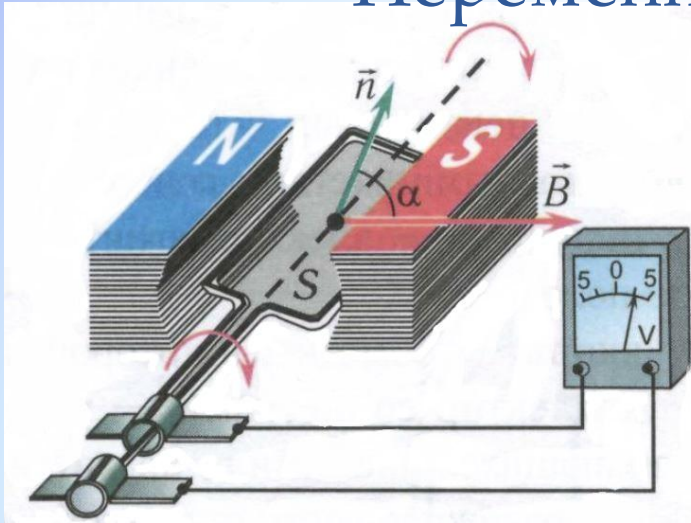


Центр ускоренного обучения  
Людмилы Шабашовой

Электромагнитные  
колебания.  
Переменный  
электрический ток

Преподаватель Ольга Анатольевна

# §8 Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный электрический ток



Вынужденные электромагнитные колебания в колебательном контуре происходят под действием внешней периодически изменяющейся ЭДС или внешнего изменяющегося напряжения.

Ток, сила и направление которого периодически меняются, называется переменным.

Электротехническое устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в энергию переменного электрического тока, называется генератором переменного тока.

$$\alpha = \omega t = \frac{2\pi}{T} t$$

$$\Phi(t) = BS \cos \alpha$$

$$\mathcal{E}(t) = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$$

$$\mathcal{E}_0 = BS\omega$$

Амплитудное (максимальное)  
значение ЭДС

Если концы рамки замкнуты на сопротивление  $R$ , то сила тока, проходящего в нём:

$$I = \frac{BS\omega}{R} \sin\omega t = I_0 \sin\omega t$$

Сила тока и напряжение в этом случае совпадают по фазе.

В общем случае (например, при наличии в цепи конденсатора и (или) катушки) колебания силы тока в цепи и напряжения на конденсаторе или катушке будут происходить с одинаковой частотой  $\omega$ , но не будут совпадать по фазе:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi)$$

$\Delta\varphi$  - разность фаз колебаний силы тока и напряжения.

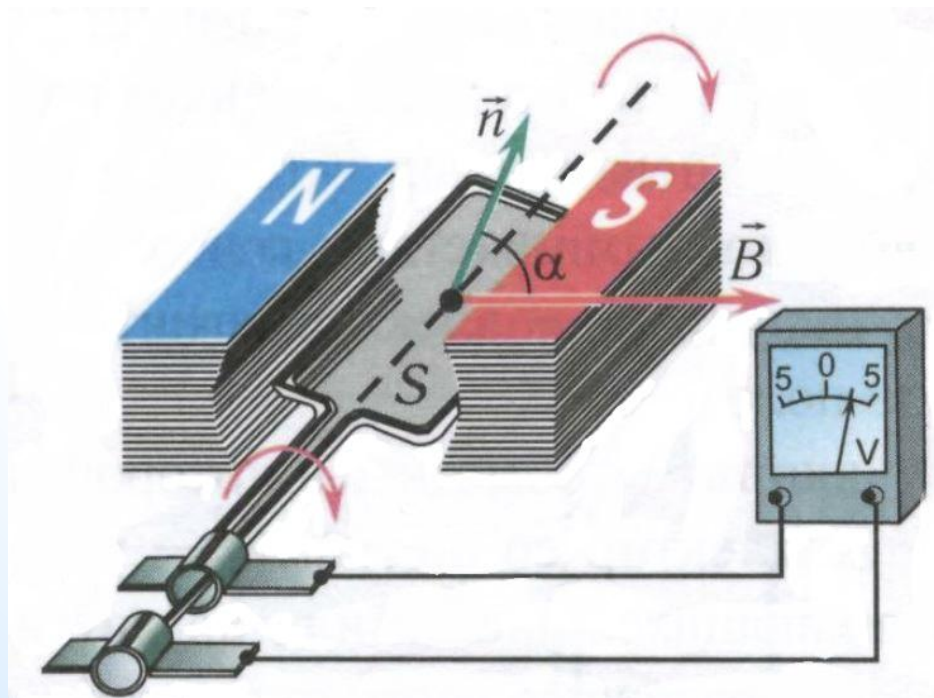
$U_0$  - амплитудное значение напряжения на конденсаторе или катушке.

Основными частями индукционного генератора переменного тока являются:

индуктор – постоянный магнит или электромагнит, который создаёт магнитное поле;

якорь – обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС;

коллектор – контактные кольца и скользящие по ним контактные пластинки (щётки) – устройство, посредством которого ток снимается или подводится к вращающимся частям.



Максимальные величины напряжения и силы тока  $U_0, I_0$  называются амплитудными значениями напряжения и силы тока соответственно.

Значения напряжения  $U(t)$  и силы тока  $I(t)$  в любой момент времени называются мгновенными.

Под действующим значением силы переменного тока  $I_{\text{д}}$  (напряжения  $U_{\text{д}}$ ) понимают силу (напряжение) такого постоянного тока, который, протекая по цепи, выделил бы в единицу времени такое же количество теплоты, что и данный переменный ток:

$$I_{\text{д}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\text{д}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

Средняя мощность переменного тока за длительный промежуток времени равна:

$$\langle P \rangle = \frac{I_0^2 R}{2} = \frac{U_0^2}{2R} = \frac{I_0 U_0}{2} = I_{\text{д}} U_{\text{д}} = I_{\text{д}}^2 R = \frac{U_{\text{д}}^2}{R}$$

(упр.8.1)1. Включенный в сеть переменного тока вольтметр показывает напряжение  $U = 220$  В. Определите амплитудное значение напряжения  $U_0$  в сети.

$$U_0 = \sqrt{2}U_{\text{д}}$$

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot 220 \text{ В} = 311 \text{ В}$$

(упр.8.2)2. В цепи переменного тока напряжение изменяется по закону  $U = U_0 \sin \omega t$ , где  $U_0 = 200$  В,  $\omega = 50\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  переменного тока, а также действующее значение напряжения  $U_{\text{д}}$  в цепи. На какое напряжение  $U$  должна быть рассчитана изоляция проводов?

$$\omega = 2\pi\nu \qquad \nu = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \nu = \frac{50\pi}{2\pi} = 25 \text{ (Гц)}$$

$$U_{\text{д}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \qquad U_{\text{д}} = \frac{200 \text{ В}}{\sqrt{2}} = 142 \text{ В}$$

$$U_{\text{max}} = U_0 = 200 \text{ В}$$

(упр.8.3)3. Сила тока в цепи переменного тока изменяется по закону  $I = I_0 \sin \omega t$ , где  $I_0 = 3,0 \text{ А}$ ,  $\omega = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определите частоту  $\nu$  колебаний тока в цепи и действующее значение силы тока  $I_{\text{д}}$ .

$$\omega = 2\pi\nu \qquad \nu = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \nu = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ (Гц)}$$

$$I_{\text{д}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \qquad I_{\text{д}} = \frac{3,0 \text{ А}}{\sqrt{2}} = 2 \text{ А}$$



(упр.8.4)4. Напряжение на участке электрической цепи, по которому проходит переменный ток, изменяется со временем по закону  $U = U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Определите амплитудное значение напряжения  $U_0$ , если в момент времени  $t = \frac{T}{6}$  мгновенное значение напряжения  $U = 6,0$  В.

$$6 = U_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{6} + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$6 = U_0 \sin\left(\frac{7\pi}{12}\right)$$

$$U_0 = \frac{6}{\sin\left(\frac{7\pi}{12}\right)} = \frac{6}{\sin 105^\circ} = 6,2 \text{ В}$$

(упр.8.5)5. Плоский проводящий виток площадью  $S = 0,12 \text{ м}^2$  равномерно вращается в однородном магнитном поле, совершая  $n = 5,0 \frac{\text{об}}{\text{с}}$  вокруг оси, расположенной в плоскости витка и перпендикулярной линиям индукции. Как изменяется ЭДС индукции в витке с течением времени, если модуль индукции магнитного поля  $B = 50 \text{ мТл}$  и в начальный момент времени плоскость витка перпендикулярна линиям индукции магнитного поля? Определите амплитудное значение ЭДС  $\mathcal{E}_0$  в витке.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad \varphi_0 = 0$$

$$\omega = 2\pi\nu = 2 \cdot 3,14 \cdot 5,0 = 10\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\mathcal{E}_0 = BS\omega$$

$$\mathcal{E}_0 = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12 \cdot 10 \cdot 3,14 = 0,19 \text{ (В)}$$

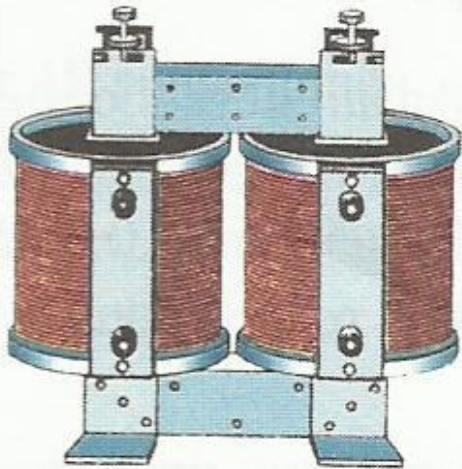
$$\mathcal{E} = 0,19 \sin 10\pi t$$

# §9 Преобразование переменного тока. Трансформатор

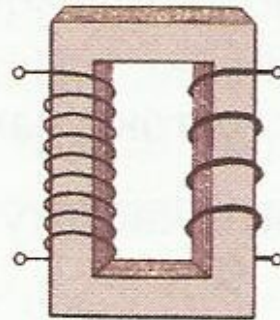
**Трансформатор** – это электромагнитное устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения с сохранением его частоты.

Трансформатор, увеличивающий напряжение, называют **повышающим**, а уменьшающий напряжение – **понижающим**.

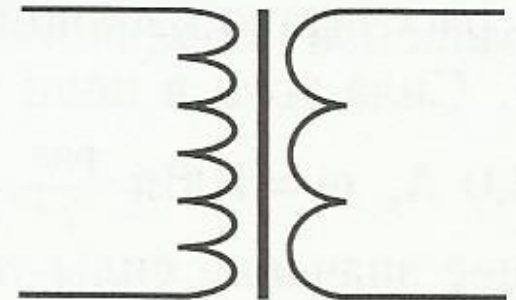
*а*



*б*

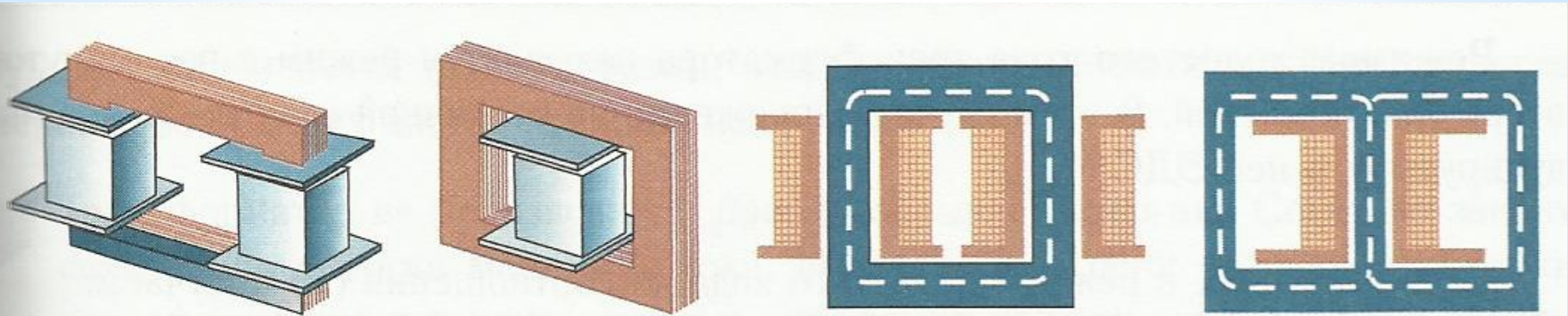


*в*



Трансформатор: *а* — общий вид; *б* — схематическое изображение; *в* — условное обозначение

Самый простой трансформатор состоит из двух обмоток (катушек), надетых на общий замкнутый сердечник. Обмотка трансформатора, на которую подаётся переменное напряжение, называется *первичной*, а обмотка, с которой снимается преобразованное переменное напряжение, - *вторичной*. Число витков в первичной обмотке трансформатора обозначим  $N_1$ , а во вторичной -  $N_2$ .



Различные расположения обмоток трансформаторов

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Магнитное поле, создаваемое переменным током в первичной обмотке, благодаря наличию замкнутого сердечника практически без потерь (без рассеяния) пронизывает витки вторичной обмотки. Для этого сердечник изготавливается из специального (ферромагнитного) материала, что позволяет создаваемое током в обмотках поле почти полностью локализовать внутри сердечника. В результате магнитный поток существует только внутри сердечника и одинаков во всех сечениях. Это даёт возможность считать мгновенные значения магнитных потоков во всех сечениях сердечника одинаковыми.

Режимом холостого хода трансформатора называется режим с разомкнутой вторичной обмоткой. В этом случае напряжение на вторичной обмотке равно индуцируемой в ней ЭДС:

$$U_2 \approx \mathcal{E}_2.$$

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

Тип трансформатора определяется коэффициентом трансформации:

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

Рабочим ходом (режимом) трансформатора называется режим, при котором в цепь его вторичной обмотки включена некоторая нагрузка. Включение нагрузки во вторичную цепь трансформатора приводит к появлению в ней тока.

Режимом короткого замыкания называется режим, при котором вторичная обмотка трансформатора замкнута без нагрузки. Данный режим опасен для трансформатора, поскольку в этом случае действующее значение тока во вторичной обмотке максимально и происходят электрическая и тепловая перегрузки системы.

(упр.9.1)6. Первичная обмотка трансформатора содержит  $N_1 = 185$  витков, вторичная -  $N_2 = 65$ . Какой это трансформатор – повышающий или понижающий? Во сколько раз  $k$  он изменяет напряжение, подаваемое на первичную обмотку?

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{185}{65} = 2,84 > 1 \text{ – понижающий}$$

(упр.9.2)7. Для питания неоновых трубок световой рекламы требуется действующее значение напряжения  $U_2 = 120$  В. Каким должно быть отношение  $k$  числа витков в первичной и во вторичной обмотках трансформатора для питания трубок от сети с действующим значением напряжения  $U_1 = 1,2$  кВ?

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{1200}{120} = 10$$



(упр.9.3)8. Первичная обмотка трансформатора содержит  $N_1 = 1800$  витков, вторичная -  $N_2 = 120$ . Пренебрегая потерями, определите действующее значение силы тока  $I_1$  в первичной обмотке, если во вторичной обмотке оно -  $I_2 = 8,0$  А. Найдите действующее значение напряжения  $U_2$  во вторичной обмотке, если в первичной обмотке  $U_1 = 120$  В.

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$U_2 = \frac{U_1 N_2}{N_1} = \frac{120 \cdot 120}{1800} = 8 \text{ (В)}$$

$$I_1 = \frac{I_2 N_2}{N_1} = \frac{8 \cdot 120}{1800} = 0,53 \text{ (А)}$$

(упр.9.4)9. В трансформаторе мощностью  $P = 280$  Вт выходное действующее значение напряжения  $U_2 = 6,0$  В, а действующее значение силы тока в первичной обмотке  $I_1 = 20$  А. Какой это трансформатор – понижающий или повышающий? Во сколько раз  $k$  изменится напряжение? Потерями в трансформаторе пренебречь.

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$P = U_1 I_1 \qquad U_1 = \frac{P}{I_1} = \frac{280}{20} = 14 \text{ (В)}$$

$$k = \frac{14 \text{ В}}{6 \text{ В}} = 2,3 \text{ — понижающий}$$

(упр.9.5)10. По двум проводам, сопротивлением  $R = 0,055 \text{ Ом}$  каждый, передаётся электрическая мощность  $P = 80 \text{ кВт}$ . Каких потерь мощности в линии удастся избежать, если сначала повысить действующее значение напряжения от  $U = 120 \text{ В}$  до  $U_1 = 1200 \text{ В}$ , а в конце линии понизить до  $U = 120 \text{ В}$  с помощью трансформаторов, КПД каждого из которых  $\eta = 99\%$ ?

$$I = \frac{P}{U} = \frac{80 \cdot 10^3}{120} = 667 \text{ (А)}$$

**Потери в проводах**  $P = I^2 R = 667^2 \cdot 0,055 \cdot 2 = 48\,889 \text{ (Вт)}$

$$I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{80 \cdot 10^3}{1200} = 66,7 \text{ (А)}$$

**Потери в проводах**  $P_1 = I_1^2 R = 66,7^2 \cdot 0,055 \cdot 2 \approx 489 \text{ (Вт)}$

**Потери при трансформации**  $P_{\text{тр}} = 2P(1 - \eta) = 1800 \text{ (Вт)}$

**Во втором случае общие потери**  $P_2 = P_1 + P_{\text{тр}} = 2289 \text{ (Вт)}$

• **Экономия**  $\Delta P = P - P_2 = 48\,889 - 2\,289 = 47\,000 \text{ (Вт)}$

(упр.9.6)11. В радиоприёмнике установлен трансформатор, имеющий две вторичные обмотки, действующее значение напряжения на первой  $U_{21} = 4,0$  В, а на второй –  $U_{22} = 40$  В. Действующее значение напряжения в первичной обмотке трансформатора, содержащей  $N_1 = 180$  витков,  $U_1 = 120$  В. Найдите число витков  $N_{21}$  и  $N_{22}$  во вторичных обмотках трансформатора.

$$k_1 = \frac{U_1}{U_{21}} = \frac{N_1}{N_{21}}$$

$$N_{21} = \frac{U_{21}N_1}{U_1} = \frac{4,0 \cdot 180}{120} = 6$$

$$k_2 = \frac{U_1}{U_{22}} = \frac{N_1}{N_{22}}$$

$$N_{22} = \frac{U_{22}N_1}{U_1} = \frac{40 \cdot 180}{120} = 60$$

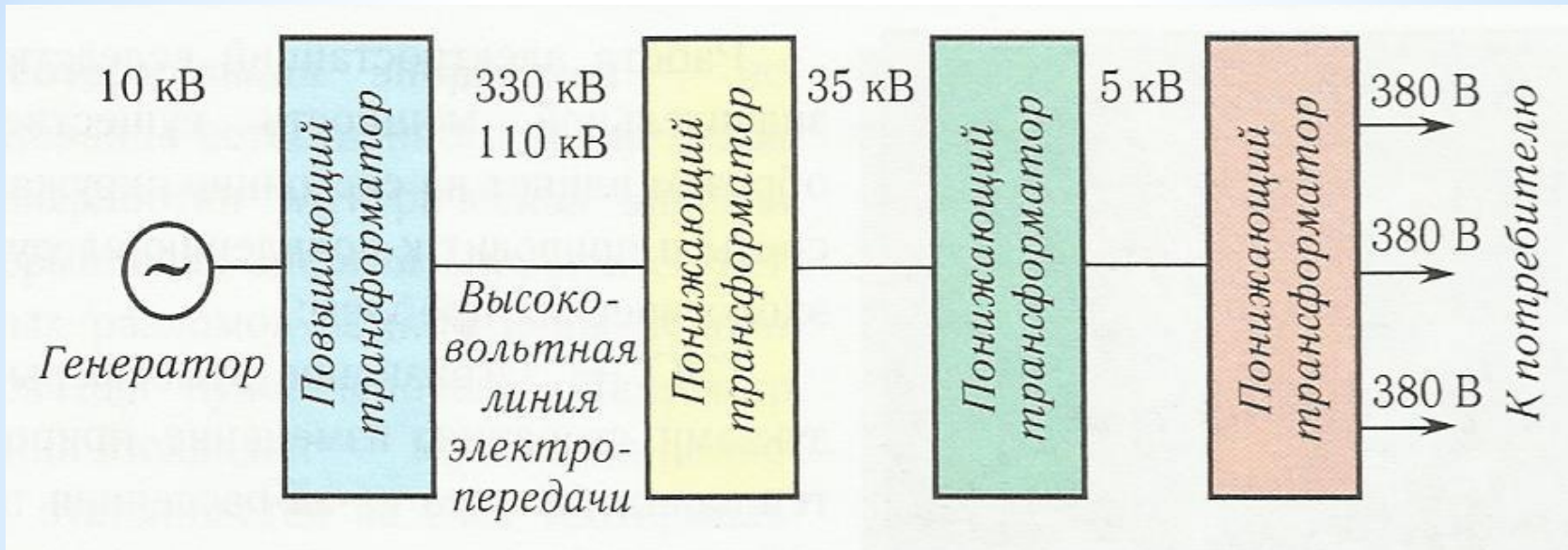
# §10 Производство, передача и потребление электрической энергии. Экологические проблемы производства и передачи электрической энергии

Тепловые электростанции (ТЭС) используют теплоту, получаемую при сжигании угля, нефти, мазута, газа и других горючих ископаемых (КПД  $\eta = 40\%$ ).

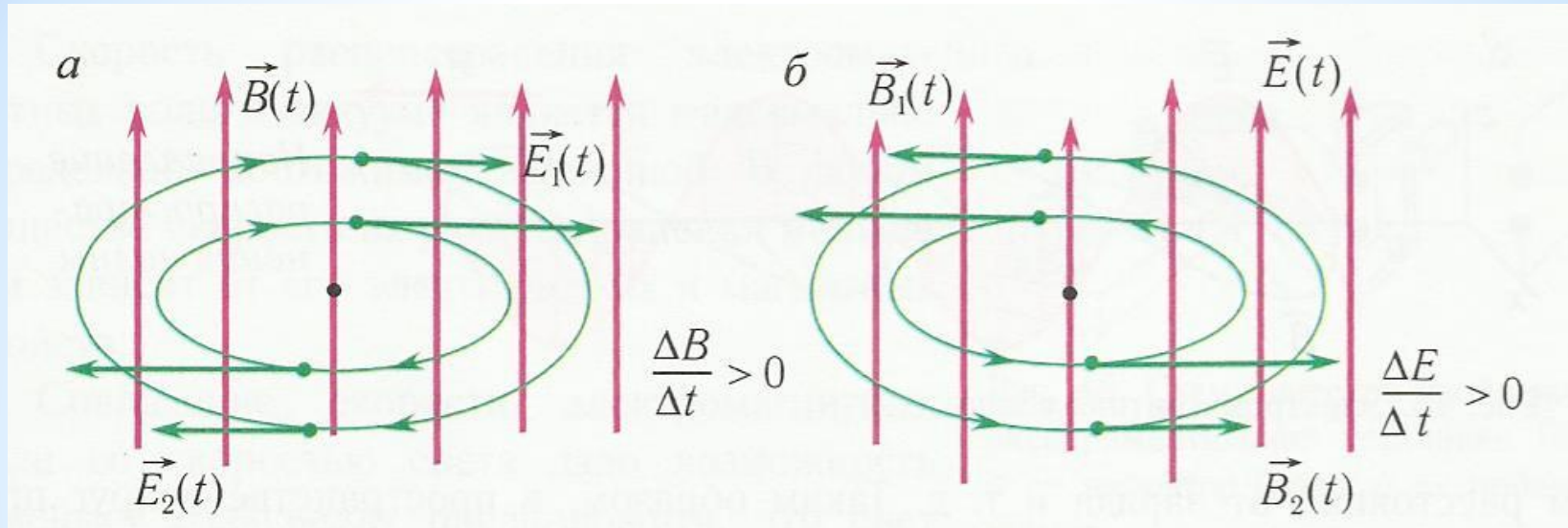
Гидроэлектростанции (ГЭС) используют энергию движущейся воды рек, водохранилищ и иных водных потоков (КПД  $\eta = 90 - 93\%$ ).

Атомные электростанции (АЭС) работают на энергии, выделяющейся при расщеплении ядер урана и плутония (КПД  $\eta = 20\%$ ).

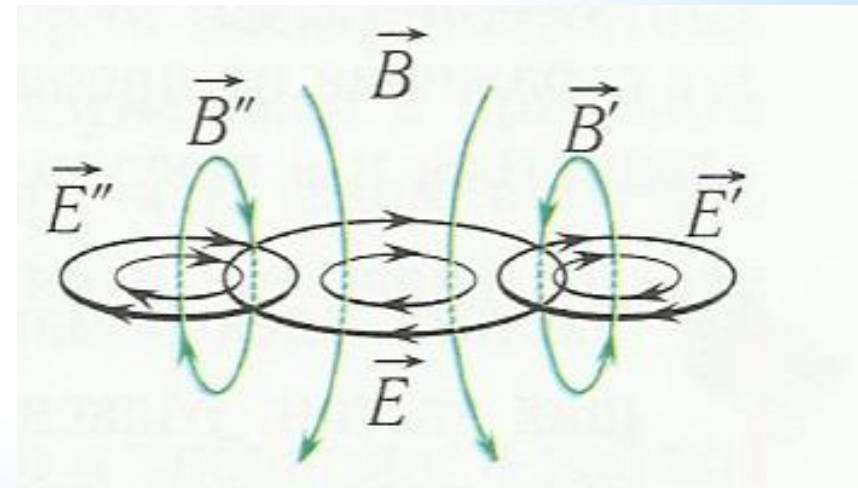
## Блок-схема передачи электроэнергии

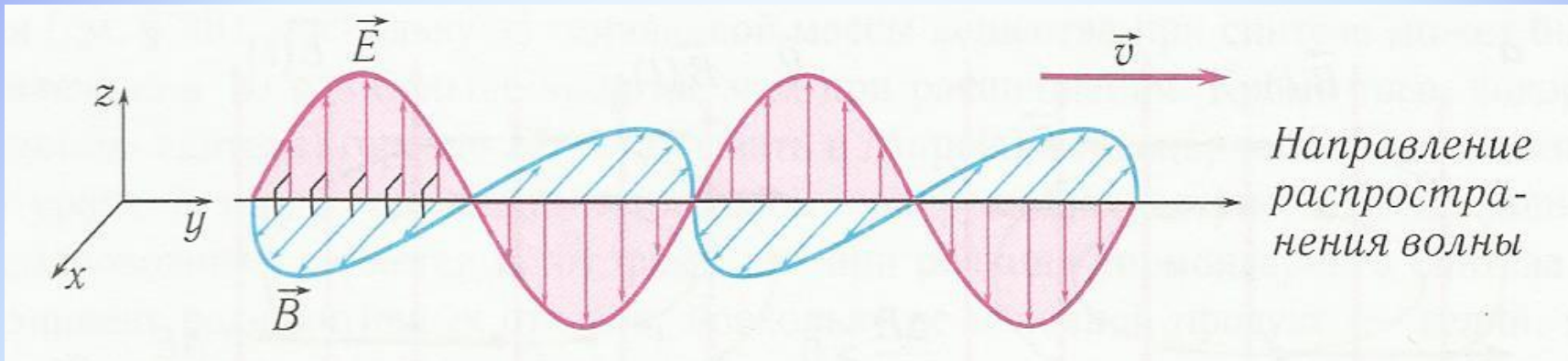


# §11 Электромагнитные волны и их свойства. Шкала электромагнитных волн



Совокупность связанных друг с другом периодически изменяющихся электрического и магнитного полей называют переменным электромагнитным полем.





**Электромагнитной волной** называется электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме или в какой-либо среде с течением времени с конечной скоростью.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

скорость распространения  
электромагнитных волн

### **Свойства электромагнитных волн.**

1. Распространяются не только в различных средах, но и в вакууме.
2. Отражаются и преломляются на границах раздела сред.
3. Являются поперечными.
4. Распространяются в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .



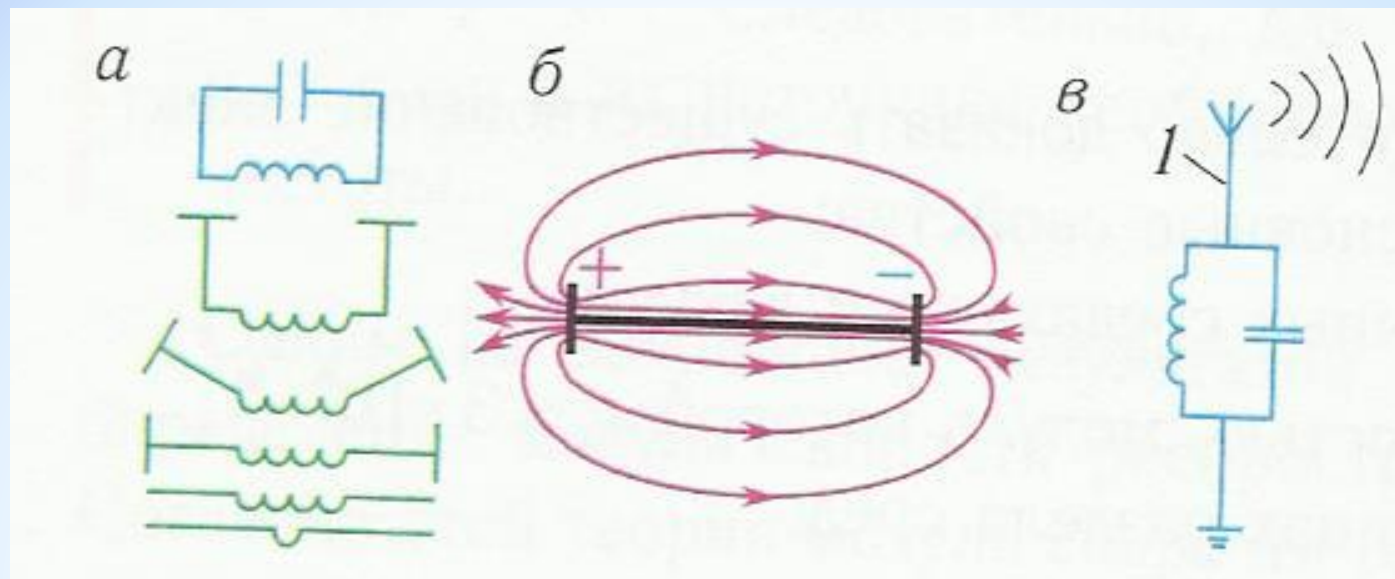


Схема получения открытого колебательного контура (а); открытый колебательный контур (б); колебательный контур с антенной 1 (в).

# Шкала электромагнитных волн

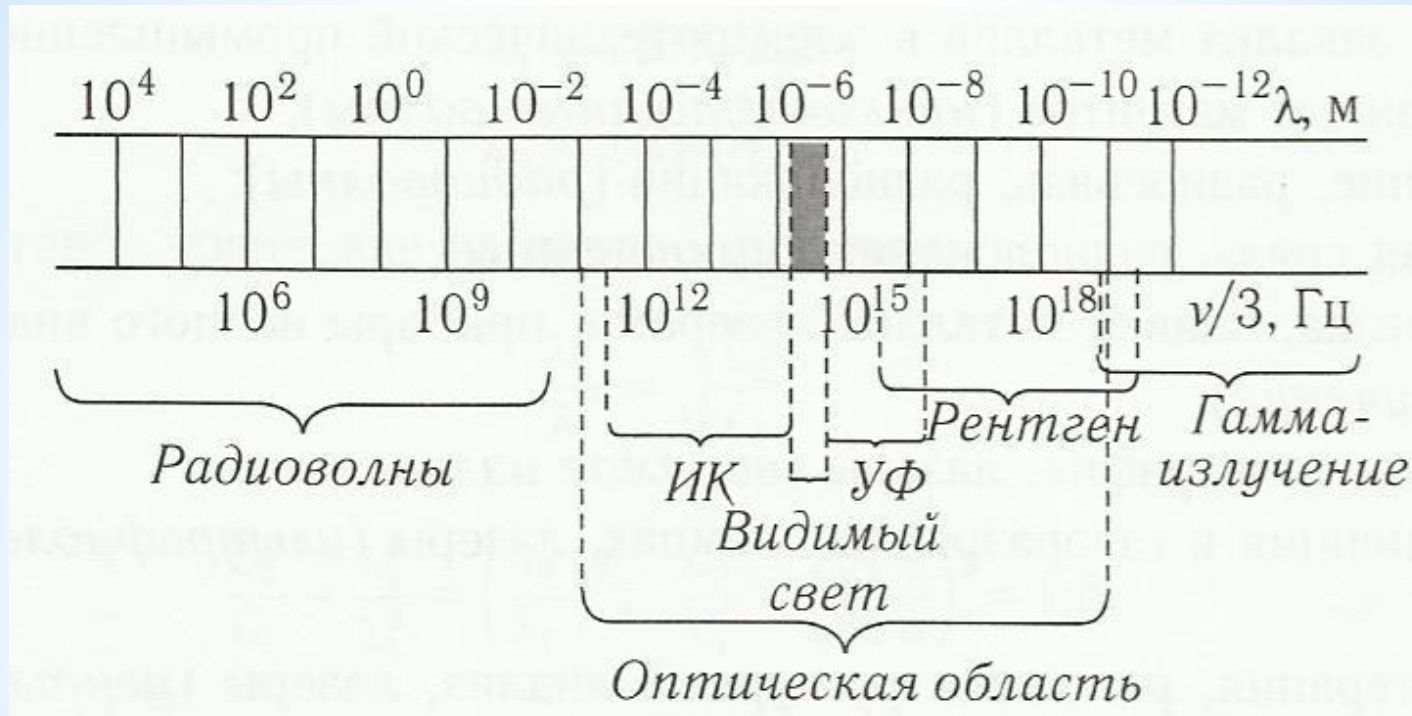


Таблица 5. Классификация электромагнитных волн

Виды излучения	Интервал частот, Гц	Интервал длин волн (вакуум), м	Источники излучения
Низкочастотные волны	$< 3 \cdot 10^3$	$> 1 \cdot 10^5$	Высоковольтные ЛЭП, генераторы переменного тока, электрические машины
Радиоволны	$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^{-1}$	Колебательные контуры, вибраторы Герца
Микроволны	$3 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-4}$	Лазеры, полупроводниковые приборы
Инфракрасное излучение	$1 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-7}$	Солнце, электролампы, лазеры, космическое излучение
Видимое излучение	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	Солнце, электролампы, люминесцентные лампы, лазеры
Ультрафиолетовое излучение	$8 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-8}$	Солнце, космическое излучение, лазеры, электрические лампы
Рентгеновское излучение	$1 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-10}$	Бетатроны, солнечная корона, небесные тела, рентгеновские трубки
Гамма-излучение	$3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{29}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-21}$	Космическое излучение, радиоактивные распады, бетатроны

(упр.10.1)12. Радиоприёмник принимает передачу на волне длиной  $\lambda = 15$  м. Определите период  $T$  и частоту  $\nu$  колебаний тока в колебательном контуре приёмника.

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{15 \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 0,2 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

(упр.10.2)13. Определите количество  $N$  длин волн монохроматического излучения частотой  $\nu = 150$  ГГц, которое укладывается на отрезке длиной  $l = 15$  м.

$$N = \frac{l}{\lambda} \qquad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$N = \frac{l\nu}{c} = \frac{15 \text{ м} \cdot 150 \cdot 10^9 \text{ Гц}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 7,5 \cdot 10^3$$

(упр.10.3)14. Определите длину волны  $\lambda$ , на которую настроен радиоприёмник, если напряжение в приёмном контуре меняется по закону:  $U(t) = 200 \cos(2 \cdot 10^4 \pi t)$ (В).

$$\lambda = cT$$

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

$$\lambda = c \frac{2\pi}{\omega} = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{2\pi}{2 \cdot 10^4 \pi} = 3 \cdot 10^4 (\text{м}) = 30 \text{ км}$$

(упр.10.4)15. Определите длину волны  $\lambda$ , на которую настроен радиоприёмник, если его колебательный контур содержит конденсатор ёмкостью  $C = 4,0$  нФ и катушку индуктивностью  $L = 4,0$  мГн.

$$\lambda = cT$$

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

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC}$$

$$\lambda = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{4 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-9}} = 7,5 \cdot 10^3 (\text{м})$$

(упр.10.5)16. Определите расстояние  $d_2$  между обкладками плоского воздушного конденсатора, чтобы колебательный контур приёмника был настроен на длину волны  $\lambda_2 = 120$  м, если при расстоянии между ними  $d_1 = 3,6$  мм приёмник настроен на длину волны  $\lambda_1 = 150$  м.

$$\lambda = cT$$

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

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

$$\lambda_1 = 2\pi c \sqrt{L \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_1}}$$

$$\lambda_2 = 2\pi c \sqrt{L \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_2}}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}}$$

$$\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} = \frac{d_2}{d_1}$$

$$d_2 = \frac{\lambda_1^2 d_1}{\lambda_2^2}$$

$$d_2 = \frac{(150 \text{ м})^2 \cdot 3,6 \text{ мм}}{(120 \text{ м})^2} = 5,6 \text{ мм}$$



(упр.10.6)17. Рассчитайте расстояние  $l$  до объекта, если отражённый от него радиосигнал вернулся через промежуток времени  $\Delta t = 3,0$  мкс.

$$l = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{2} = 450 \text{ (м)}$$

(упр.10.7)18. Радиолокационная станция излучает импульс электромагнитных волн, содержащий  $N = 937,5$  волны. Определите длительность  $\tau$  импульса, если длина излучаемой волны  $\lambda = 1,6$  см.

$$T = \frac{\tau}{N}$$

$$T = \frac{\lambda}{c}$$

$$\frac{\tau}{N} = \frac{\lambda}{c}$$

$$\tau = \frac{\lambda N}{c} = \frac{1,6 \cdot 10^{-2} \cdot 937,5}{3 \cdot 10^8} = 500 \cdot 10^{-10}(\text{с}) = 50 \text{ нс}$$

# Домашнее задание

## §9-11, упр. 8-10

1. Что называется трансформатором?
2. Опишите устройство простейшего трансформатора.
3. На каком физическом явлении основан принцип действия трансформатора?
4. Какой режим работы трансформатора называется холостым ходом?
5. Что называют коэффициентом трансформации?
6. Чем отличается рабочий режим трансформатора от режима холостого хода?
7. Какие типы электростанций вы знаете?
8. Как осуществляется передача электроэнергии на большое расстояние?
9. Что является источником вихревого электрического поля?
10. Что называется электромагнитной волной?
11. Какие существуют виды излучения?