Переменный ток

Электрический ток, величина и направление которого изменяются во времени. Установившиеся вынужденные электромагнитные колебания можно рассматривать как протекание переменного тока в цепи, содержащей резистор, катушку индуктивности и конденсатор.

Цепь переменного тока

Цепь, содержащая резистор, катушку индуктивности и конденсатор, к которой приложено переменное напряжение

$U = U_m \cos \omega t$.

[U_m — амплитудное значение напряжения]

Квазистационарность переменного тока

Для переменного тока мгновенные значения силы тока во всех сечениях цепи практически одинаковы, так как их изменения происходят достаточно медленно, а электромагнитные возмущения распространяются по цепи со скоростью, равной скорости света.

◆ Для мгновенных значений квазистационарных токов выполняются закон Ома и вытекающие из него правила Кирхгофа, которые будут использованы применительно к переменным токам (эти законы уже использовались при рассмотрении электромагнитных колебаний).

4.32 Резистор с сопротивлением R в цепи переменного тока

Напряжение, приложенное к концам участка цепи (рисунок *а*)

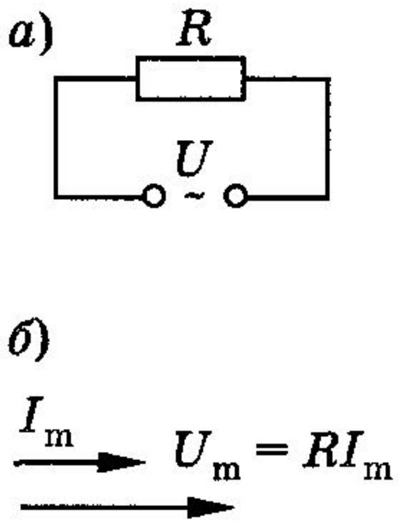
$$U = U_m \cos \omega t$$

Ток через резистор

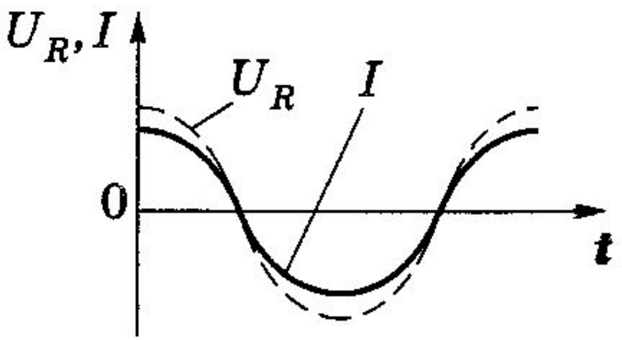
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t$$

Амплитуда силы тока

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$



Графики напряжения и тока в цепи, содержащей только резистор



На рисунке *б* дана векторная диаграмма амплитудных значений силы тока I_m и напряжения U_m на резисторе (сдвиг фаз между I_m и U_m равен нулю).

4.33 Конденсатор с емкостью C в цепи переменного тока

Напряжение, приложенное к концам участка цепи (рисунок a)

$$U = U_m \cos \omega t$$

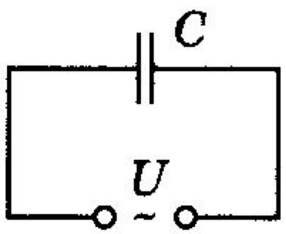
Падение напряжения на конденсаторе

$$U_C = \frac{Q}{C} = U_m \cos \omega t$$

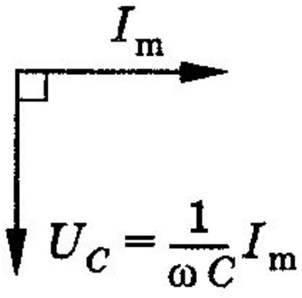
Сила тока

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

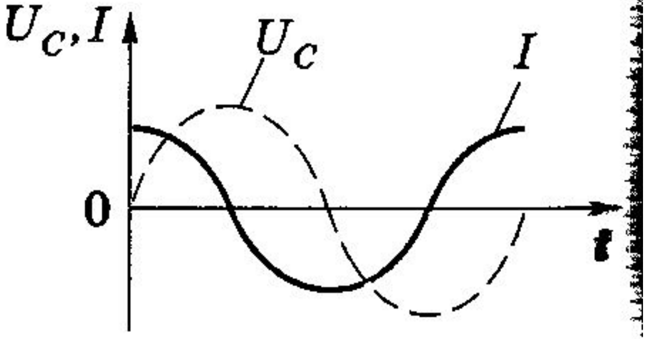
а)



б)



Графики напряжения и тока в цепи, содержащей только конденсатор



Амплитудное значение силы тока

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C}$$

$R_C = \frac{1}{\omega C}$ — ***реактивное емкостное сопротивление.***

Падение напряжения на конденсаторе

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t$$

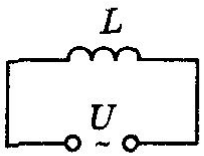
Падение напряжения U_C отстает по фазе от тока I на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (рисунок *б*) и на графиках.

4.34 Катушка с индуктивностью L в цепи переменного тока

Напряжение, приложенное к концам участка цепи (рис. *а*)

$$U = U_{\mathrm{m}} \cos \omega t$$

а)



Графики напряжения и тока в цепи, содержащей только катушку

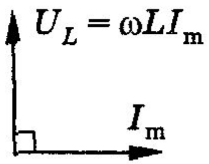
Закон Ома для рассматриваемого участка цепи

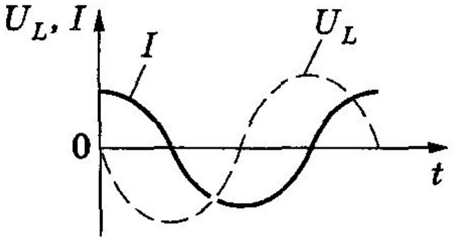
$$U = -\mathcal{E}_s,$$

$$U_{\mathrm{m}} \cos \omega t - L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} = 0,$$

$$L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} = U_{\mathrm{m}} \cos \omega t \quad (*)$$

б)





Падение напряжения на катушке

$$U_L = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

Поскольку внешнее напряжение приложено к катушке индуктивности.

Сила тока

$$I = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_{\mathrm{m}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

После интегрирования выражения $\mathrm{d}I = \frac{U_{\mathrm{m}}}{L} \cos \omega t \, \mathrm{d}t$, получаемого из формулы (*).

Амплитудное значение силы тока

$$I_{\mathrm{m}} = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\omega L}$$

$R_L = \omega L$ — ***реактивное индуктивное сопротивление.***

Падение напряжения на катушке индуктивности

$$U_L = \omega L I_{\mathrm{m}} \cos \omega t$$

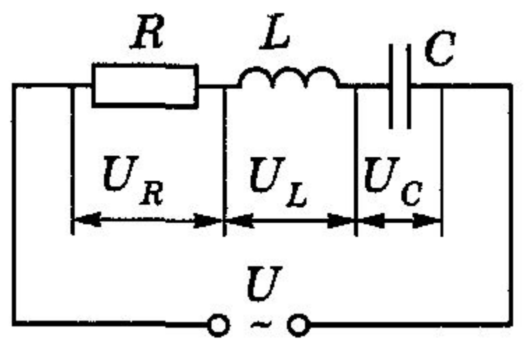
Падение напряжения U_L опережает по фазе ток I, текущий через катушку, на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (рисунок *б*) и на графиках.

4.36 Последовательное *RLC*-соединение

Напряжение, приложенное к концам участка цепи (рисунок *а*)

$$\boxed{U = U_{\mathrm{m}} \cos \omega t}$$

а)



Сумма мгновенных значений падений напряжений на элементах цепи

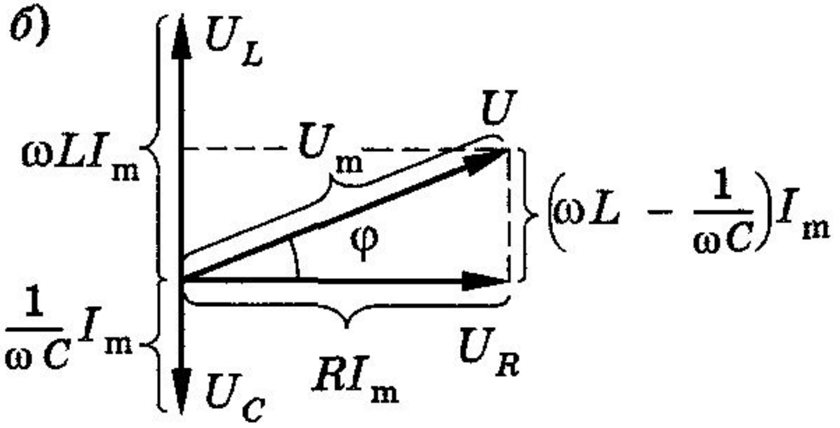
$$\boxed{U_R + U_L + U_C = U}$$

[U_R, U_L и U_C — соответствующие падения напряжений на сопротивлении, катушке индуктивности и конденсаторе]

Амплитуда U_{m} приложенного напряжения

Равна векторной сумме амплитуд всех падений напряжения в цепи (рисунок *б*).

б)



Разность фаз между напряжением и силой тока

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \dfrac{1}{\omega C}}{R} \qquad (*)}$$

(см. рисунок *б*)

Амплитудное значение силы тока

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

(см. рисунок *б*):

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

Сила тока в цепи

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$$

Сдвиг по фазе φ между током I и приложенным напряжением U определяется формулой (*).

Полное сопротивленне цепи

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

Реактивное сопротнвление

$$X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

[R — активное сопротивление; R_L — реактивное индуктивное сопротивление; R_C реактивное емкостное сопротивление 4.34]

4.37 Резонанс напряжений (последовательный резонанс)

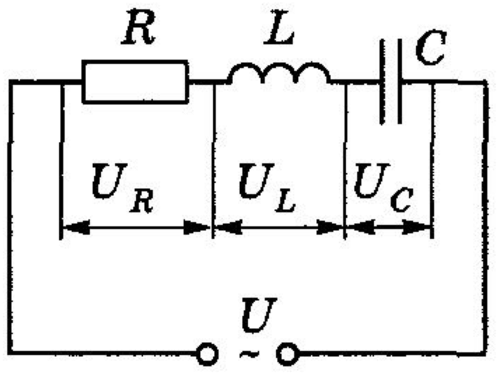
Цепь для наблюдения резонанса напряжений

Последовательное RLC-соединение (см. рисунок).

Условие наблюдения резонанса

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} : \begin{cases} \operatorname{tg} \varphi = \dfrac{\omega L - \dfrac{1}{\omega C}}{R} = 0, \\ Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)^2} = R \end{cases}$$

4.36



Следствия данного условия

Сдвиг фаз между током и напряжением обращается в нуль: *изменения тока и напряжения происходят синфазно*. Полное сопротивление равно активному сопротивлению, т. е. ток в цепи определяется только активным сопротивлением, принимая максимальные (возможные при данном U_m) значения.

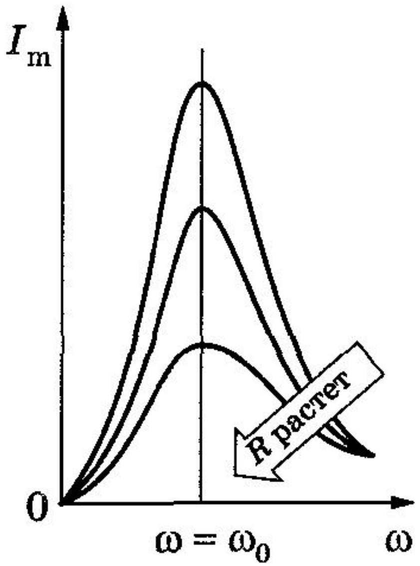
Резонансная частота

$$\boxed{\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

Резонанс напряжений (последовательный резонанс)

Явление резкого возрастания амплитуды силы тока в контуре при совпадении циклической частоты ω внешнего переменного напряжения с собственной частотой ω_0 колебательного контура.

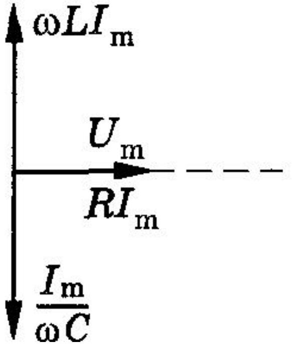
Отчетливо резонанс проявляется при малом активном сопротивлении.



Векторная диаграмма для резонанса напряжений

$$\boxed{(U_L)_{рез} = (U_C)_{рез} = \sqrt{\frac{L}{C}}\,I_m = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}\,U_m}$$

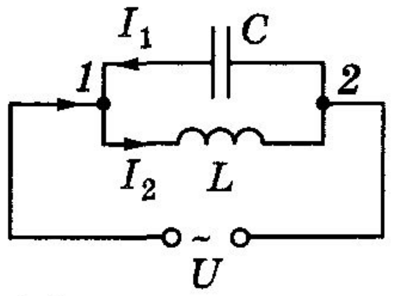
Падение напряжения на активном сопротивлении U_R равно внешнему напряжению U, а падения напряжений на конденсаторе (U_C) и катушке индуктивности (U_L) одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе.



4.38 Резонанс токов (параллельный резонанс)

Цепь для наблюдения резонанса токов

Цепь переменного тока содержит параллельно включенные конденсатор емкостью C и катушку индуктивностью L. Приложенное к цепи напряжение $U = U_m \cos \omega t$. Активным сопротивлением обеих ветвей пренебрегаем.



Ветвь *1C2*	Ветвь *1L2*
$I_1 = I_{m_1} \cos(\omega t - \varphi_1)$,	$I_2 = I_{m_2} \cos(\omega t - \varphi_2)$,
$I_{m_1} = \dfrac{U_m}{1/\omega C}$.	$I_{m_2} = \dfrac{U_m}{\omega L}$.
(Учли, что $R = 0$ и $L = 0$).	(Учли, что $R = 0$ и $C = \infty$).
$\operatorname{tg} \varphi_1 = -\infty$,	$\operatorname{tg} \varphi_2 = +\infty$,
$\varphi_1 = \left(2n + \dfrac{3}{2}\right)\pi$, где $n = 1, 2, \ldots$	$\varphi_2 = \left(2n + \dfrac{1}{2}\right)\pi$, где $n = 1, 2, \ldots$

Разность фаз токов в ветвях: $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$, т. е. токи в ветвях противоположны по фазе. Амплитуда силы тока во внешней (неразветвленной) цепи

$$I_m = |I_{m_1} - I_{m_2}| = U_m \Big|\omega C - \Big|\frac{1}{\omega L}\Big| .$$

Если $\omega = \omega_{рез} = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$, то $I_{m_1} = I_{m_2}$ и $I_m = 0$.

Резонанс токов (параллельный резонанс)

Явление резкого уменьшения амплитуды силы тока во внешней цепи, питающей параллельно включенные конденсатор и катушку индуктивности, при приближении частоты ω приложенного напряжения к резонансной частоте $\omega_{рез}$.

Амплитуда силы тока I_m оказалась равна нулю потому, что активным сопротивлением контура пренебрегли. Если учесть сопротивление R, то разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ не будет равна π, поэтому при резонансе токов амплитуда силы тока I_m будет отлична от нуля, но примет наименьшее возможное значение.

4.39 Мгновенная и средняя мощность

Мгновенное значение мощности

$$P(t) = U(t)I(t)$$

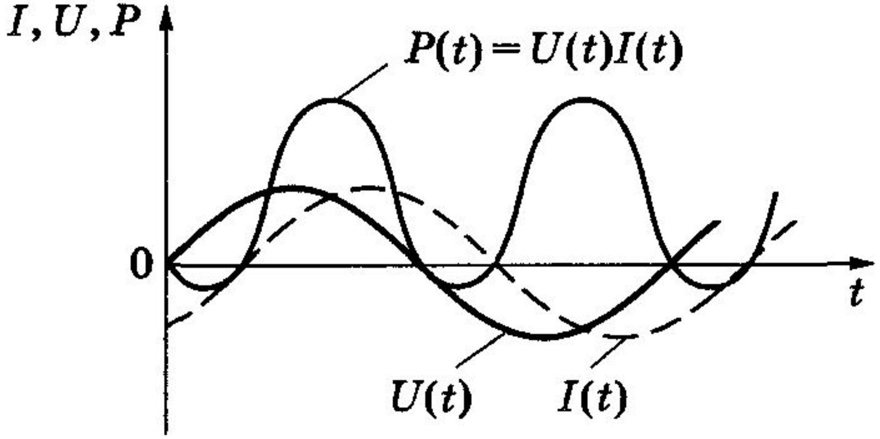
Определяется произведением мгновенных значений напряжения и силы тока.

$$P(t) = I_m U_m \cos(\omega t - \varphi)\cos\omega t = I_m U_m(\cos^2\omega t\cos\varphi + \sin\omega t\cos\omega t\sin\varphi)$$

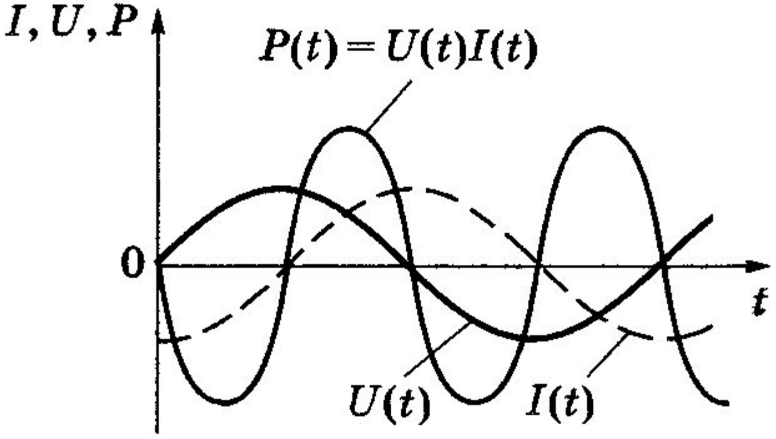
$$U = U_m\cos\omega t; \quad I = I_m\cos(\omega t - \varphi)$$ 4.36.

Сила тока, напряжение и мгновенная мощность

$\varphi = \frac{T}{8}$



$\varphi = \frac{T}{4}$



Средняя мощность

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R I_m^2$$

Так как $\langle \cos^2 \omega t \rangle = \dfrac{1}{2}$, то $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0$.

$U_m \cos\varphi = R I_m$ (векторная диаграмма, 4.36).

Такую же мощность развивает постоянный ток $I = \dfrac{I_m}{\sqrt{2}}$.

Практический интерес представляет именно средняя мощность за период колебания. Записанную формулу можно получить и так:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T U_m I_m \cos\omega t \cos(\omega t - \varphi)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{2} I_m U_m \cos\varphi.$$

Коэффициент мощности

Действующее (эффективное) значение тока

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

Среднее квадратичное значение силы тока за период T его изменения:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \cos^2(\omega t - \varphi)\,dt}.$$

Действующее (эффективное) значение напряжения

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

Среднее квадратичное значение напряжения за период T его изменения:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U_m^2 \cos^2(\omega t - \varphi)\,dt}.$$

Амперметры и вольтметры градуируются по действующим значениям тока и напряжения.

[I_m и U_m — амплитудные значения силы тока и напряжения]

Средняя мощность

$$\langle P \rangle = IU\cos\varphi$$

Учли действующие значения тока и напряжения.

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right]^2}}$$

См. векторную диаграмму 4.36.

Мощность, выделяемая в цепи переменного тока, в общем случае зависит не только от силы тока и напряжения, но и от сдвига фаз между ними. Если в цепи реактивное сопротивление отсутствует, то $\cos\varphi = 1$ и $P = IU$. Если цепь содержит только реактивное сопротивление ($R = 0$), то $\cos\varphi = 0$ и средняя мощность равна нулю, какими бы большими ни были ток и напряжение.

4.41 Волновой процесс (волна)

Сплошная среда

Среда, непрерывно распределенная в пространстве и обладающая упругими свойствами.

Волновой процесс (волна)

Процесс распространения колебаний в сплошной среде. При распространении волны *частицы среды колеблются около своих равновесных положений.*

Основное свойство всех волн

Вместе с волной от частицы к частице среды передается состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основное свойство всех волн, независимо от их природы, — перенос энергии без переноса вещества.

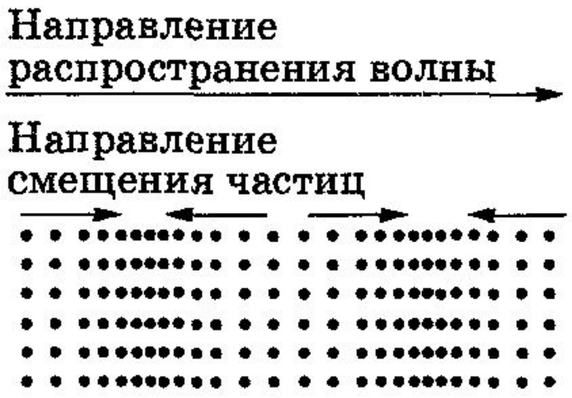
4.42 Основные типы волн

Признак	*Типы волн*	*Пояснение или определение*
По физической природе	Механические	Частные случаи — упругие волны, в том числе звуковые и сейсмические. ***Упругие волны*** — механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде
	Волны на поверхности жидкости	
	Электромагнитные	Частные случаи — радиоволны, свет, рентгеновское излучение и др.
По ориентации возмущений относительно направления распространения волны	Продольные	4.43
	Поперечные	4.43
По характеру распространения	Линейные, или одномерные	Волны, распространяющиеся вдоль прямой линии (например, поперечные волны в натянутой струне или продольные волны в трубе, заполненной газом)
	Поверхностные, или двумерные	Волны, распространяющиеся на границе раздела двух сред (например, волны на воде)
	Пространственные, или трехмерные	Волны, распространяющиеся во всех направлениях (например, волны, возбуждаемые землетрясением в толще Земли)
По форме волновых поверхностей	Плоские	4.44
	Сферические	4.44

4.43 Продольные и поперечные волны

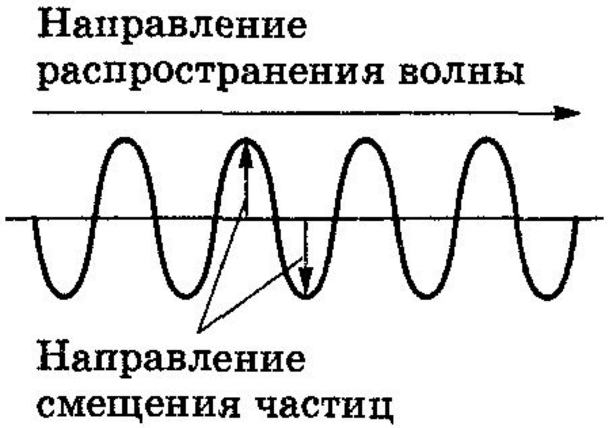
Продольные волны

Волны, в которых частицы среды колеблются в направлении распространения волны. Продольные волны могут распространяться в среде, где возникают упругие силы при *деформациях сжатия и растяжения*, т. е. в твердых телах, жидкостях и газах.



Поперечные волны

Волны, в которых частицы среды колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения волны. Поперечные упругие волны могут распространяться в среде, где возникают упругие силы при *деформации сдвига*, т. е. в твердых телах.



Однородная среда

Среда, физические свойства которой не изменяются от точки к точке среды.

Изотропная среда

Среда, физические свойства которой (например, скорость распространения данной волны) одинаковы во всех направлениях.

Волновой фронт

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t.

◆ Форма фронта волны определяется конфигурацией источника и свойствами среды.

Волновая поверхность

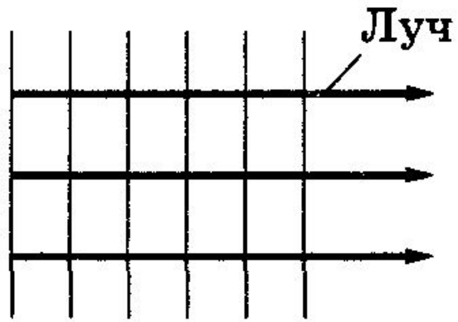
Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

◆ В случае *однородной* и *изотропной среды* волновой фронт является одной из волновых поверхностей.

Луч

Линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны.

В случае *однородной* и *изотропной среды* луч — прямая, перпендикулярная волновой поверхности и совпадающая с направлением переноса энергии волной.



Плоские волны

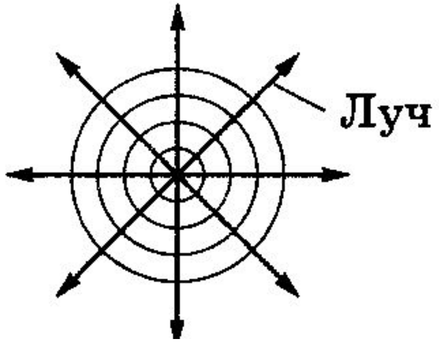
Волны, для которых волновые поверхности — совокупность параллельных плоскостей, перпендикулярных направлению распространения волны.

Лучи в данном случае — параллельные прямые, совпадающие с направлением скорости распространения волны.

Сферические волны

Волны, для которых волновые поверхности — совокупность концентрических сфер.

Лучи в данном случае направлены вдоль радиусов сфер от центра, где расположен источник волны.

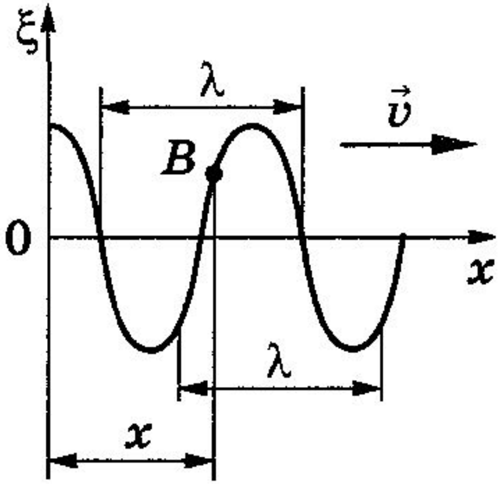


Гармоническая волна

Упругая волна называется *гармонической*, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими.

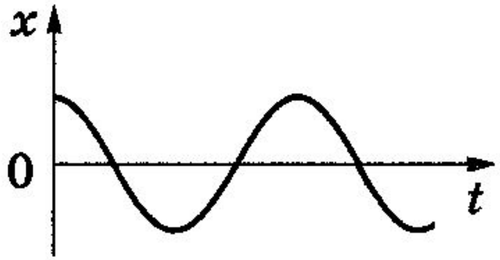
График гармонической поперечной волны, распространяющейся со скоростью v вдоль оси x

Это зависимость между смещением ξ частиц среды, участвующих в волновом процессе, и расстоянием x этих частиц (например, частицы B) от источника колебаний O для какого-то фиксированного момента времени t. Рисунок задает мгновенную картину распределения возмущения вдоль направления распространения, и его *не следует воспринимать* как зримое изображение волны.



Отличие графиков гармонических волн и колебаний

Эти графики *различны по существу*. Если график волны определяет зависимость смещения *всех частиц среды от расстояния* до источника колебаний *в данный момент времени*, то график колебания — зависимость смещения *данной частицы от времени*.



Длииа волны

$$\lambda = \upsilon T$$
$$\upsilon = \lambda \nu$$

Расстояние между двумя ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе. Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется определенная фаза колебания за период.

Волиовое число

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\upsilon T} = \frac{\omega}{\upsilon}$$

[υ — скорость волны; T — период колебаний; ν — частота колебаний; ω — циклическая частота волны]

Бегущие волны

Волны, которые переносят в пространстве энергию.

Поток энергии

$$\Phi = \frac{dW}{dt}$$

Количественная характеристика перенесенной энергии, определяемая энергией, переносимой волнами через некоторую поверхность в единицу времени.

Плотность потока энергии волны

$$U = \frac{d\Phi}{dS} = w \cdot v$$

Определяется потоком энергии, переносимой волной через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

[v — скорость волны; w — объемная плотность энергии колебательного движения]

Вектор Умова

$$\vec{U} = w\vec{v}$$

Вектор плотности потока энергии, количественно характеризует перенос энергии волнами. Направление вектора Умова совпадает с направлением переноса энергии, а его модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Интенсивность волны

$$|\langle\vec{U}\rangle|$$

Модуль среднего значения вектора Умова.

Уравнение плоской волны, распространяющейся вдоль положительного направления оси x

$$\xi(x, t) = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right],$$

$$\xi(x, t) = A\cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$

в комплексной форме

$$\xi(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx + \varphi_0)}$$

[$\xi(x, t)$ — смещение точек среды с координатой x в момент времени t; A — амплитуда волны; ω — циклическая (круговая) частота; v — фазовая скорость; φ_0 — начальная фаза колебаний; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$ — волновое число; T — период колебаний]

Фазовая скорость

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Скорость перемещения фазы волны.

Находится из условия постоянства фазы волны

$$\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0 = \text{const}$$

с последующим дифференцированием этого выражения по t.

Дисперсия волн

$$v = \frac{\omega}{k}$$

Зависимость фазовой скорости волн в среде от их частоты.

Уравнение сферической волны

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r}\cos(\omega t - kr + \varphi_0)$$

В случае сферической волны даже в среде, *не поглощающей* энергию, амплитуда колебаний не остается постоянной, а убывает с расстоянием по закону $1/r$. Записанное уравнение сферической волны справедливо для r (расстояние от центра волны до рассматриваемой точки среды), значительно превышающих размеры источника (источник колебаний тогда можно считать *точечным*).

Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

или

$$\Delta\xi = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее распространение волн в *однородной изотропной среде*. Решение этого уравнения — уравнение любой волны.

[v — фазовая скорость;

$\Delta = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}$ — ***оператор Лапласа***]

Волновое уравнение для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Решение — уравнение плоской волны
$\xi = A\cos(\omega t - kx + \varphi_0)$.

4.48 Принцип суперпозиции (наложения) волн

Линейная среда

Среда, в которой при одновременном распространении нескольких волн ее свойства не изменяются под действием возмущений, создаваемых волной.

Принцип суперпозиции (наложения) волн

При распространении в линейной среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частицы среды в любой момент времени равно *геометрической сумме* смещений, которые получают частицы среды, участвуя в каждом из независимых волновых процессов. Например, если волны распространяются от двух источников, то они, доходя до какой-то точки, вызывают ее колебания независимо друг от друга.

Волновой пакет

Суперпозиция большого числа волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, занимающая в каждый момент времени ограниченную область пространства.

Простейшая группа волн

$$\xi = A_0 \cos(\omega t - kx) + A_0 \cos[(\omega + \mathrm{d}\omega)t - (k + \mathrm{d}k)x] = 2A_0 \cos\left(\frac{t\mathrm{d}\omega - x\mathrm{d}k}{2}\right)\cos(\omega t - kx)$$

Получается при наложении двух плоских волн с одинаковыми амплитудами и близкими частотами ($d\omega \ll \omega$) и волновыми числами ($dk \ll k$).

Эта волна отличается от гармонической тем, что ее амплитуда

$$A = \left|2A_0 \cos\left(\frac{t\mathrm{d}\omega - x\mathrm{d}k}{2}\right)\right|$$

есть медленно изменяющаяся функция координаты x и времени t, т. е. является негармонической.

Скорость распространения группы волн

Скорость перемещения какой-то точки, в которой амплитуда имеет фиксированное значение, в частности максимальное.

Из условия $t\,d\omega - x\,dk = \mathrm{const}$ получим $u = \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk}$ (групповая скорость).

Групповая скорость

$$\boxed{u = \frac{d\omega}{dk}}$$

Скорость движения максимума огибающей группы волн, образующих в каждый момент времени локализованный в пространстве волновой пакет, или скорость движения центра волнового пакета.

4.50 Связь групповой и фазовой скоростей

$$\boxed{u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}}$$

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k\frac{dv}{dk} = v + k\left(\frac{dv}{d\lambda} : \frac{dk}{d\lambda}\right) = v + k\left[\frac{dv}{d\lambda} : \frac{d}{d\lambda}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\right] =$$

$$= v + k\left(-\frac{\lambda^2}{2\pi}\right)\frac{dv}{d\lambda} = v + \frac{2\pi}{\lambda}\left(-\frac{\lambda^2}{2\pi}\right)\frac{dv}{d\lambda} = v - \lambda\frac{dv}{d\lambda}.$$

[u — групповая скорость; v — фазовая скорость; λ — длина волны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. В недиспергирующей среде $\frac{dv}{d\lambda} = 0$ и групповая скорость совпадает с фазовой]

Когерентность

Согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов.

Когерентные волны

Волны, разность фаз которых остается постоянной во времени. Когерентными могут быть лишь волны, имеющие одинаковую частоту.

Интерференция волн

Явление наложения двух (или нескольких) когерентных волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн.

Стоячие волны

Волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн с одинаковыми частотами и амплитудами (а в случае поперечных волн и одинаковой поляризацией), распространяющихся навстречу друг другу.

Складываемые волны

$$\xi_1 = A\cos(\omega t - kx),$$
$$\xi_2 = A\cos(\omega t + kx)$$

Для обеих волн амплитуды и частоты одинаковы; плоские волны распространяются навстречу друг другу вдоль оси x в среде без затухания; начало координат выбрано в точке, в которой обе волны имеют одинаковую начальную фазу; начало отсчета времени — в момент, когда начальные фазы обеих волн равны нулю.

Уравнение стоячей волны

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A\cos kx \cos\omega t = 2A\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\cos\omega t$$

[Учли, что волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda}$]

Амплитуда стоячей волны

$$A_{ст} = \left| 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x \right|$$

В отличие от амплитуды A бегущей волны $A_{ст}$ зависит от координаты x.

Пучности стоячей волны

Точки, в которых амплитуда стоячей волны максимальна ($A_{ст} = 2A$).

Это точки среды, для которых

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm m\pi \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots).$$

Узлы стоячей волны

Точки, в которых амплитуда стоячей волны равна нулю ($A_{ст} = 0$).

Это точки среды, для которых

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right)\pi \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots).$$

Координаты пучностей и узлов

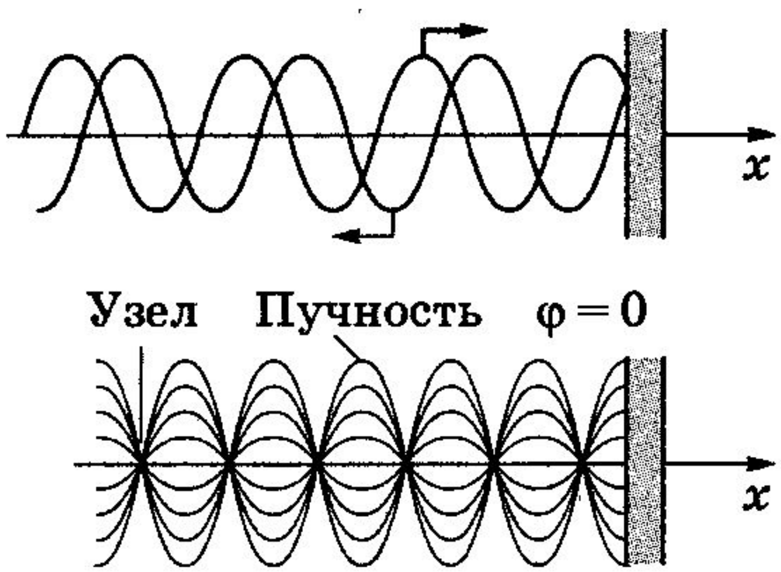
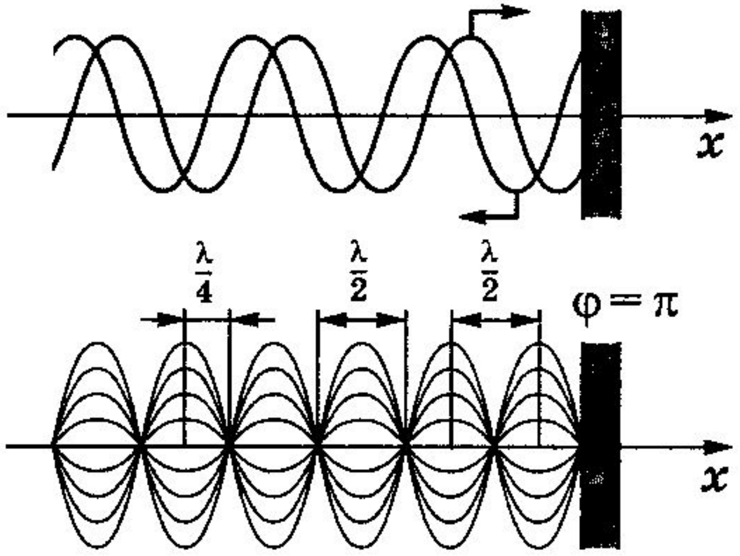
$$x_{п} = \pm m\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots)$$

Расстояния пучность — пучность и узел — узел равны $\lambda/2$.

$$x_{узл} = \pm\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots)$$

Расстояние пучность — узел равно $\lambda/4$.

Пучность или узел на границе отражения?

Отражение от менее плотной среды	*Отражение от более плотной среды*
	

Будет ли на границе отражения узел или пучность, зависит от соотношения плотностей сред. Если среда, от которой происходит отражение, менее плотная, то в месте отражения возникает пучность; если более плотная, — узел. Образование узла связано с тем, что волна, отражаясь от более плотной среды, меняет фазу на противоположную и у границы происходит сложение колебаний с противоположными фазами, в результате чего получается узел. Если же волна отражается от менее плотной среды, то изменения фазы не происходит и у границы колебания складываются с одинаковыми фазами — образуется пучность.

Акустика

Область физики, в которой изучаются звуковые волны.

Звуковые (акустические) волны

Упругие волны с частотами 16—20 000 Гц, распространяющиеся в среде и воспринимаемые органами слуха человека (границы условны, т. е. для разных людей они различны).

Инфразвуковые волны

Звуковые волны с частотами ниже границ диапазона восприятия уха человека, т. е. $\nu < 16$ Гц.

Ультразвуковые волны

Звуковые волны с частотами выше диапазона слуха человека, т. е. $\nu > 20$ кГц.

Звуковые волны — продольные или поперечные?

В жидкостях и газах они могут быть только продольными, так как эти среды обладают упругостью лишь по отношению к деформациям сжатия (растяжения). В твердых телах могут быть как продольными, так и поперечными, так как твердые тела обладают упругостью по отношению к деформациям сжатия (растяжения) и сдвига.

Интеисивность (или сила) звука

Энергетическая характеристика: величина, определяемая средней по времени энергией, переносимой звуковой волной в единицу времени сквозь площадку, ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны.

Зависимости порогов слышимости и болевого ощущения от частоты звука

Чувствительность человеческого уха различна для разных частот. Для каждой частоты колебаний существует наименьшая (*порог слышимости*) и наибольшая (*порог болевого ощущения*) интенсивности звука, которые способны вызвать звуковое восприятие.

Громкость звука

Субъективная характеристика: величина, характеризующая слуховое ощущение для данного звука и зависящая от интенсивности звука, частоты и формы звуковых колебаний.

Уровень интенсивности звука

Объективная оценка громкости звука: $L = \lg \frac{I}{I_0}$.

I_0 — интенсивность звука на пороге слышимости, принимаемая для всех звуков равной 10^{-12} Вт/м^2. Величина L выражается ***в белах*** (Б), а чаще — в единицах, в десять раз меньших, — ***децибелах*** (дБ).

Уровень громкости

Физиологическая характеристика: выражается в ***фонах*** (фон). Громкость для звука 1000 Гц (частота стандартного чистого тона (синусоидального гармонического колебания) равна 1 фон, если его уровень интенсивности равен 1 дБ).

Высота звука

Субъективная характеристика: качество периодического или почти периодического звука, определяемое человеком на слух и зависящее от частоты звука. С ростом частоты высота звука увеличивается (звук становится «выше»), с уменьшением частоты — понижается.