

$$E = mc^2$$

$$F = ma$$

Электронный учебник по квантовой физике для студентов инженерно-технических специальностей и направлений как одно из средств, повышающих уровень изучения научного, дидактического и учебно-методического материала в курсе физики высшей школы

$$g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$E = \frac{mv^2}{2}$$

Магнитное поле прямолинейного проводника с током

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$$

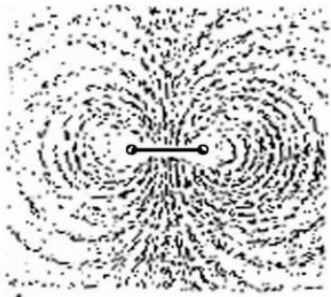
$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dl \sin \varphi}{r^2}$$

Так как $b = \frac{r}{\sin \varphi}$, а $dl = \frac{r d\varphi}{\sin \varphi}$, то

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$$

Для бесконечно длинного проводника
($\varphi_1 \rightarrow 0$, $\varphi_2 \rightarrow \pi$): $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{b} = \frac{\mu_0 I}{2b}$

Магнитное поле в центре кругового тока



$$B = \oint \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

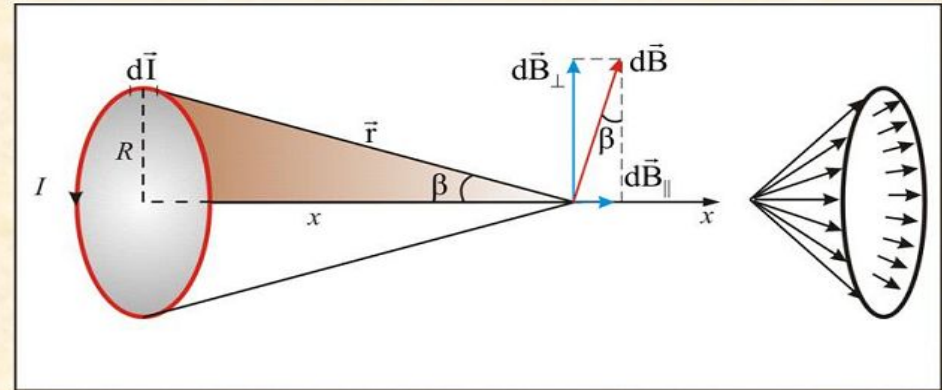
Силовые линии магнитного поля кругового тока – опыт с железными опилками.

Магнитное поле кругового тока

Рассмотрим поле, создаваемое током I , текущим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса R .

$$dB_{\parallel} = dB \sin \beta$$

$$\sin \beta = \frac{R}{r}$$



$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

т.к. угол α между $d\vec{l}$ и \vec{r} – прямой, то $\sin \alpha = 1$, тогда, получим:

$$dB_{\parallel} = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi r^2 r}$$

Положив $r = \sqrt{R^2 + x^2}$ и, проинтегрировав по всему контуру $l = 2\pi R$, получим выражение для нахождения магнитной индукции кругового тока:

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{\parallel} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

$1\text{Tл} = 1\text{Н}\cdot\text{с}/(\text{Кл}\cdot\text{м})$ — индукция такого магнитного поля, в котором на единицу заряда, движущегося со скоростью $1\text{м}/\text{с}$ действует максимальная сила Лоренца 1Н . (Сила максимальна при $\alpha = 90^\circ$)

Если провод с током параллелен \vec{B} , то $\vec{F}_A = 0$

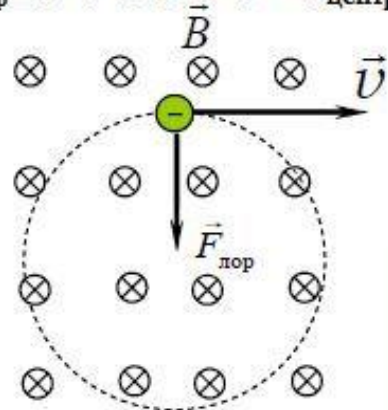
$1\text{Tл} = 1\text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$ — индукция такого однородного магнитного поля, в котором на прямой провод длиной 1м с током силой 1А действует максимальная сила Ампера 1Н . (Сила максимальна при $\alpha = 90^\circ$)

2. Движение зарядов в магнитном поле

2.1 Если скорость заряда $\vec{v} \perp \vec{B}$, то его траектория — окружность.

По II закону Ньютона: $m\vec{a} = \vec{F}_{\text{лор}}$ (массы частиц обычно так малы, что силой тяжести можно пренебречь по сравнению с $F_{\text{лор}}$)

$\vec{F}_{\text{лор}} \perp \vec{v} \Rightarrow \vec{a} \perp \vec{v} \Rightarrow a = a_{\text{центр}} = v^2/R$ — центростремительное ускорение.



Радиус окружности, по которой движется частица массой m , зарядом q в однородном магнитном поле индукцией B .

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

$$m \frac{v^2}{R} = |q|vB \cdot \sin 90^\circ$$

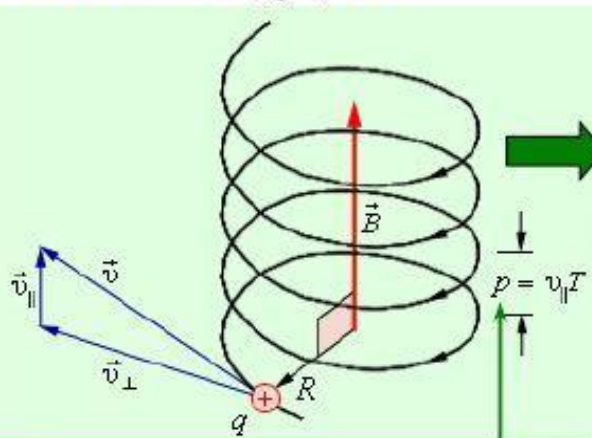
$$T = \frac{s}{v} = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

Период обращения частицы массой m , зарядом q в однородном магнитном поле индукцией B

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

! не зависит от скорости!

2.2 Если скорость заряда \vec{v} образует с \vec{B} произвольный угол (не равный $90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$), то его траектория — спираль.



Скорость частицы \vec{v} представим как сумму двух векторов \vec{v}_\perp и \vec{v}_\parallel (перпендикулярная и параллельная \vec{B} составляющие скорости). В системе отсчета K' , движущейся со скоростью \vec{v}_\parallel , частица будет иметь скорость \vec{v}_\perp и двигаться по окружности радиуса $R = \frac{mv_\perp}{|q|B}$ (п. 2.1). К этому

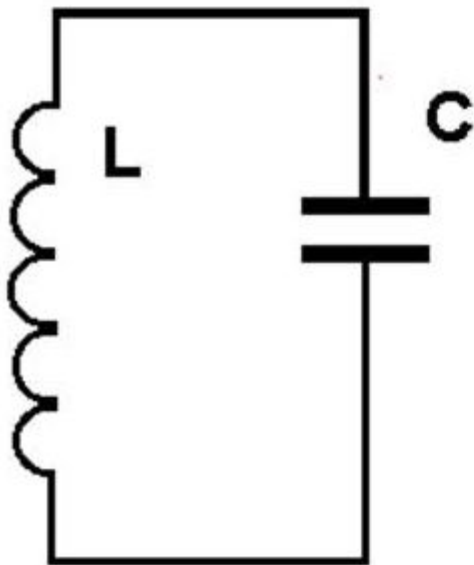
вращению добавляется поступательное движение K' -системы в результате получается движение по спирали (см. рис.)

Шаг спирали — расстояние, на которое смещается частица вдоль направления \vec{B} за один полный оборот, т. е. за время $T = \frac{2\pi m}{|q|B}$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Свободные колебания в контуре без активного сопротивления

Колебательный контур – это электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки, в которой могут происходить свободные электрические колебания.



$$W_p = \frac{q^2}{2C}$$

энергия электрического поля конденсатора

$$W_m = \frac{Li^2}{2}$$

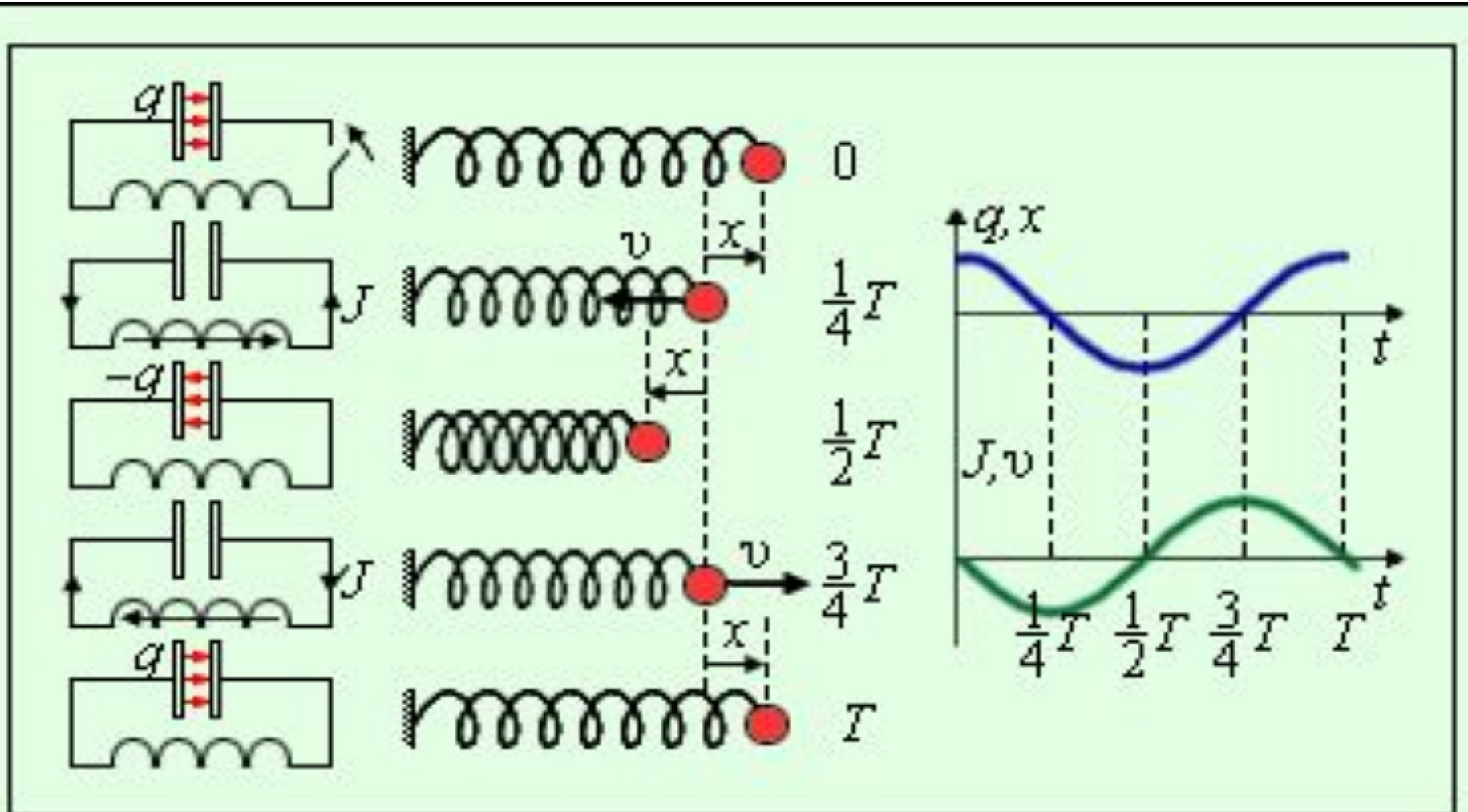
энергия магнитного поля катушки

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

Свободные электромагнитные колебания.

Свободные электромагнитные колебания — это колебания происходящие под действием внутренних сил периодических изменения заряда на конденсаторе, силы тока в катушке, а также электрических и магнитных полей в контуре.

Стадии колебательного процесса



Электрические величины		Механические величины	
Заряд конденсатора	$q(t)$	Координата	$x(t)$
Ток в цепи	$J = \frac{dq}{dt}$	Скорость	$v = \frac{dx}{dt}$
Индуктивность	L	Масса	m
Величина, обратная емкости	$\frac{1}{C}$	Жесткость	k
Напряжение на конденсаторе	$U = \frac{q}{C}$	Упругая сила	kx
Энергия электрического поля конденсатора	$\frac{q^2}{2C}$	Потенциальная энергия пружины	$\frac{kx^2}{2}$
Магнитная энергия катушки	$\frac{LI^2}{2}$	Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$
Магнитный поток	LI	Импульс	mv

Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний заряда в электромагнитном контуре

Дифференциальное уравнение колебаний в контуре:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$
$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{CL} = 0$$

Частота и период колебаний

в контуре

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{- формула Томпсона}$$

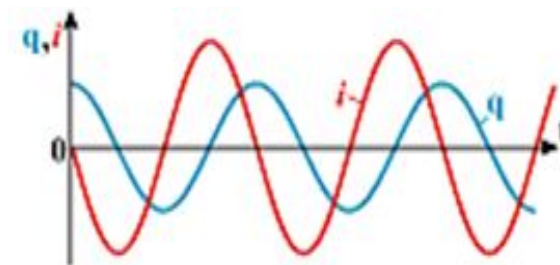
Решение

дифференциального уравнения:

$$q = q_m \cos(\omega_0 t)$$
$$I = I_m \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2})$$

q и q_m – мгновенное и максимальное значения заряда конденсатора
 I и I_m – мгновенное и максимальное значения силы тока
 ω_0 – циклическая частота колебаний

Колебания заряда и тока:



Свободные затухающие колебания

Свободные электромагнитные колебания в реальном колебательном контуре, представляющем собой последовательное соединение катушки индуктивности L , конденсатора емкости C и электрического сопротивления R – называются затухающими электромагнитными колебаниями

Уравнение изменения заряда q на обкладках конденсатора во времени:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = 0$$

Решение уравнения: $q = q_0 e^{-\gamma t} \sin(\omega_3 t + \delta)$

q_0 – амплитудное значение заряда в момент времени $t = 0$

$\gamma = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания

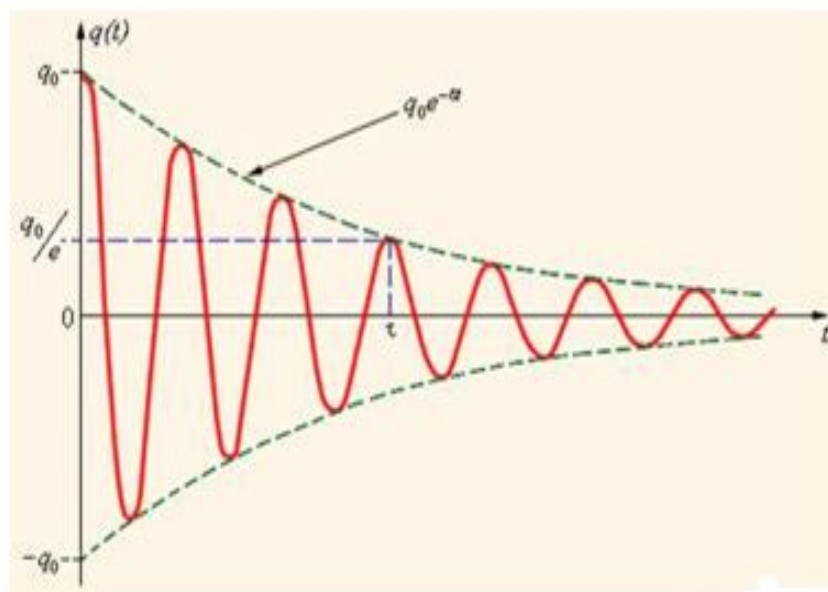
Зависимость заряда от времени при затухающем колебании

Циклическая частота свободных электромагнитных колебаний в контуре:

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Период затухающих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_3} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$



Вынужденные электромагнитные колебания

Незатухающие колебания в цепи под действием внешней, периодически изменяющейся ЭДС – называются вынужденными электромагнитными колебаниями

$$e = E_m \sin \omega t$$

e – мгновенное значение ЭДС индукции (в данный момент времени)

E_m – амплитудное значение ЭДС

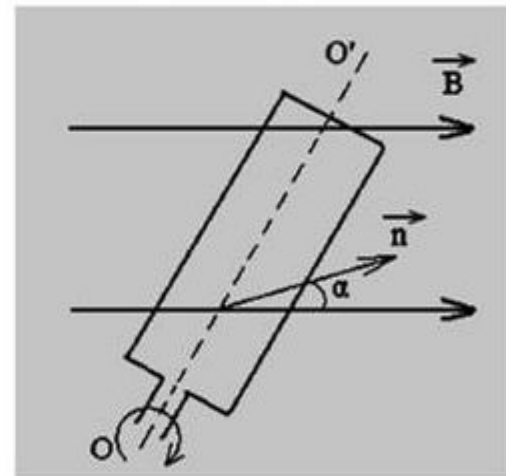
ω – циклическая частота переменной ЭДС

Магнитный поток Φ сквозь плоскость рамки:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

α – угол между нормалью \vec{n} к плоскости рамки и направлением

вектора магнитной индукции \vec{B}



По закону электромагнитной индукции:

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ – скорость изменения магнитной индукции

$$e = BS \omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

$E_m = BS \omega$ – амплитуда ЭДС индукции

Резонанс

- Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тока в колебательном контуре, которое происходит при совпадении частоты вынужденных колебаний с собственной частотой колебательного контура - называется резонансом.

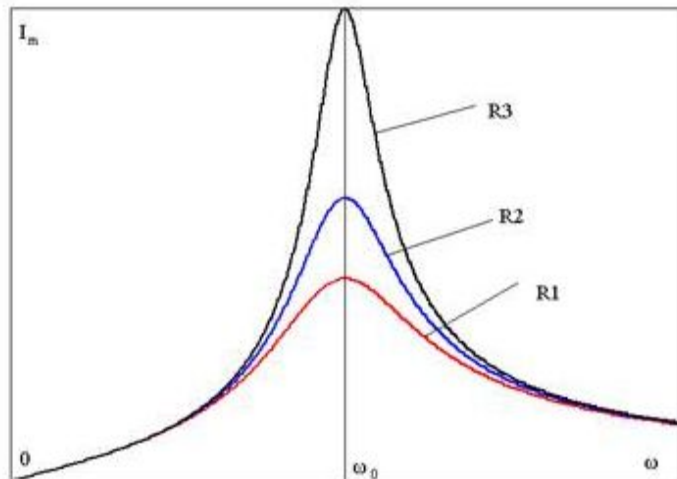
Если $U_m = const$, то амплитуда вынужденных колебаний силы тока зависит от ω :

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

R не зависит от $\omega \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}$ - справедливо, если $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$

ω_0 - собственная частота колебаний

ω - резонансная частота (частота переменного тока, при которой сила тока максимальна)



$U_{\text{LC}} = U_{\text{L}} = I_m \omega L = \frac{I_m}{\omega C} > U$ - резонансное напряжение

$$I_m = \frac{U_m}{|X|} = U_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right| = |I_{\text{LC}} - I_{\text{L}}| \quad I_{\text{LC}} \text{ и } I_{\text{L}} - \text{амплитудные значения силы токов}$$

U_m - амплитудное значение приложенного U

Если $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow I_{\text{LC}} = I_{\text{L}}, I_m = 0, R \rightarrow \omega$

Условие резонанса токов:

$$\omega \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

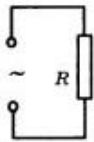
Переменный электрический ток

Представляет собой **вынужденные электрические колебания**. Переменный ток низкой частоты получают с помощью индукционного генератора (простейший индукционный генератор — рамка, вращающаяся в однородном магнитном поле), переменный ток высокой частоты — с помощью генератора на транзисторе.

Действующим значением силы тока называется сила постоянного тока, выделяющего в проводнике такое же количество теплоты, как и переменный ток за то же время. Аналогично определяется и действующее значение напряжения. Соотношения между

$$\text{действующими значениями и амплитудными: } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

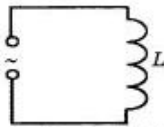


$$I_m = \frac{U_m}{R}, I = \frac{U}{R}$$

Колебания напряжения и силы тока **совпадают по фазе**.

Если $u = U_m \cos \omega t$, то $i = I_m \cos \omega t$.
Мощность переменного тока (средняя за период), выделяющаяся на активном сопротивлении, $P = \frac{1}{2} I_m U_m = IU = I^2 R$.

ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



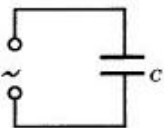
$$I_m = \frac{U_m}{X_L}, I = \frac{U}{X_L}$$

Колебания напряжения опережают по фазе колебания силы тока на четверть периода.

Если $i = I_m \cos \omega t$, то
 $u = U_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = -U_m \sin \omega t$.

Величина $X_L = \omega L$ называется **индуктивным сопротивлением**.

ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



$$I_m = \frac{U_m}{X_C}, I = \frac{U}{X_C}$$

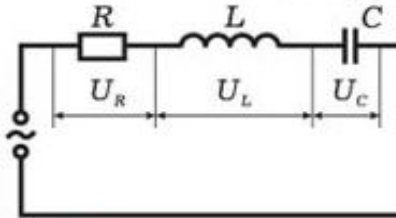
Величина $X_C = \frac{1}{\omega C}$ называется **емкостным сопротивлением**.

Колебания напряжения отстают по фазе от колебаний силы тока на четверть периода.

Если $i = I_m \cos \omega t$, то
 $u = U_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = U_m \sin \omega t$.

Для индуктивности и емкости в цепи переменного тока $P = 0$ (энергия периодически запасается в электрической цепи и возвращается в источник тока).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ИЗ R, L И C- ЭЛЕМЕНТОВ

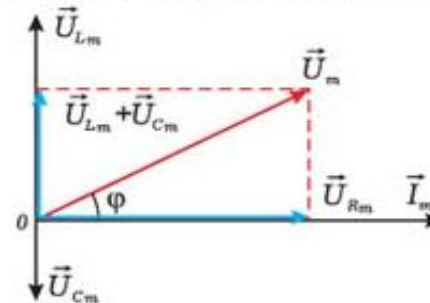


$$i = I_m \cos \omega t$$

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

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

ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ



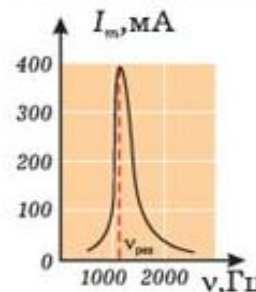
$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

РЕЗОНАНС В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



$$U_L = -U_C, \quad I_m \rightarrow \max$$

$$X_L = X_C, \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$