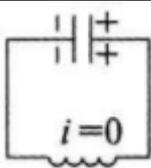
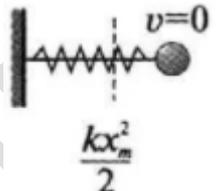
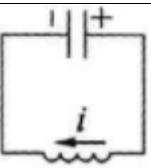
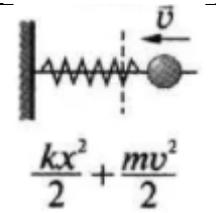
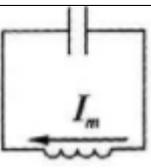
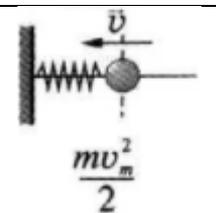
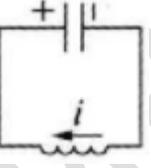
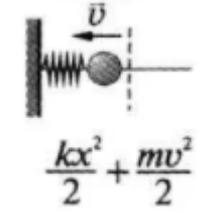
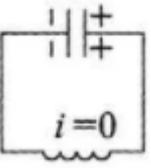
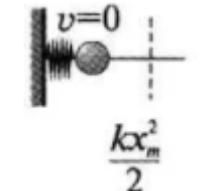


**Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур**

**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** - замкнутый контур, образованный последовательно соединенными конденсатором и катушкой.

Время	КК	Процессы, происходящие в контуре	Эл. заряд, сила тока, напряжение, энергия	Аналогия с механическими колебаниями
$t = 0$		В начальный момент времени конденсатор заряжен, ток через катушку не идет. Заряд и напряжение на конденсаторе максимальны. Энергия контура сосредоточена в конденсаторе.	$q = q_m$ $u = U_m$ $i = 0$ $W = \frac{q_m^2}{2C}$	
$0 < t < \frac{T}{4}$		Конденсатор начнет разряжаться, в цепи появляется эл. ток. Сила тока увеличивается постепенно, достигая максимального значения, ЭДС самоиндукции, возникающая при появлении тока в цепи, препятствует его увеличению, поэтому ток в цепи растет постепенно. Энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока	$q < q_m$ $u < U_m$ $i > 0$ $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}$	
$t = \frac{T}{4}$		Конденсатор полностью разрядился, энергия электрического поля равна нулю. Энергия будет максимальной. В этот момент сила тока также достигает максимального значения	$q = 0$ $u = 0$ $i = I_m$ $W = +\frac{LI_m^2}{2}$	
$\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$		Благодаря явлению самоиндукции электрический ток не прекратится сразу. При уменьшении силы тока и созданного им магнитного поля, возникает ЭДС самоиндукции, стремящаяся поддержать ток. В результате конденсатор будет перезаряжаться, сила тока, постепенно уменьшаться. Энергия магнитного поля уменьшается, энергия эл. поля увеличивается	$q < q_m$ $u < U_m$ $i < I_m$ $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}$	
$t = \frac{T}{2}$		Конденсатор полностью заряжен, тока в цепи нет. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной. Знак заряда обкладок конденсатора меняется на противоположный.	$q = q_m$ $u = U_m$ $i = 0$ $W = \frac{q_m^2}{2C}$	

Далее конденсатор вновь начнет перезаряжаться, и система возвратится в исходное состояние.

Электромагнитные колебания, происходящие в таком контуре – свободные, они будут затухать с течением времени, поскольку при прохождении тока по проводниками часть энергии будет выделяться при нагревании проводников. Чаще всего для описания колебаний используют понятие **идеального колебательного контура** – колебательный контур, в котором отсутствует электрическое сопротивление.

Колебания, происходящие в идеальном колебательном контуре – гармонические (происходят по закону синуса или косинуса).

**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.

Рассмотрим колебания, происходящие по закону косинуса (для колебаний, происходящих по закону синуса, все уравнения пишутся аналогично):

### 1. Уравнение колебаний заряда

$$q = q_m \cos \omega t,$$

где  $q_m$  – амплитудное (максимальное) значение заряда,  $\omega$  – циклическая (круговая) частота колебаний

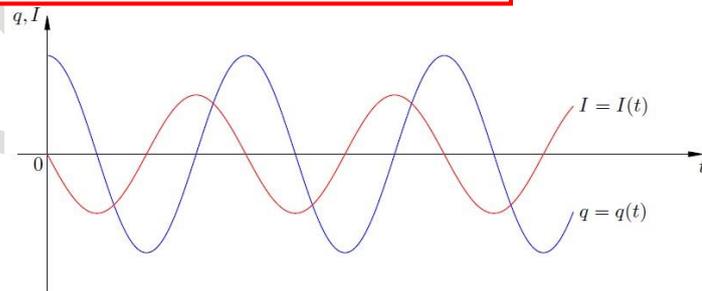
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

**Важно!** Период электромагнитных колебаний вычисляется по формуле Томсона  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ .

### 2. Уравнение колебаний силы тока

$$\begin{aligned} i = q_t' &= (q_m \cos \omega t)' = -q_m \omega \sin \omega t = \\ &= q_m \omega \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

Из последнего уравнения видно, что колебания силы тока опережают по фазе на  $\frac{\pi}{2}$  колебания заряда.



**Важно!** Амплитудное (максимальное) значение силы тока  $I_m = q_m \omega$ .

### 3. Уравнение колебаний напряжения

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

**Важно!** Амплитудное (максимальное) значение напряжения и максимальный заряд связаны соотношением  $q_m = CU_m$

**4. Энергия гармонических колебаний:** при гармонических колебаниях энергия колебательного контура не меняется, происходит превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно

$$W = const \Rightarrow \frac{q_m^2}{2C} = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{q_m U_m}{2} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}.$$

### 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

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t.$$

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.

При резонансной частоте индуктивное и емкостное сопротивления компенсируют друг друга и цепь обладает только активным сопротивлением. При резонансе выполняется условие

$$X_L = X_C.$$

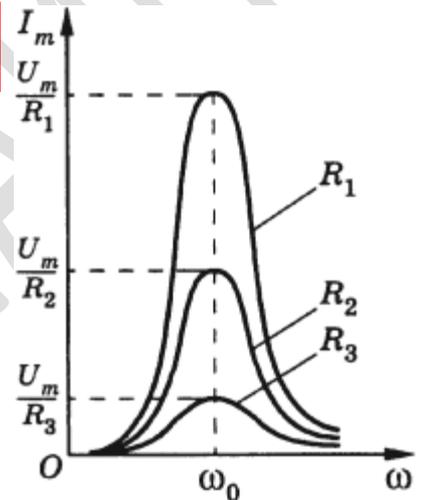
Резонансная частота вычисляется по формуле

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

**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.

### Переменный ток. Производство, передача и потребление электрической энергии

**Переменным** называется ток, изменяющийся по величине и направлению по гармоническому закону.

Переменный ток получают с помощью генератора переменного тока. *Генератор переменного тока* (электромеханический генератор переменного тока) – это устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую. В основе работы генератора переменного тока лежит явление электромагнитной индукции. Переменный ток представляет пример вынужденных электромагнитных колебаний.

Процесс получения переменного тока можно рассмотреть на примере вращения витка провода в однородном магнитном поле постоянной частотой  $\nu$ . Угол изменяется по закону  $\alpha = \omega t = 2\pi\nu t$ . ЭДС индукции может быть найдена как производная от магнитного потока по времени

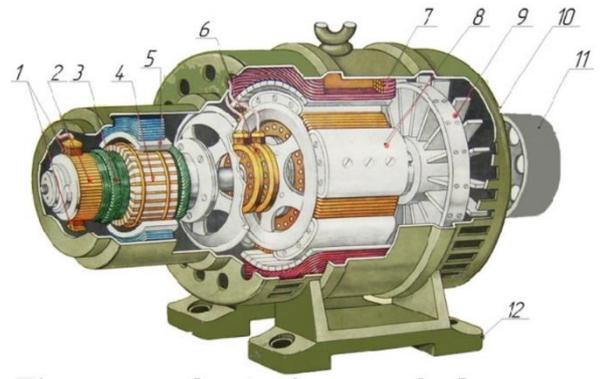
$$\varepsilon = -\dot{\Phi}_t = (-BS \cos \alpha)_t = (-BS \cos \omega t)_t = BS \sin \omega t \cdot (\omega t)_t = BS\omega \sin \omega t$$

Амплитудное (максимальное) значение ЭДС в контуре  $\varepsilon_m = BS\omega$ .

Если рамка содержит  $N$  витков, то  $\varepsilon = NBS\omega \sin \omega t$ .

Основные части генератора переменного тока:

1. обмотка статора с большим числом витков, в ней индуцируется ЭДС. Статор состоит из отдельных пластин из электротехнической стали для уменьшения нагрева от вихревых токов;
2. ротор (вращающаяся часть генератора) создает магнитное поле. Для получения нужной частоты переменного тока может иметь несколько пар полюсов. Например, на гидроэлектростанциях в генераторе число пар полюсов равно 40–50;
3. клеммы для снятия напряжения.



1 – щетки и щеткодержатели, 2 – коллектор, 3 – обмотка якоря, 4 – якорь, 5 – статор, 6 – контактные кольца, 7 – обмотка статора, 8 – ротор генератора, 9 – вентилятор, 10 – корпус генератора, 11 – привод, 12 – станция

Промышленные генераторы вырабатывают напряжение порядка  $10^4$  В. Промышленная частота переменного тока в нашей стране 50 Гц.

Цепь переменного тока представляет собой колебательный контур, к которому приложена внешняя синусоидальная ЭДС. В цепь переменного тока могут включаться различные нагрузки: резистор, катушка, конденсатор.

### Активное сопротивление

Проводник, преобразующий всю энергию электрического тока во внутреннюю, называется *активным сопротивлением*  $R$  (эту величину мы раньше называли просто сопротивлением). Активное сопротивление зависит от материала проводника, его длины и площади поперечного сечения и не зависит от частоты переменного тока.

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

$$u = U_m \cos \omega t, \quad i = I_m \cos \omega t.$$

Мгновенное значение мощности:  $P = i^2 R$ .

Среднее значение мощности за период:  $\bar{P} = \frac{I_m^2 R}{2}$ .

**Действующим значением силы переменного тока  $I$**  называют значение силы постоянного тока, который в том же проводнике выделяет то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.

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

**Действующим значением напряжения переменного тока** называют значение напряжения постоянного тока, который в том же проводнике выделяет то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.

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

Для цепи с активным сопротивлением выполняется закон Ома для мгновенных, амплитудных и действующих значений.

### Индуктивное сопротивление

Катушка в цепи переменного тока имеет большее сопротивление, чем в цепи постоянного тока. В такой цепи колебания напряжения опережают колебания силы тока по фазе на  $\pi/2$ . Колебания силы тока и напряжения происходят по закону

$$u = U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad i = I_m \sin \omega t.$$

**Индуктивным сопротивлением  $X_L$**  называют физическую величину, равную произведению циклической частоты на индуктивность катушки

$$X_L = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте. Физический смысл индуктивного сопротивления: ЭДС самоиндукции препятствует изменению в ней силы тока. Это приводит к существованию индуктивного сопротивления, уменьшающего силу тока. Для цепи с индуктивным сопротивлением выполняется закон Ома

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

### Емкостное сопротивление

В цепи постоянного тока через конденсатор ток не идет. Для переменного тока конденсатор обладает конечным сопротивлением, обратно пропорциональным его емкости. В цепи переменного тока сопротивление конденсатора меньше, чем в цепи постоянного тока.

В такой цепи колебания напряжения отстают от колебаний силы тока по фазе на  $\pi/2$ . Колебания силы тока и напряжения происходят по закону

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

**Емкостным сопротивлением  $X_C$**  называют величину, обратную произведению циклической частоты на емкость конденсатора. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте

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

Физический смысл емкостного сопротивления: изменению переменного тока в любой момент времени противодействует электрическое поле между обкладками конденсатора. Для цепи с емкостным сопротивлением выполняется закон Ома

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

### Полное сопротивление. Закон Ома для цепи переменного тока

В цепи переменного тока колебания силы тока и ЭДС происходят по синусоидальному закону с одинаковой циклической частотой  $\omega$  и разностью фаз  $\varphi$ :

$$i = I_m \sin \omega t, \quad \varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Соотношения амплитудных значений силы тока  $I_m$  и ЭДС  $\varepsilon_m$  в цепи переменного тока связаны между собой **законом Ома для цепи переменного тока**: амплитуда силы переменного тока прямо пропорциональна амплитуде ЭДС и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z},$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи. Полное сопротивление цепи определяется по формуле

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

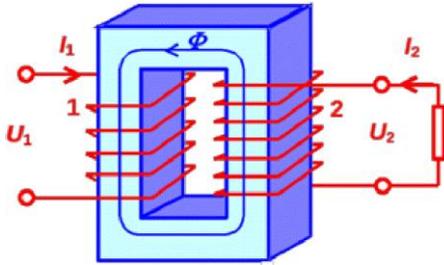
Электроэнергия производится в основном вдалеке от основных потребителей энергии, там, где есть топливные ресурсы. С электростанции переменный ток по проводам линии электропередач (ЛЭП) поступает к различным потребителям электрической энергии. Для уменьшения потерь при передаче переменного тока необходимо использовать высокое напряжение. Чем длиннее линия, тем выше должно быть напряжение. В высоковольтных ЛЭП оно может достигать 500 кВ. Генераторы на электростанциях вырабатывают напряжение 16–20 кВ. Потребителям не нужно высокое напряжение. Возникает необходимость преобразования напряжения. С электростанции электрический ток поступает на повышающую подстанцию, затем передается по линии электропередач на понижающую подстанцию, где

напряжение понижается до 6–10 кВ, а затем до 220–380 В. Для преобразования напряжения используют трансформатор.

**Трансформатор** – устройство, предназначенное для преобразования переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз.



Основные части трансформатора: замкнутый сердечник из электротехнической стали и две катушки-обмотки. Катушка, подключаемая к источнику переменного напряжения, называется **первичной** обмоткой; катушка, к которой подключается нагрузка, – **вторичной** обмоткой. Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции.



Протекающий по первичной обмотке переменный ток (от источника) создает переменный магнитный поток, пронизывающий стальной сердечник. Изменяющийся в сердечнике магнитный поток создает ЭДС индукции во второй катушке. Эта ЭДС индукции создает во вторичной обмотке переменный ток.

В режиме холостого хода (без нагрузки) напряжение на первичной ( $U_1$ ) и вторичной ( $U_2$ ) обмотках отличаются во столько же раз, во сколько раз отличаются количества витков в этих катушках. Коэффициент  $k$  называется – **коэффициент трансформации**. Если  $k > 1$ , то трансформатор понижающий (уменьшает подаваемое напряжение), если  $k < 1$ , то трансформатор повышающий (увеличивает подаваемое напряжение).

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

При подключении ко вторичной обмотке нагрузки сопротивлением  $R$  сила тока во вторичной обмотке уже не равна нулю. При этом мощность тока в обмотках практически одинакова

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 R}$$

$$P_1 \approx P_2 \Rightarrow U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

**Важно!** Увеличивая напряжение с повышающего трансформатора в  $k$  раз мы уменьшаем силу тока во вторичной катушке во столько же раз и наоборот.

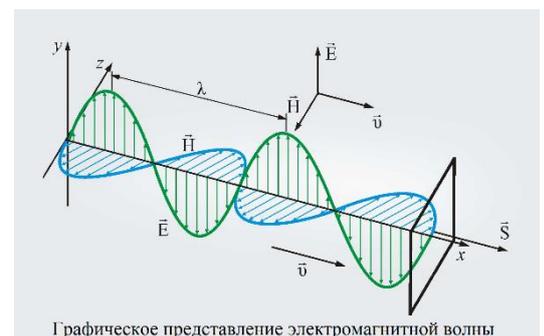
**Коэффициент полезного действия** трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100\%.$$

### Электромагнитное поле

**Электромагнитное поле** – это особый вид материи, с помощью которого осуществляется электромагнитное взаимодействие заряженных тел или частиц. Понятие электромагнитного поля было введено Д. Максвеллом. Согласно Максвеллу: 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.

Электромагнитное поле материально. Оно распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны. **Электромагнитная волна** – это изменяющееся во времени и распространяющееся в пространстве электромагнитное поле. *Источником электромагнитных волн* являются ускоренно движущиеся заряженные частицы – колеблющиеся заряды.



Графическое представление электромагнитной волны

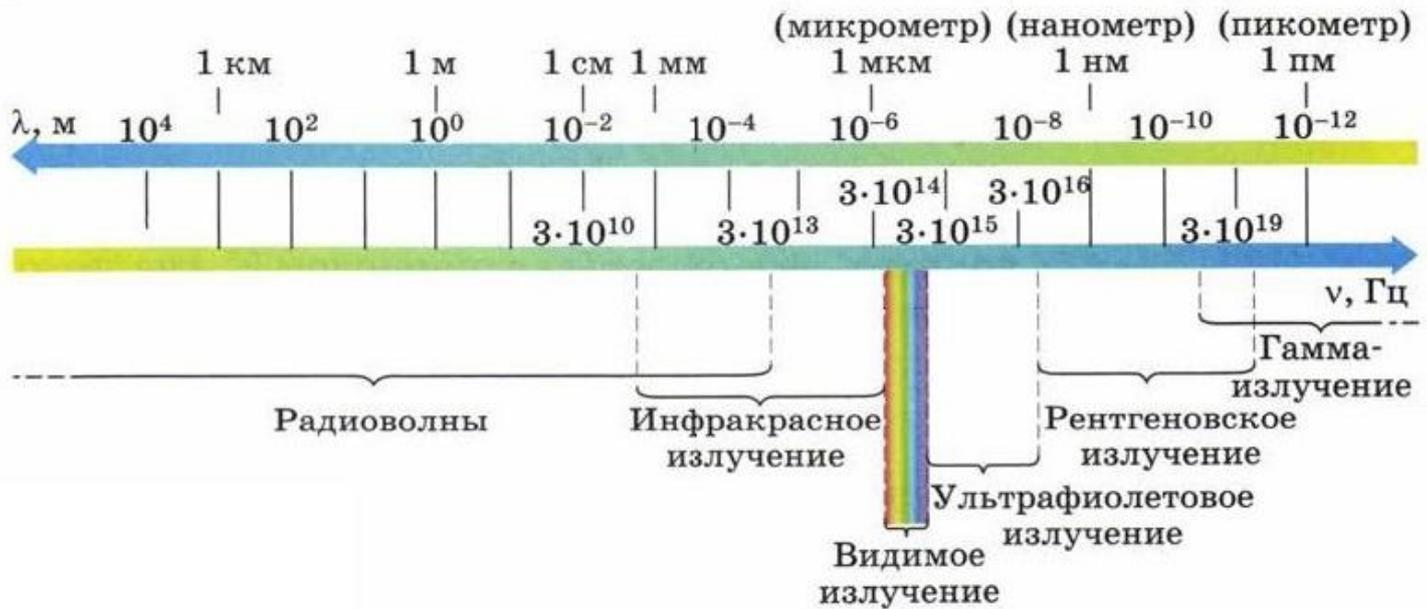
Длина электромагнитной волны:  $\lambda = cT = c\nu$ .

Вид волн	Диапазон длин волн (частот)	Источник	Регистрация	Особенности	Применение
Низкочастотные колебания	от $1,5 \cdot 10^4$ м менее 20 КГц	Генераторы переменного тока	Детектор электромагнитного излучения	Практически не излучаются в окружающее пространство и быстро затухают	Кино, радиовещание (микрофоны, громкоговорители)
Радиоволны	$10^{-3} - 3 \cdot 10^3$ м $10^5 - 3 \cdot 10^{11}$ Гц	Генераторы радиочастот, генераторы СВЧ	Колебательными контурами (антенна + приёмник), полупроводниковыми детекторами (поиск «жучков»)	Дальность распространения радиоволн зависит от мощности передатчика генерирующего электромагнитную волну	Радиосвязь, телевидение, радиолокация
Инфракрасное излучение	$10^{-3} - 10^{-7}$ м $10^{11} - 10^{14}$ Гц	Все тела при температуре, отличной от 0 К	Термопары, болометра, фотографический метод	Нагревает вещество при поглощении.	Приборы ночного видения, физиотерапия, промышленность (для сушки)
Видимое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 7 \cdot 10^{-7}$ м, $4 \cdot 10^{11} - 8 \cdot 10^{14}$ Гц	Лампа накаливания, сильно нагретые тела	Фотографический метод	Излучение воспринимается глазом	Освещение
Ультрафиолетовое излучение	$10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7}$ м $8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$ Гц.	Кварцевые лампы	Фотографический метод	Оказывают химическое действие; обладают большой проникающей способностью; оказывают биологическое действие	Медицина и промышленность
Рентгеновское излучение	$10^{-8} - 10^{-11}$ м $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19}$ Гц.	Рентгеновские трубки	Люминесцентный, фотографический, электрофотографический, ионизационный	Высокая химическая активность; биологическое действие; высокая проникающая способность	Медицина (рентгеновские снимки), в промышленности (обнаружение дефектов)
$\gamma$ -излучение	меньше $10^{-11}$ м от $10^{20}$ Гц	Ядерные реакции, радиоактивный распад	Сцинтилляционные детекторы, пропорциональные газонаполненные счетчики высокого давления	Высокая проникающая способность, сильное биологическое действие	В медицине, промышленности (дефектоскопия), науке

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. 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.

## Шкала электромагнитных волн



## Свойства электромагнитных волн

1. В вакууме электромагнитная волна распространяется со скоростью равной скорости света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.
2. Электромагнитные волны поперечные. Колебания векторов напряженности переменного электрического поля и магнитной индукции переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору скорости волны (см. рисунок).
3. Электромагнитные волны переносят энергию в направлении распространения волны.
4. Электромагнитная волна в отличие от механической волны может распространяться в вакууме.
5. Электромагнитные волны способны оказывать давление на вещество.
6. У электромагнитных волн есть импульс.

*Свойства электромагнитных волн общие для волн любой природы*

7. Электромагнитные волны могут отражаться от поверхностей (отражение волн).
8. При переходе из одной среды в другую электромагнитные волны могут менять направление своего распространения (преломление волн).
9. Электромагнитные волны могут взаимно усиливать или ослаблять друг друга (интерференция волн).
10. Электромагнитные волны способны огибать препятствия (дифракция волн);
11. Электромагнитные волны частично поглощаются при переходе через диэлектрик (поглощение волн).
12. Из всего пучка из пучка электромагнитных волн, идущих от источника, можно выделить лучи с определенной ориентацией электрического вектора (поляризация волн).

**Плотность потока или интенсивность** – это электромагнитная энергия, переносимая через поверхность единичной площади за единицу времени. Интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

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