

Электромагнитные колебания и волны

Свободные электромагнитные колебания.

Колебательный контур

Электромагнитные колебания — это периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, происходящие в электрической цепи. Простейшей системой для наблюдения электромагнитных колебаний служит колебательный контур.

Колебательный контур — это замкнутый контур, образованный последовательно соединенными конденсатором и катушкой.

Сопротивление катушки R равно нулю.

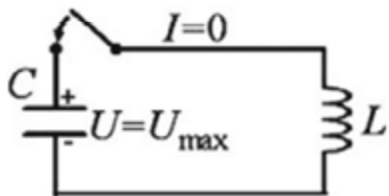
Если зарядить конденсатор до напряжения U_m , то в начальный момент времени $t_1=0$, напряжение на конденсаторе будет равно U_m . Заряд конденсатора в этот момент времени будет равен $q_m=C U_m$. Сила тока равна нулю.



Полная энергия системы будет равна энергии электрического поля:

$$W = W_e = \frac{C U_m^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}.$$

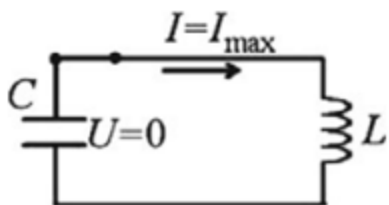
Конденсатор начинает разряжаться, по катушке начинает течь ток. Вследствие самоиндукции в катушке конденсатор разряжается постепенно.



Ток достигает своего максимального значения I_m в момент времени $t_2=T/4$. Заряд конденсатора в этот момент равен нулю, напряжение на конденсаторе равно нулю.

Полная энергия системы в этот момент времени равна энергии магнитного поля:

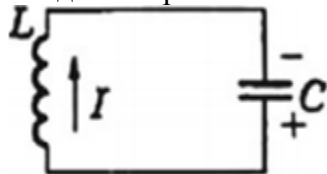
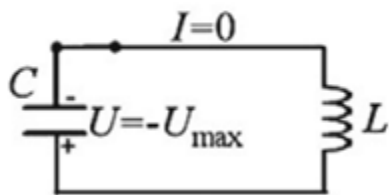
$$W = W_m = \frac{L I_m^2}{2}.$$



В следующий момент времени ток течет в том же направлении, постепенно (вследствие явления самоиндукции) уменьшаясь до нуля. Конденсатор перезаряжается. Заряды обкладок имеют заряды, по знаку противоположные первоначальным.

В момент времени $t_3=T/2$ заряд конденсатора равен q_m , напряжение равно U_m , сила тока равна нулю.

Полная энергия системы равна энергии электрического поля конденсатора.



Затем конденсатор снова разряжается, но ток через катушку течет в обратном направлении.

В момент времени $t_4=3T/4$ сила тока в катушке достигает максимального значения, напряжение на конденсаторе и его заряд равны нулю. С этого момента ток в катушке начинает убывать, но не сразу (явление самоиндукции). Энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля. Конденсатор начинает заряжаться, и через некоторое время его заряд равен первоначальному, а сила тока станет равной нулю.

Через время, равное периоду T , система возвращается в начальное состояние. Совершилось одно полное колебание, дальше процесс повторяется.

Важно!

Колебания, происходящие в колебательном контуре, – свободные. Они совершаются без какого-либо внешнего воздействия — только за счет энергии, запасенной в контуре.

В контуре происходят превращения энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и обратно. В любой произвольный момент времени полная энергия в контуре равна:

$$W = W_c + W_m = \frac{Cu^2}{2} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

где i, u, q – мгновенные значения силы тока, напряжения, заряда в любой момент времени.

Эти колебания являются затухающими. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается из-за электрического сопротивления проводников.

Вынужденные электромагнитные колебания. Резонанс

Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в колебательном контуре, происходящие под действием периодически изменяющейся синусоидальной (переменной) ЭДС от внешнего источника:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

где \mathcal{E} – мгновенное значение ЭДС, \mathcal{E}_m – амплитудное значение ЭДС.

При этом к контуру подводится энергия, необходимая для компенсации потерь энергии в контуре из-за наличия сопротивления.

Резонанс в электрической цепи – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока в колебательном контуре с малым активным сопротивлением при совпадении частоты вынужденных колебаний внешней ЭДС с частотой собственных колебаний в контуре.

Емкостное и индуктивное сопротивления по-разному изменяются в зависимости от частоты. С увеличением частоты растет индуктивное сопротивление, а емкостное уменьшается. С уменьшением частоты растет емкостное сопротивление и уменьшается индуктивное сопротивление. Кроме того, колебания напряжения на конденсаторе и катушке имеют разный сдвиг фаз по отношению к колебаниям силы тока: для катушки колебания напряжения и силы тока имеют сдвиг фаз $\phi_L = -\pi/2$, а на конденсаторе $\phi_C = \pi/2$. Это означает, что когда растет энергия магнитного поля катушки, то энергия электрического поля конденсатора убывает, и наоборот. При резонансной частоте индуктивное и емкостное сопротивления компенсируют друг друга и цепь обладает только активным сопротивлением. При резонансе выполняется условие:

$$X_L = X_C.$$

Резонансная частота вычисляется по формуле:

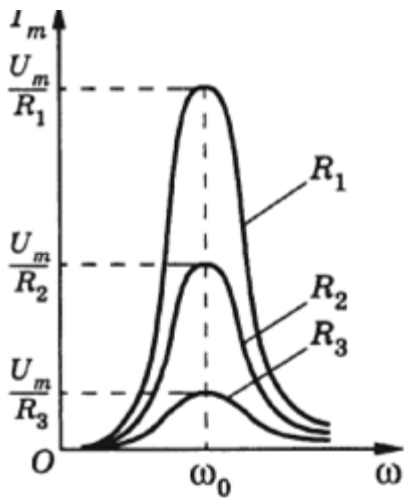
$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Важно!

Резонансная частота не зависит от активного сопротивления R . Но чем меньше активное сопротивление цепи, тем ярче выражен резонанс.

Чем меньше потери энергии в цепи, тем сильнее выражен резонанс. Если активное сопротивление очень мало ($R \rightarrow 0$), то резонансное значение силы тока неограниченно возрастает. С увеличением сопротивления максимальное значение силы тока уменьшается, и при больших значениях сопротивления резонанс не наблюдается.

График зависимости амплитуды силы тока от частоты называется резонансной кривой. Резонансная кривая имеет больший максимум в цепи с меньшим активным сопротивлением.



Одновременно с ростом силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке. Эти напряжения становятся одинаковыми и во много раз больше внешнего напряжения. Колебания напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе всегда происходят в противофазе. При резонансе амплитуды этих напряжений одинаковы и они компенсируют друг друга. Падение напряжения происходит только на активном сопротивлении.

При резонансе возникают наилучшие условия для поступления энергии от источника напряжения в цепь: при резонансе колебания напряжения в цепи совпадают по фазе с колебаниями силы тока. Установление колебаний происходит постепенно. Чем меньше сопротивление, тем больше времени требуется для достижения максимального значения силы тока за счет энергии, поступающей

от источника.

Явление резонанса используется в радиосвязи. Каждая передающая станция работает на определенной частоте. С приемной антенной индуктивно связан колебательный контур. При приеме сигнала в катушке возникают переменные ЭДС. С помощью конденсатора переменной емкости добиваются совпадения частоты контура с частотой принимаемых колебаний. Из колебаний всевозможных частот, возбужденных в антенне, контур выделяет колебания, равные его собственной частоте.

Резонанс может привести к перегреву проводов и аварии, если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса.

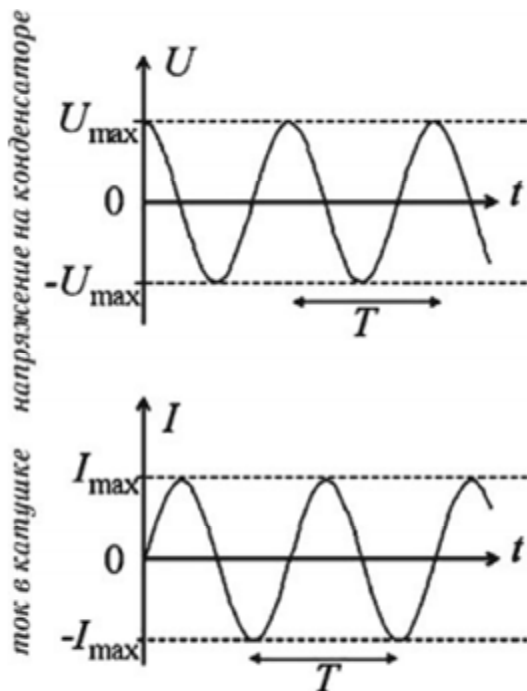
Гармонические электромагнитные колебания

Гармоническими электромагнитными колебаниями называются периодические изменения заряда, силы тока и напряжения, происходящие по гармоническому – синусоидальному или косинусоидальному – закону.

В электрических цепях это могут быть колебания:

- силы тока – $i = I_m \cos(\omega t + \varphi + \pi/2)$;
- напряжения – $u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$;
- заряда – $q = q_m \cos(\omega t + \varphi)$;
- ЭДС – $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$.

В этих уравнениях ω – циклическая частота, φ – начальная фаза колебаний, амплитудные значения: силы тока – I_m , напряжения – U_m и заряда – q_m .



Важно!

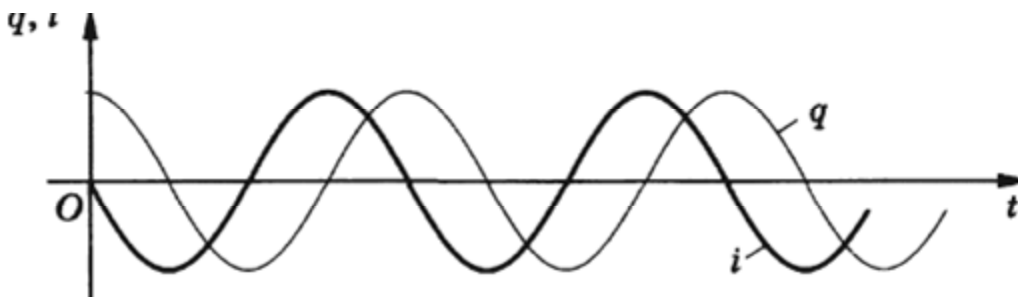
Если в начальный момент времени заряд имеет максимальное значение, а сила тока равна нулю, то колебания заряда совершаются по закону косинуса с начальной фазой, равной нулю. Если в начальный момент времени заряд равен нулю, а сила тока максимальна, то колебания заряда совершаются по закону синуса.

Сила тока равна первой производной заряда от времени:

$$i = q'(t).$$

Амплитуда колебаний силы тока равна:

$$I_m = \omega \cdot q_m.$$



Колебания заряда и напряжения в колебательном контуре происходят в одинаковых фазах. Амплитуда напряжения равна:

$$U_m = \frac{q_m}{C}.$$

Колебания силы тока смещены по фазе относительно колебаний заряда на $\pi/2$.

Период свободных электромагнитных колебаний

Период свободных электромагнитных колебаний находится по **формуле Томсона**:

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

где L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора.

Циклическая частота: $\omega = 2\pi T = 1/LC\sqrt{\quad}$

Важно!

Период и циклическая частота не зависят от начальных условий, а определяются только индуктивностью катушки и емкостью конденсатора. Амплитуда колебаний заряда и силы тока определяются начальным запасом энергии в контуре.

При свободных гармонических колебаниях происходит периодическое преобразование энергии. Период колебаний энергии в два раза меньше, чем период колебаний заряда, силы тока и напряжения. Частота колебаний энергии в два раза больше частоты колебаний заряда, силы тока и напряжения.

Электромагнитное поле

Электромагнитное поле – это особый вид материи, с помощью которого осуществляется электромагнитное взаимодействие заряженных тел или частиц.

Это понятие было введено Д. Максвеллом, развившим идеи Фарадея о том, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты. Вихревое электрическое поле порождает появление вихревого магнитного поля и так далее. Эти переменные электрическое и магнитное поля, существующие одновременно, и образуют единое электромагнитное поле.

Характеристиками этого поля являются вектор напряженности и вектор магнитной индукции.

Если электрический заряд покоится, то вокруг него существует только электрическое поле.

Если напряженность электрического поля равна нулю, а магнитная индукция отлична от нуля, то обнаруживается только магнитное поле.

Если электрический заряд движется с постоянной скоростью, то вокруг него существует электромагнитное поле.

Максвелл предположил, что при ускоренном движении зарядов в пространстве будет возникать возмущение, которое будет распространяться в вакууме с конечной скоростью. Когда это возмущение достигнет второго заряда, то изменится сила, с которой электромагнитное поле действует на этот заряд.

При ускоренном движении заряда происходит излучение электромагнитной волны. Электромагнитное поле материально. Оно распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны.

Свойства электромагнитных волн

Электромагнитная волна – это изменяющееся во времени и распространяющееся в пространстве электромагнитное поле.

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Электромагнитные волны были открыты Г. Герцем.

Источник электромагнитной волны – ускоренно движущаяся заряженная частица – колеблющийся заряд.

Важно!

Наличие ускорения – главное условие излучения электромагнитной волны. Интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Источниками электромагнитных волн служат антенны различных конструкций, в которых возбуждаются высокочастотные колебания.

Электромагнитная волна называется **монохроматической**, если векторы \vec{E} и \vec{B} совершают гармонические колебания с одинаковой частотой (частотой волны).

Длина электромагнитной волны: $\lambda = cT = c/\nu$,

где c – скорость электромагнитной волны, T – период, ν – частота электромагнитной волны.

Свойства электромагнитных волн

- В вакууме электромагнитная волна распространяется с конечной скоростью, равной скорости света $3 \cdot 10^8$ м/с.
- Электромагнитная волна поперечная. Колебания векторов напряженности переменного электрического поля и магнитной индукции переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору скорости волны.
- Электромагнитная волна переносит энергию в направлении распространения волны.

Важно!

Электромагнитная волна в отличие от механической волны может распространяться в вакууме.

Плотность потока или интенсивность – это электромагнитная энергия, переносимая через поверхность единичной площади за единицу времени.

Обозначение – I , единица измерения в СИ – ватт на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Важно!

Плотность потока излучения электромагнитной волны от точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника и пропорциональна четвертой степени частоты.

Электромагнитная волна обладает общими для любых волн свойствами, это:

- отражение,
- преломление,
- интерференция,
- дифракция,
- поляризация.

Электромагнитная волна производит давление на вещество. Это означает, что у электромагнитной волны есть импульс.

Различные виды электромагнитных излучений и их применение

Электромагнитные излучения имеют длины волн от 10^{-12} до 10^4 м или частоты от $3 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^{20}$.

Различают следующие *виды электромагнитных излучений*:

- радиоволны;
- инфракрасное излучение;
- видимое излучение (свет);
- ультрафиолетовое излучение;
- рентгеновское излучение;
- гамма-излучение.

Границы между диапазонами условны, но излучения имеют качественные различия в свойствах. При переходе от излучений с малой частотой к излучениям с большей частотой волновые свойства проявляются слабее, а корпускулярные (квантовые) – сильнее.

Радиоволны

$\lambda = 10^3 - 10^3$ м, $\nu = 10^5 - 10^{11}$ Гц. Источники радиоволн – колебательный контур, вибратор.

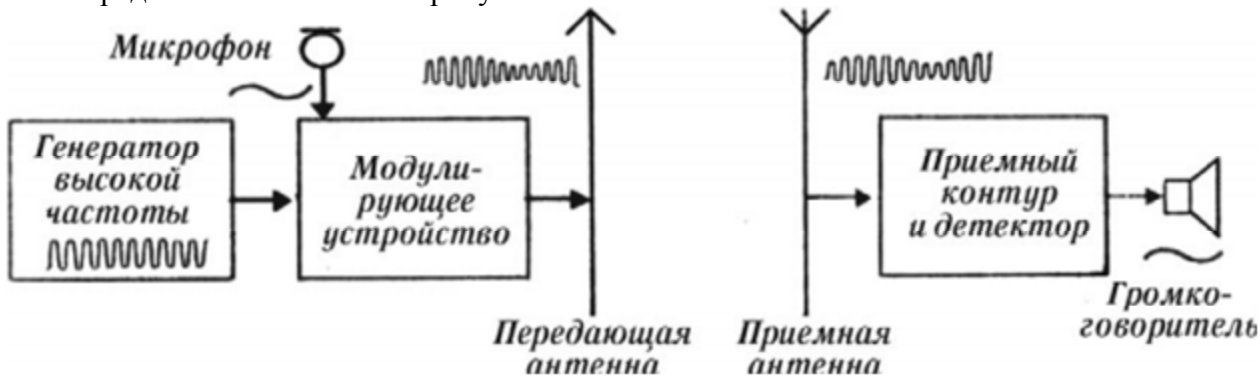
Радиоволны делятся на:

- длинные (длина больше 1 км);
- средние (от 100 м до 1 км);
- короткие (от 10 до 100 м);
- ультракороткие (меньше 10 м).

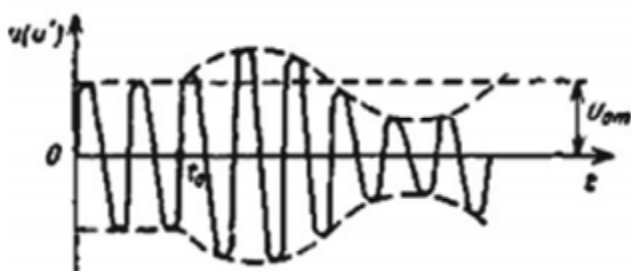
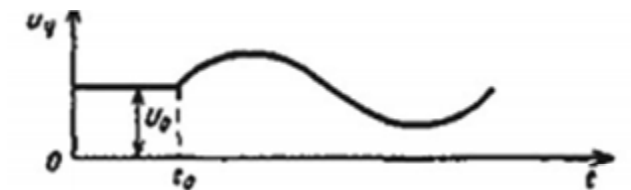
Свойства: отражение, поглощение, интерференция, дифракция. *Применение:* радиосвязь, телевидение, радиолокация.

Радиосвязью называется передача информации с помощью радиоволн. Радиосвязь осуществляется с помощью модулированных радиоволн. Модуляцией радиоволны называется изменение ее параметров (амплитуды, частоты, начальной фазы) с частотой, меньшей частоты передаваемой волны.

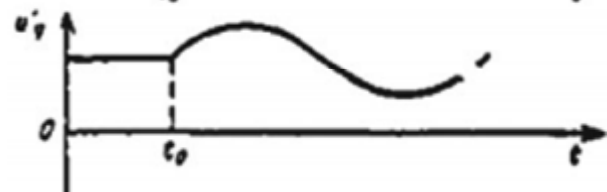
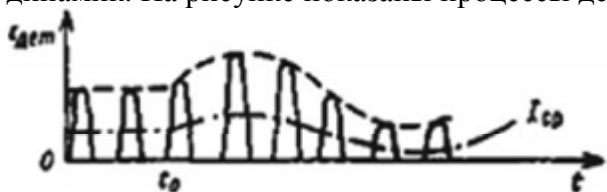
Схема радиосвязи показана на рисунке:



Передача радиоволн. Генератор высокой частоты вырабатывает высокочастотные колебания несущей частоты. Звуковые колебания поступают в микрофон, где преобразуются в электромагнитные колебания. В модуляторе эти колебания преобразуются в модулированные колебания. После усиления модулированные колебания поступают в передающую антенну, которая излучает электромагнитные волны. На рисунке показан звуковой сигнал низкой частоты и модулированный высокочастотный сигнал.



в динамик. На рисунке показаны процессы детектирования (демодуляции) и сглаживания.



Прием радиоволн. Электромагнитные колебания поступают в приемную антенну и вызывают электромагнитные колебания в приемном контуре. Эти колебания поступают в усилитель, а затем в детектор. В качестве детектора используют устройство с односторонней проводимостью. Это может быть полупроводниковый диод. В детекторе сигнал демодулируют (детектируют). Процесс детектирования заключается в выделении из высокочастотных модулированных колебаний колебаний низкой (звуковой) частоты. После сглаживания и усиления сигнал поступает в динамик.

Радиолокацией называют обнаружение и определение местоположения объектов с помощью радиоволн. Излучение осуществляется короткими импульсами. В интервале времени между излучением двух последовательных импульсов осуществляется прием отраженного от объекта сигнала. Для радиолокации используют ультракороткие радиоволны.

Инфракрасное (тепловое) излучение
 $\lambda = 10^{-3} - 10^{-7}$ м, $\nu = 10^{11} - 10^{14}$ Гц. Источники –

атомы и молекулы вещества.

Это излучение испускают все тела при температуре, отличной от 0 К. *Свойства*: нагревает вещество при поглощении; интерференция; дифракция; проходит через дождь, снег, дымку; невидимо; преломление, отражение. *Применение*: в приборах ночного видения, в физиотерапии, промышленности (для сушки). Регистрируют с помощью термомпары, болометра, фотографическим методом.

Видимое излучение

$$\lambda = 8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu = 4 \cdot 10^{11} - 8 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Это излучение воспринимается глазом. *Свойства*: отражение, преломление, поглощение, интерференция, дифракция.

Ультрафиолетовое излучение

$$\lambda = 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \nu = 8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$
 Источники – кварцевые лампы.

Ультрафиолетовое излучение дают светящиеся пары ртути и твердые тела, у которых температура выше 1000°C. *Свойства*: химическое действие; большая проникающая способность; биологическое действие; невидимо. *Применение*: в медицине, промышленности. Регистрируют фотографическими методами.

Рентгеновское излучение

$$\lambda = 10^{-8} - 10^{-11} \text{ м}, \nu = 3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19} \text{ Гц.}$$
 Источник – рентгеновские трубки.

Возникает при торможении быстрых электронов. *Свойства*: высокая химическая активность; биологическое действие; интерференция; дифракция на кристаллической решетке; высокая проникающая способность. *Применение*: в медицине, промышленности, науке.

Гамма-излучение

Длина волны меньше 10^{-11} м, частота от 10^{20} Гц и выше. Источник – ядерные реакции.

Свойства: высокая проникающая способность, сильное биологическое действие. *Применение*: в медицине, промышленности (дефектоскопия), науке.

Шкала электромагнитных излучений позволяет сделать вывод: все электромагнитные излучения обладают одновременно волновыми и квантовыми свойствами, которые дополняют друг друга.

Важно!

Волновые свойства сильнее выражены при малых частотах и больших длинах волн, а квантовые – при больших частотах и малых длинах волн.

Основные формулы раздела «Электромагнитные колебания и волны»

$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	– резонансная частота
$q = q_m \sin \omega t$	– уравнение колебания заряда
$I = I_m \sin \omega t$	– уравнение колебания силы тока
$u = U_m \cos \omega t$	– уравнение колебания напряжения
$T = 2\pi\sqrt{LC}$	– период электромагнитных колебаний (формула Томсона)
$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	– циклическая частота
$p = i^2 \cdot R$	– мгновенная мощность
$\bar{p} = \frac{I_m^2 R}{2}$	– среднее значение мощности за период
$I_{д} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	– действующее значение силы тока
$U_{д} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$	– действующее значение напряжения
$X_L = \omega L$	– индуктивное сопротивление
$X_C = \frac{1}{\omega C}$	– емкостное сопротивление
$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{Z}$	– закон Ома для цепи переменного тока
$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$	– полное сопротивление цепи переменного тока
$\mathcal{E}_m = NBS\omega$	– амплитуда ЭДС генератора переменного тока
$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$	– длина электромагнитной волны
$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	– коэффициент трансформации
$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} 100\% = \frac{U_2 I_2}{U_2 I_2 + I_2^2 r} 100\% = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{потерь}} 100\%$	–
КПД трансформатора	