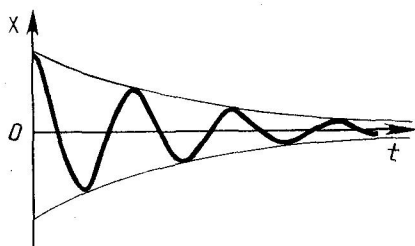
$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Получили формулу Томсона.

ОК-5

Генератор высокочастотных электромагнитных колебаний

1. В природе любые колебания колебательной системы без воздействия внешних сил — затухающие.



2. Системы, в которых генерируются незатухающие колебания за счет поступления энергии от источника внутри системы, называются автоколебательными.

3. Колебания, существующие в системе без воздействия на нее внешних периодических сил, называются автоколебаниями. Примеры автоколебательных систем: электрический звонок, свисток, часы, органные трубы, автогенераторы, наше сердце, легкие, голосовые связки.

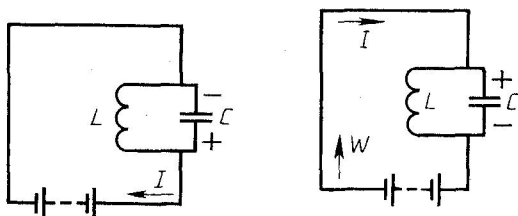
Получение незатухающих колебаний в контуре

Если конденсатор колебательного контура заряжен, то в контуре возникают затухающие колебания. Электрическая энергия $W_{эл}$ переходит во внутреннюю энергию $U_{вн}$:

$$\frac{U^2 C}{2} = \frac{LI^2}{2} + U_{вн}$$

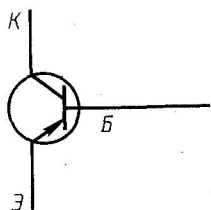
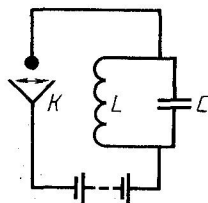
Пополнять энергию колебательного контура можно, подзаряжая конденсатор. Для этого контур подключают к источнику тока. Контур подключается к источнику тока только в те интервалы времени, когда пластина конденсатора, присоединенная к положительному полюсу источника, заряжена положительно.

Если источник постоянного тока будет все время подключен к контуру, то в $1/2 T$ энергия поступает в контур, а следующую $1/2 T$ возвращается в источник, т. е. колебания затухают.

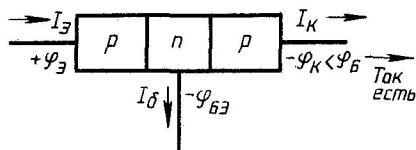
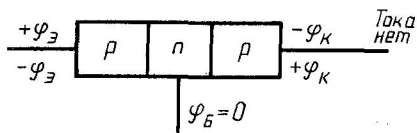


Незатухающие колебания установятся в том случае, если контур будет подключаться к источнику только в первую половину периода. Для выполнения такого условия ключ должен замыкать и размыкать цепь с частотой, соответствующей частоте электромагнитных колебаний контура:

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



Однако механический ключ инертен.

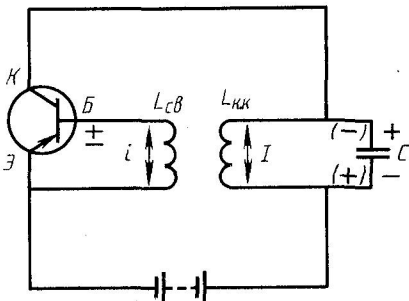


Безынерционным ключом является транзистор. Транзистор обеспечивает поступление энергии к колебательному контуру, если напряжение на электронном переходе меняется синфазно с напряжением на контуре.

Генератор высокочастотных колебаний на транзисторе

Первая четверть периода. Положительно заряженная пластина конденсатора, соединенная с коллектором, разряжается. Ток в колебательном контуре возрастает до максимального значения (I_{\max}).

В катушке связи возникает индукционный ток такого направления, что база имеет отрицательный потенциал относительно эмиттера. Переходы база — коллектор и эмиттер — база прямые. Транзистор открыт. Энергия от источника поступает через транзистор в колебательный контур (ключ замкнут).



Вторая четверть периода. Ток в контуре убывает. Верхняя пластина заряжается отрицательно.

В катушке связи ток меняет направление. На базе положительный потенциал. Переход коллектор — база обратный. Тока в цепи нет (ключ разомкнут).

Третья четверть периода. Конденсатор разряжается. Ток растет до максимального значения, направлен от нижней пластины к верхней.

В катушке связи ток направлен так, что база получает положительный потенциал. Переход база — коллектор обратный. Тока в цепи нет (ключ разомкнут).

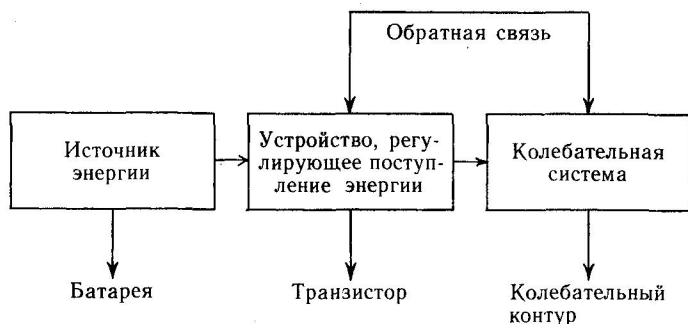
Четвертая четверть периода. Ток в контуре, не меняя направления, убывает. Верхняя пластина заряжается положительно.

В катушке связи ток меняется по направлению. Заряд на базе отрицательный. Переходы база — коллектор и эмиттер — база прямые. Энергия поступает от источника в колебательный контур (ключ замкнут).

Таким образом, происходят незатухающие электромагнитные колебания за счет поступления энергии от источника в колебательный контур в течение $1/2 T$.

Элементы автоколебательной системы

Катушка обратной связи



ОК-6

Вынужденные колебания

Колебания, возникающие в колебательной системе под действием периодически изменяющихся внешних сил, называются вынужденными.

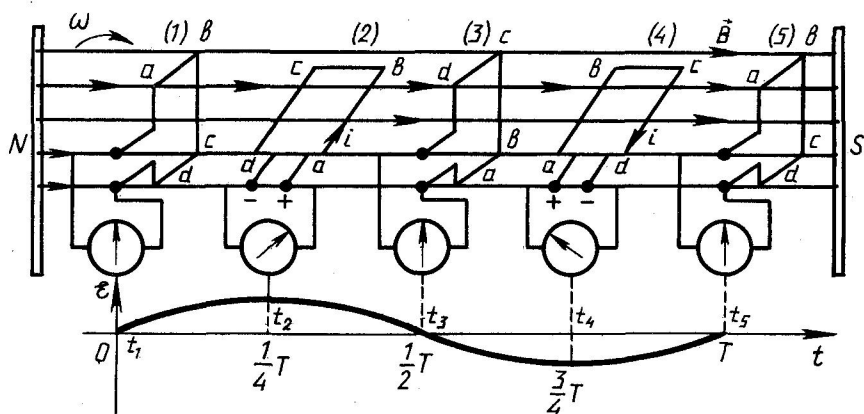
$$\left. \begin{aligned} F &= F_0 \cos \omega t, \\ U &= U_0 \cos \omega t \end{aligned} \right\} \text{ — колебательная система.}$$

Переменный ток

Ток, изменяющийся по направлению и величине по гармоническому закону, называется переменным.

Если рамка в положении 1, $t=0$, то $i = I_0 \sin \omega t$; если же рамка в положении 2, $t=0$, то $i = I_0 \cos \omega t$.

Получение (генерирование) переменного тока ($\sim I$)



При вращении рамки в магнитном поле меняется магнитный поток. В рамке наводится переменная ЭДС индукции. Если цепь замкнута, то возникает индукционный ток, который непрерывно меняется по модулю, а через $1/2 T$ — по направлению.

Используя основной закон электромагнитной индукции, получаем уравнение

$$\begin{aligned} e &= -\Phi', \\ \Phi' &= (BS \cos \omega t)', \\ e &= BS\omega \sin \omega t, \\ e &= \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t, \end{aligned}$$

где $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$ — амплитудное значение ЭДС индукции.

Вынужденные электрические колебания, возникающие в цепях под действием напряжения, осуществляются по синусоидальному или косинусоидальному закону $u = U_{\max} \sin \omega t$ или $u = U_{\max} \cos \omega t$.

Работа и устройство генератора переменного тока

Работа основана на явлении электромагнитной индукции.

Устройство

1. Обмотка статора с большим числом витков, размещенных в его пазах. В ней наводится ЭДС.

2. Станина, внутри которой размещены статор и ротор.

3. Ротор (вращающаяся часть генератора) создает магнитное поле от электромашины постоянного тока. Может иметь p пар полюсов.

4. Статор состоит из отдельных пластин для уменьшения нагрева от вихревых токов. Пластины — из электротехнической стали.

5. Клеммный щиток на корпусе станины для снятия напряжения.

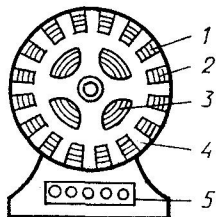
При равномерном вращении ротора в обмотках статора наводится ЭДС:

$$e = E \sin \omega t = BS\omega N \sin 2\pi n t,$$

где $E = BS\omega N$ — максимальное значение ЭДС; n — число оборотов ротора в секунду; N — число витков обмотки статора.

Частота ЭДС равна: $\nu = np$, где p — число пар полюсов. На гидроэлектростанциях в генераторе число пар полюсов равно 40—50, а на тепловых — 10—16.

Вырабатываемое напряжение в промышленных генераторах 10^3 — 10^4 В.

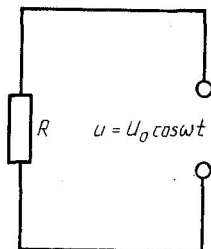


Нагрузка в цепи переменного тока

Активное сопротивление

Электрические устройства, преобразующие электрическую энергию во внутреннюю, называются активными сопротивлениями. Активное сопротивление

$$R = \frac{l\rho}{S}.$$

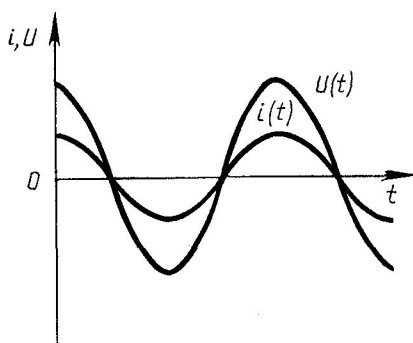


Высокоомные провода, спирали нагревательных приборов, резисторы — активные сопротивления.

1. Мгновенное значение напряжения меняется по гармоническому закону

$$u = v_0 \cos \omega t.$$

2. Мгновенное значение силы тока пропорционально мгновенному значению напряжения и совпадает по фазе:



$$i = \frac{u}{R} = \frac{v_0 \cos \omega t}{R} = I_0 \cos \omega t.$$

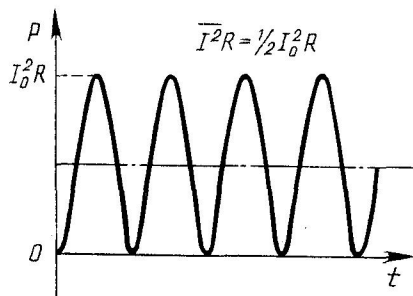
В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения.

3. Мгновенное значение мощности равно:

$$p = i^2 R.$$

Среднее значение мощности за период в цепи переменного тока равно:

$$\bar{p} = \bar{i}^2 R = \frac{I_0^2 R}{2}.$$



4. Действующее значение силы тока получаем из формулы среднего значения мощности:

$$\bar{i}^2 = \frac{I_0^2}{2}.$$

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата мгновенного тока, называется действующим значением переменного тока. Обозначается через I :

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Действующее значение переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.

5. Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

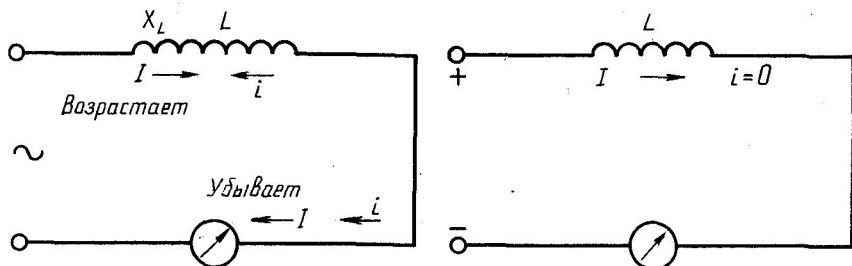
$$U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

6. Закон Ома для цепи с активным сопротивлением:

$$\begin{aligned} i &= I_0 \sin \omega t = I \sqrt{2} \sin \omega t, \\ u &= U_0 \sin \omega t = U \sqrt{2} \sin \omega t, \\ I \sqrt{2} \sin \omega t &= \frac{U \sqrt{2} \sin \omega t}{R}. \end{aligned}$$

Следовательно, $I = \frac{U}{R}$.

Индуктивное сопротивление



В катушке, включенной в цепь переменного напряжения, сила тока меньше силы тока в цепи постоянного напряжения для этой же катушки. Следовательно, катушка в цепи переменного напряжения создает большее сопротивление, чем в цепи постоянного напряжения.

Мгновенное значение силы тока:

$$i = I \sin \omega t.$$

Мгновенное значение напряжения можно установить, учитывая, что $E_i = -E_k$, где E_i — напряженность вихревого электрического поля; E_k — напряженность кулоновского электрического поля, т. е. при изменении тока в цепи возникает ЭДС самоиндук-

ции, за счет которой происходит *сдвиг фаз между напряжением и током на $\pi/2$* .

Таким образом, если

$$e = -L\omega I_0 \cos \omega t,$$

$$e = -u,$$

то

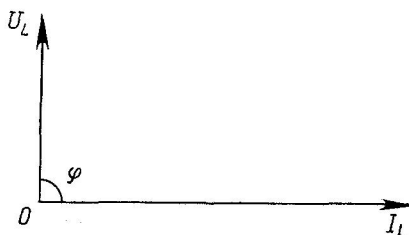
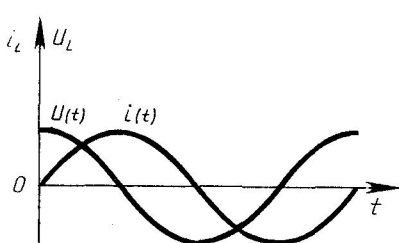
$$u = L\omega I_0 \cos \omega t,$$

или

$$u = U_0 \sin (\omega t + \pi/2),$$

где $U_0 = L\omega I_0$.

Напряжение опережает ток по фазе на $\pi/2$.



Индуктивное сопротивление равно:

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L,$$

так как $U_0 = L\omega I_0$.

Отсюда закон Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{L\omega},$$

где $L\omega$ — индуктивное сопротивление.

Физический смысл: в любое мгновение времени изменению силы тока противодействует ЭДС самоиндукции.

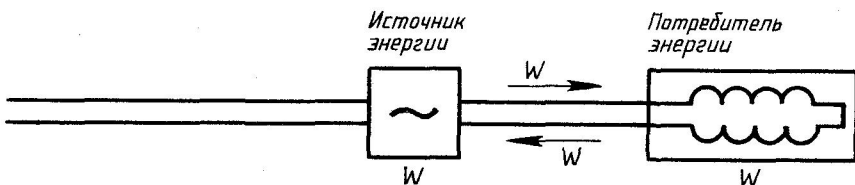
ЭДС самоиндукции — причина индуктивного сопротивления.

Мощность равна:

$$P = IU \cos \varphi,$$

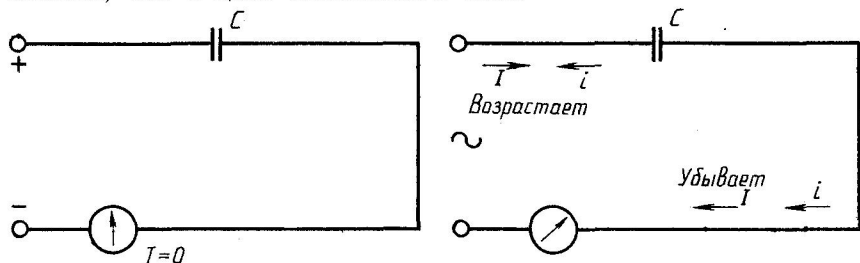
где $\varphi = \pi/2$.

Следовательно, $P = 0$, т. е. происходит обмен энергией между источником напряжения и индуктивной нагрузкой.



Емкостное сопротивление

При включении конденсатора в цепь постоянного напряжения сила тока $I = 0$, а при включении конденсатора в цепь переменного напряжения сила тока $I \neq 0$. Следовательно, конденсатор в цепи переменного напряжения создает сопротивление меньше, чем в цепи постоянного тока.



Мгновенное значение напряжения равно:

$$u = \frac{q}{C} = U_0 \cos \omega t.$$

Мгновенное значение силы тока равно:

$$i = q' = -U_0 C \omega \sin \omega t$$

или

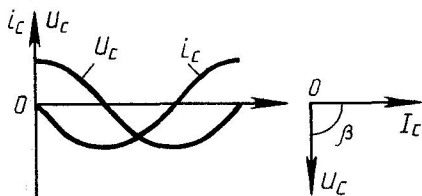
$$i = U_0 C \omega \cos (\omega t + \pi/2),$$

где $U_0 C \omega = I_0$.

Следовательно,

$$i = I_0 \cos (\omega t + \pi/2).$$

Таким образом, колебания напряжения отстают от колебаний тока по фазе на $\pi/2$.



Емкостное сопротивление равно:

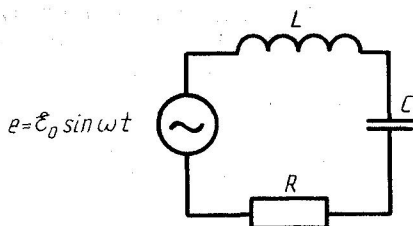
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C},$$

так как $I_0 = U_0 \omega C$.

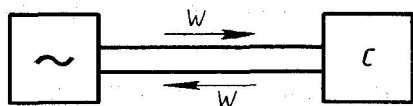
Физический смысл: изменению переменного тока в любое мгновение противодействует электрическое поле между обкладками конденсатора.

Мощность равна:

$$P = IU \cos \varphi.$$



При $\varphi = \pi/2$ мощность $P = 0$, так как идет обмен энергией между источником напряжения и емкостным потребителем.



Резонанс в электрической цепи — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тока при совпадении частот $\omega_0 = \omega$, где ω_0 — собственная частота колебательного контура; ω — частота питающего напряжения. Поскольку $X_C \sim \frac{1}{\omega}$, а $X_L \sim \omega$, то I в цепи будет зависеть от ω и будет максимален при частоте, отвечающей условию:

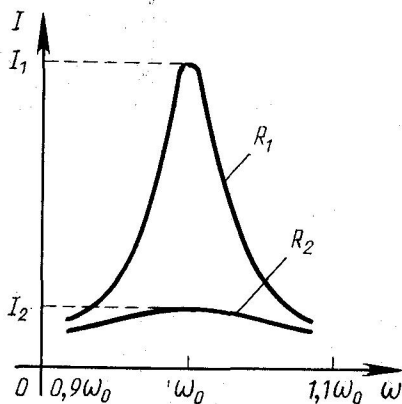
$$\begin{aligned} X_C &= X_L, \\ \frac{1}{\omega_0 C} &= \omega_0 L, \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}}. \end{aligned}$$

Когда $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, в цепи наблюдается резонанс.

Амплитуда установившихся колебаний тока будет определяться уравнением $I_0 = \frac{U_0}{R}$.

Если $\frac{I_0^2 R}{2} t = \frac{U_0 I_0}{2} t$, то при $R \rightarrow 0$ $I \rightarrow \infty$.

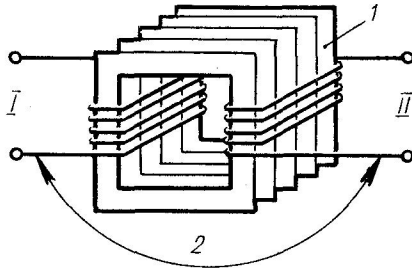
Зависимость тока в колебательном контуре от частоты при двух значениях R , где $R_2 > R_1$.



Трансформатор

Преобразует переменный ток: $U \uparrow I \downarrow$, $U \downarrow I \uparrow$, P и ν не изменяются. 1878 г.— П. Н. Яблочков. 1882 г.— И. Ф. Усагин усовершенствовал.

Устройство

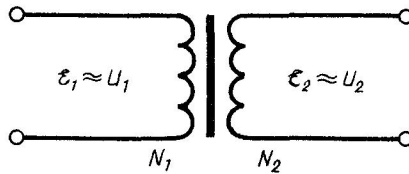


1. Замкнутый сердечник (магнитопровод): набор пластин из трансформаторной стали.

2. Две обмотки: первичная и вторичная.

Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции.

Принцип действия на холостом ходу, т. е. без $R_{\text{н}}$,



$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t, \quad e = E_0 \sin \omega t,$$

Φ и e сдвинуты по фазе на $\pi/2$, $E_0 = \omega \Phi$,

$$e_1 = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad e_2 = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}}{N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}},$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

В этом выводе:

e — мгновенное значение ЭДС;

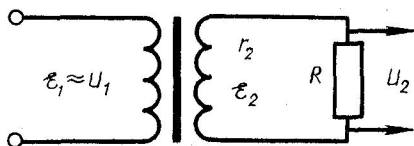
E — амплитудное значение ЭДС;

k — коэффициент трансформации.

Если $k > 1$, то трансформатор понижает U ; если $k < 1$, трансформатор повышает U .

При холостом ходе трансформатор потребляет из сети небольшую энергию, которая затрачивается на перемагничивание его сердечника.

Принцип действия при R_H



Включим во вторичную цепь нагрузку сопротивлением R_H . По вторичной цепи течет переменный ток I_2 той же частоты, что и ток I_1 . Возникает ЭДС индукции \mathcal{E}_2 . Во вторичной катушке снижается напряжение U_2 , так как $U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2$.

По правилу Ленца уменьшается эффективное значение магнитного потока Φ_1

Уменьшение магнитного потока Φ_1 в первичной катушке приводит к уменьшению \mathcal{E}_1 ($\Phi_1 = \Phi_2$), что при постоянстве U_1 вызывает увеличение I_1 в первичной цепи.

Устанавливаются определенные Φ_2 , \mathcal{E}_2 , I_2 во вторичной цепи, а также I_1 в первичной цепи.

Так как $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$, то $\frac{U_1}{U_2 + I_2 r} = k$.

В связи с тем что КПД трансформатора близок к 1, то $P_1 \approx P_2$.

Отсюда $I_1 U_1 \approx I_2 U_2$.

Следовательно, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$.

При повышении U_2 токи I_1 и I_2 уменьшаются.

КПД 97—99%. Чем $> P$, тем $>$ КПД.

Таким образом,

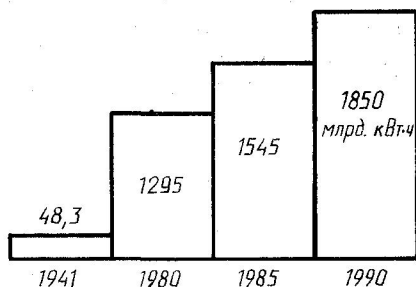
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \approx \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 \mathcal{E}_2 - I_2 r_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%,$$

или

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P + P_N + P_C} \cdot 100\%,$$

где P — мощность на R_H ; P_N — потери в медной обмотке; P_C — потери в стальном сердечнике.

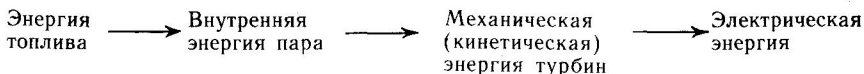
Производство электроэнергии



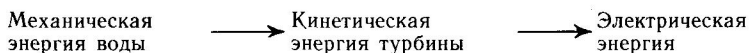
Осуществляется производство в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов.

Получение электроэнергии в бывшем СССР.

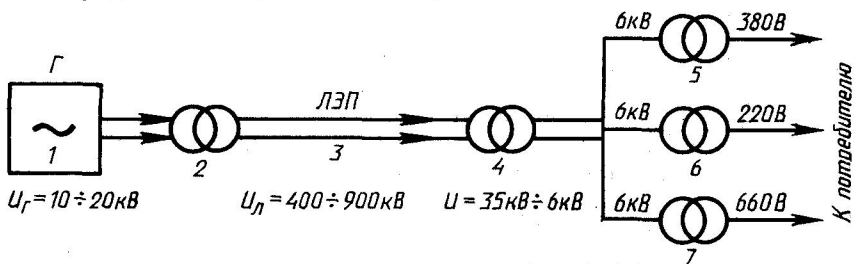
Электростанции: тепловые ТЭЦ и гидроэлектрические ГЭС, атомные АЭС. Источники энергии — ТЭЦ (уголь, газ, мазут, сланцы).



ГЭС (потенциальная энергия воды).



Передача электрической энергии



1 — генератор переменного тока;

2 — повышающие трансформаторы;

3 — линия электропередачи (ЛЭП);

4, 5, 6, 7 — понижающие трансформаторы.

Теплота, выделяемая током на ЛЭП, $Q = I^2 R t$.

Сопротивление ЛЭП $R = \frac{l \rho}{S}$.

Объединив формулы, получим $Q = I^2 \rho \frac{l}{S} t$.

Из этой формулы видно, что для уменьшения Q нужно либо увеличить S , что экономически невыгодно, либо уменьшить силу

тока I . Для уменьшения силы тока нужно увеличить напряжение. Используются повышающие трансформаторы.

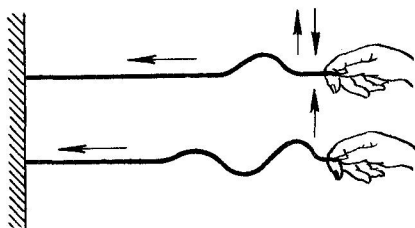
Использование электроэнергии

Промышленность, транспорт, сельское хозяйство, бытовое потребление (освещение, холодильники, телевизоры). Большая часть электроэнергии превращается в механическую, $1/3$ — технические цели (электросварка, плавление, электролиз и т. п.).

ОК-9

Распространение колебаний в упругой среде

Волновое движение — механические волны, т. е. волны, которые распространяются только в веществе (морские, звуковые, волны в струне, волны землетрясений). Источниками волн являются колебания вибратора.



Вибратор — колеблющееся тело. Создает колебания в упругой среде.

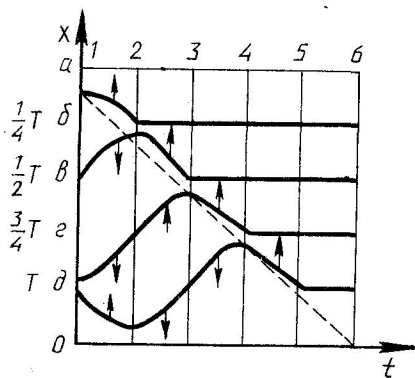
Волной называются колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

Волновая поверхность — геометрическое место точек среды, колеблющихся в одинаковых фазах.

Луч — линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны.

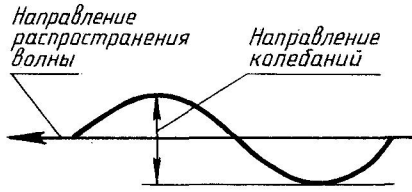
Причина возникновения волн в упругой среде

Если вибратор колеблется в упругой среде, то он воздействует на частицы среды, заставляя их совершать вынужденные колебания. За счет сил взаимодействия между частицами среды колебания передаются от одной частицы к другой.



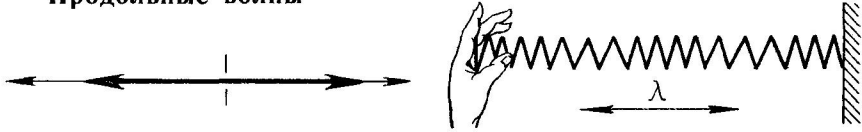
Типы волн

Поперечные волны



Волны, в которых колебания частиц среды происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Возникают в твердых телах и на поверхности воды.

Продольные волны

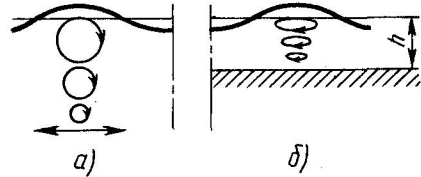


Колебания происходят вдоль распространения волны. Могут возникать в газах, жидкостях и твердых телах.

Поверхностные волны

Траектория движения частиц воды:

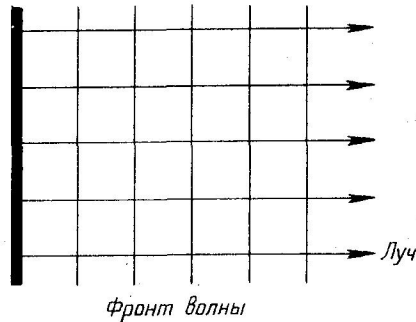
на большой глубине (а)
на малой глубине (б)



Волны, которые распространяются на границе раздела двух сред. Волны на границе между водой и воздухом. Если λ меньше глубины водоема, то каждая частица воды на поверхности и вблизи от нее движется по эллипсу, т. е. представляет собой комбинацию колебаний в продольном и поперечном направлениях. У дна же наблюдается чисто продольное движение.

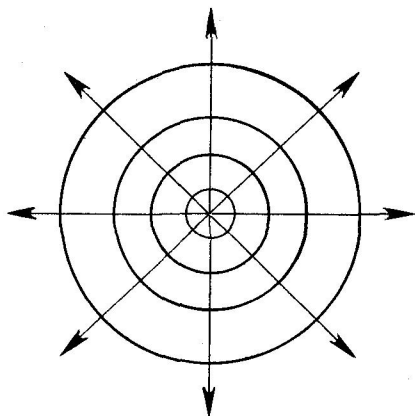
Плоские волны

Волны, у которых волновые поверхности являются плоскостями, перпендикулярными направлению распространения волн.

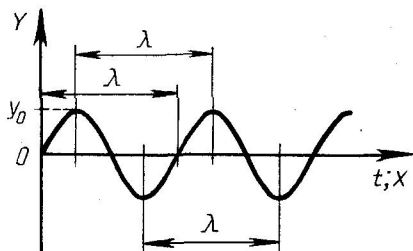
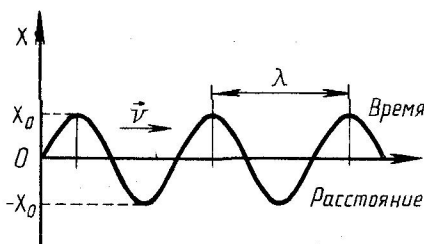


Сферические волны

Волны, у которых волновые поверхности являются сферами. Сферы волновых поверхностей концентрические.



Характеристики волнового движения



Длина волны

Наименьшее расстояние между двумя точками, колеблющимися в одной фазе, называется длиной волны. Зависит только от среды, в которой распространяется волна, при равных частотах вибратора.

Частота

Частота ν волнового движения зависит только от частоты вибратора.

Скорость распространения волны

Скорость $v = \lambda \nu$.

Так как $\nu = \frac{1}{T}$, то $v = \frac{\lambda}{T}$.

Однако скорость распространения волны зависит от вида вещества и его состояния; от ν и λ не зависит.

В идеальном газе $v = \sqrt{\frac{p}{\rho} \gamma} = \sqrt{\frac{R}{M} T \gamma}$, где R — газовая постоянная; M — молярная масса; T — абсолютная температура; γ — постоянная для данного газа; ρ — плотность вещества.

В твердых телах поперечные волны $v = \sqrt{\frac{N}{\rho}}$, где N — мо-

дуть сдвига; продольные волны $v = \sqrt{\frac{Q}{\rho}}$, где Q — модуль все-стороннего сжатия.

В твердых стержнях $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, где E — модуль Юнга.

В твердых телах распространяются как поперечные, так и продольные волны с разными скоростями. На этом основан способ определения эпицентра землетрясения.

Уравнение плоской волны

Его вид $x = x_0 \sin \omega t (t - l/v) = x_0 \sin (\omega t - kl)$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; l — расстояние, пройденное волной от вибратора до рассматриваемой точки A .

Запаздывание по времени колебаний точек среды:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{\Delta x}{\lambda v} = \frac{\Delta x T}{\lambda}.$$

Запаздывание по фазе колебаний точек среды:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t = \frac{2\pi \Delta x}{T v} = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}.$$

Разность фаз двух колеблющихся точек:

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi (l_2 - l_1)/\lambda.$$

Энергия волны

Волны переносят энергию от одной колеблющейся частицы к другой. Частицы совершают только колебательные движения, но не движутся вместе с волной:

$$E = E_k + E_p,$$

где E_k — кинетическая энергия колеблющейся частицы; E_p — потенциальная энергия упругой деформации среды.

В некотором объеме V упругой среды, в которой распространяется волна с амплитудой x_0 и циклической частотой ω , имеется средняя энергия W , равная $W = \frac{1}{2} m \omega^2 x_0^2$, где m — масса выделенного объема среды.

Интенсивность волны

Физическая величина, которая равна энергии, переносимой волной за единицу времени через единицу площади поверхности перпендикулярно направлению распространения волны, называ-

ется интенсивностью волны:

$$j = \overline{W}v = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 x_0^2.$$

Известно, что W и $j \sim x_0^2$.

Мощность волны

Если S — поперечная площадь поверхности, через которую волной переносится энергия, а j — интенсивность волны, то мощность волны равна: $p = jS$.

ОК-10

Звуковые волны

Упругие волны, вызывающие у человека ощущение звука, называются звуковыми волнами.

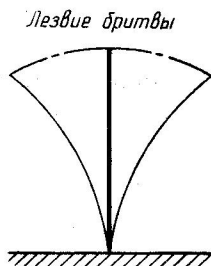
16 — $2 \cdot 10^4$ Гц — слышимые звуки;

меньше 16 Гц — инфразвуки;

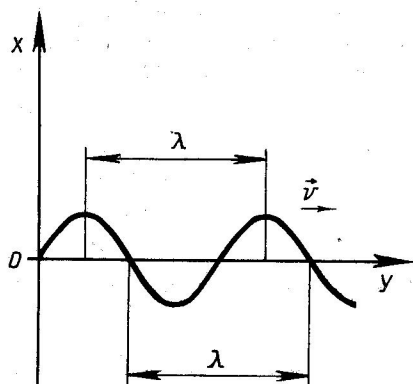
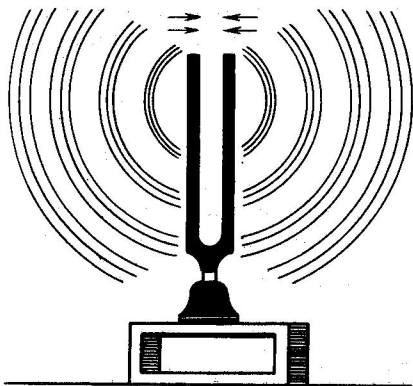
больше $2 \cdot 10^4$ Гц — ультразвуки.

Обязательное условие для возникновения звуковой волны — наличие упругой среды.

Механизм возникновения звуковой волны аналогичен возникновению механической волны в упругой среде. Совершая колебания в упругой среде, вибратор воздействует на частицы среды.



Звук создают долговременные периодические источники звука. Например, музыкальный: струна, камертон, свист, пение.



Шум создают долговременные, но не периодические источники звука: дождь, море, толпа.

Скорость звука

Зависит от среды и ее состояния, как и для любой механической волны:

$$v = \lambda \nu = \frac{\lambda}{T}.$$

При $t = 0^\circ \text{C}$ $v_{\text{воды}} = 1430$ м/с, $v_{\text{стали}} = 5000$ м/с, $v_{\text{воздуха}} = 331$ м/с.

Приемники звуковых волн

1. *Искусственные*: микрофон преобразует механические звуковые колебания в электрические. Характеризуются чувствительностью σ :

$$\sigma = \frac{\Delta U}{\Delta p},$$

σ зависит от $v_{z.v.}$.

2. *Естественные*: ухо.

Его чувствительность воспринимает звук при $\Delta p = 10^{-6}$ Па. Чем меньше частота ν звуковой волны, тем меньше чувствительность σ уха. Если $v_{z.v.}$ уменьшается от 1000 до 100 Гц, то σ уха уменьшается в 1000 раз.

Исключительная избирательность: дирижер улавливает звуки отдельных инструментов.

Физические характеристики звука

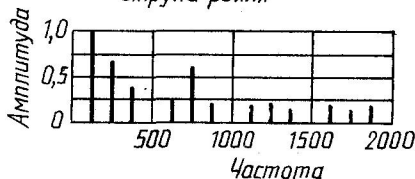
Объективные

1. *Звуковое давление* — давление, оказываемое звуковой волной на стоящее перед ней препятствие.

2. *Спектр звука* — разложение сложной звуковой волны на составляющие ее частоты.



Струна рояля



3. *Интенсивность* звуковой волны:

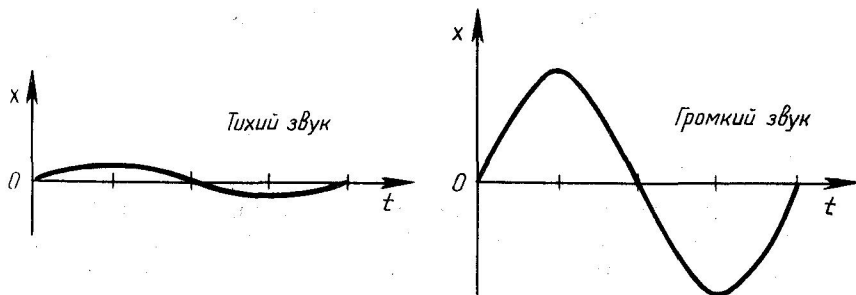
$$I = \frac{W}{St},$$

где S — площадь поверхности; W — энергия звуковой волны; t — время;

$$I = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{1 \text{ Вт}}{1 \text{ м}^2}.$$

Субъективные

Громкость, как и высота, звука связана с ощущением, возникающим в сознании человека, а также с интенсивностью волны.



Человеческое ухо способно воспринимать звуки интенсивностью от 10^{-12} (порог слышимости) до $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (порог болевого ощущения).

Громкость не является прямо пропорциональной величиной интенсивности. Чтобы получить звук в 2 раза большей громкости, надо интенсивность увеличить в 10 раз. Волна, имеющая интенсивность 10^{-2} Вт/м^2 , звучит в 4 раза громче, чем волна интенсивностью 10^{-4} Вт/м^2 . Из-за этого соотношения между объективным ощущением громкости и интенсивностью звука используют логарифмическую шкалу.

Единицей этой шкалы является бел (Б) или децибел (дБ), (1 дБ = 0,1 Б), названная в честь физика Генриха Бела. Уровень громкости выражается в белах:

$$A = \lg \frac{I}{I_0},$$

где $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ — порог слышимости (усредненный).

$$\text{Если } I = 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

то

$$A = \lg \left(\frac{10^{-10}}{10^{-12}} \right) = \lg 100 = 0,2 \text{ Б} = 20 \text{ дБ}.$$

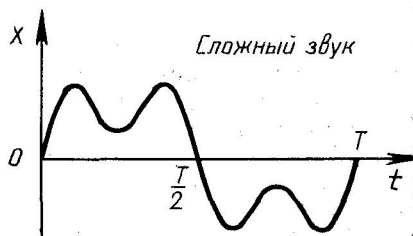
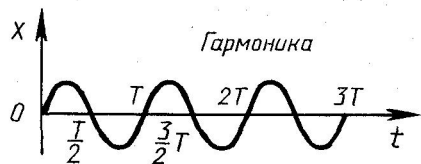
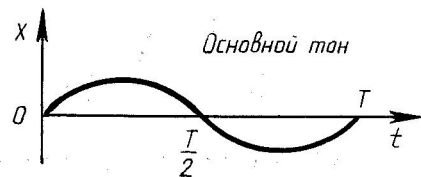
Громкие звуки вредны для нашего организма. Санитарная норма равна 30—40 дБ. Это громкость спокойной тихой беседы.

Шумовая болезнь: высокое артериальное давление крови, нервная возбудимость, тугоухость, быстрая утомляемость, плохой сон.

Интенсивность и громкость звука от различных источников: реактивный самолет — 140 дБ, 100 Вт/м^2 ; рок-музыка в закрытом помещении — 120 дБ, 1 Вт/м^2 ; обычный разговор (50 см от него) — 65 дБ, $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^2$.

Высота звука зависит от частоты колебаний: чем $> \nu$, тем выше звук.

Тембр звука позволяет различать два звука одинаковой высоты и громкости, издаваемых различными инструментами. Он зависит от спектрального состава.



Ультразвук

Применяется: эхолот для определения глубины моря, приготовление эмульсий (вода, масло), отмывка деталей, дубление кожи, обнаружение дефектов в металлических изделиях, в медицине и др.

Распространяется на значительные расстояния в твердых телах и жидкостях. Переносит энергию значительно большую, чем звуковая волна.