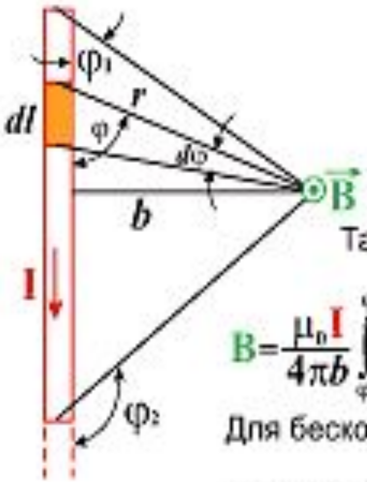
Электронный учебник по квантовой физике для студентов инженерно-технических специальностей и направлений как одно из средств, повышающих уровень изучения научного, дидактического и учебно-методического материала в курсе физики высшей школы

Магнитное поле прямолинейного проводника с током



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

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

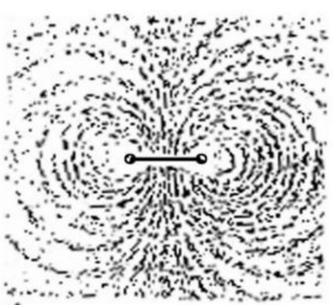
Так как $b=\frac{r}{\sin\varphi}$, а $dl=\frac{r\,d\varphi}{\sin\varphi}$, то

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

Для бесконечно длинного проводника

$(\varphi_1\to 0,\ \varphi_2\to\pi)$: $B=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{b}=\frac{\mu_0 I}{2\pi b}$

Магнитное поле в центре кругового тока



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

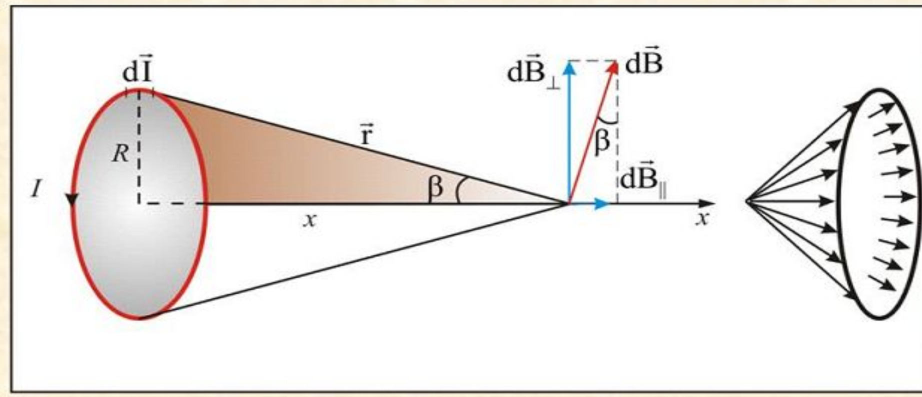
$$=\frac{\mu_0 I}{4\pi R^2}2\pi R=\frac{\mu_0 I}{2R}.$$

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.

$$\boxed{dB_{\|}=dB\sin\beta}\qquad\boxed{\sin\beta=\frac{R}{r}}$$



$$\boxed{dB=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\alpha}{r^2},}$$

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

$$\boxed{dB_{\|}=dB\frac{R}{r}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl}{r^2}\frac{R}{r}.}$$

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

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

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

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

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

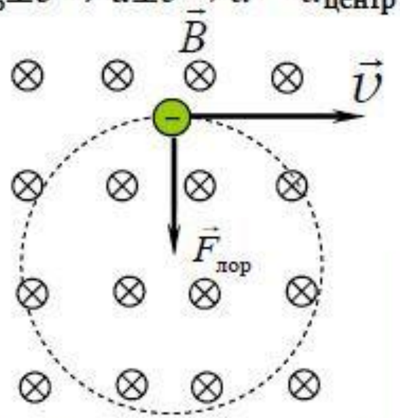
2. *Движение зарядов в магнитном поле*

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

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

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

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



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

$$\boxed{R = \frac{m\upsilon}{|q|B}}$$

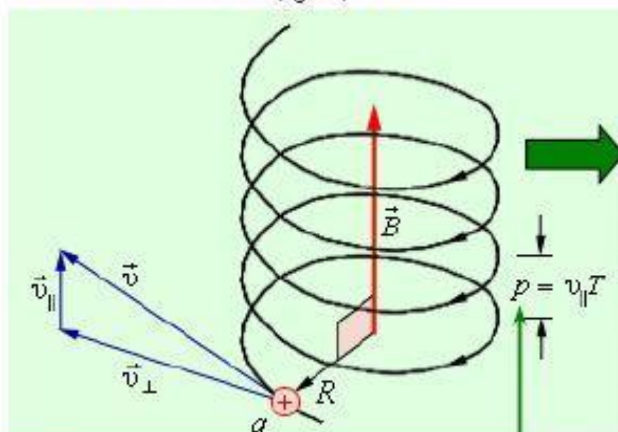
$$T = \frac{s}{\upsilon} = \frac{2\pi R}{\upsilon} = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

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

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

! не зависит от скорости!

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



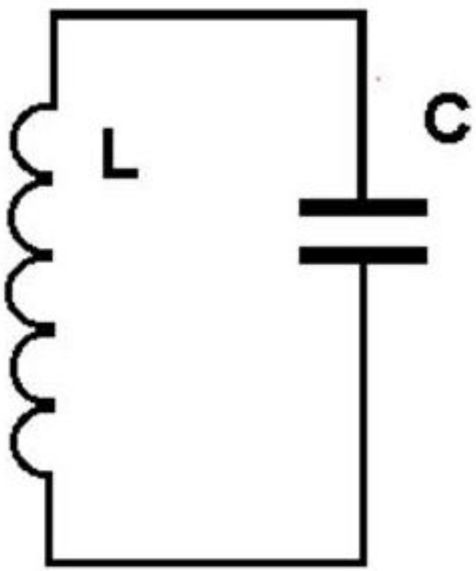
Скорость частицы $\vec{\upsilon}$ представляют как сумму двух векторов $\vec{\upsilon}_{\perp}$ и $\vec{\upsilon}_{\parallel}$ (перпендикулярная и параллельная $\vec{B}$ составляющие скорости). В системе отсчета K', движущейся со скоростью $\vec{\upsilon}_{\parallel}$, частица будет иметь скорость $\vec{\upsilon}_{\perp}$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

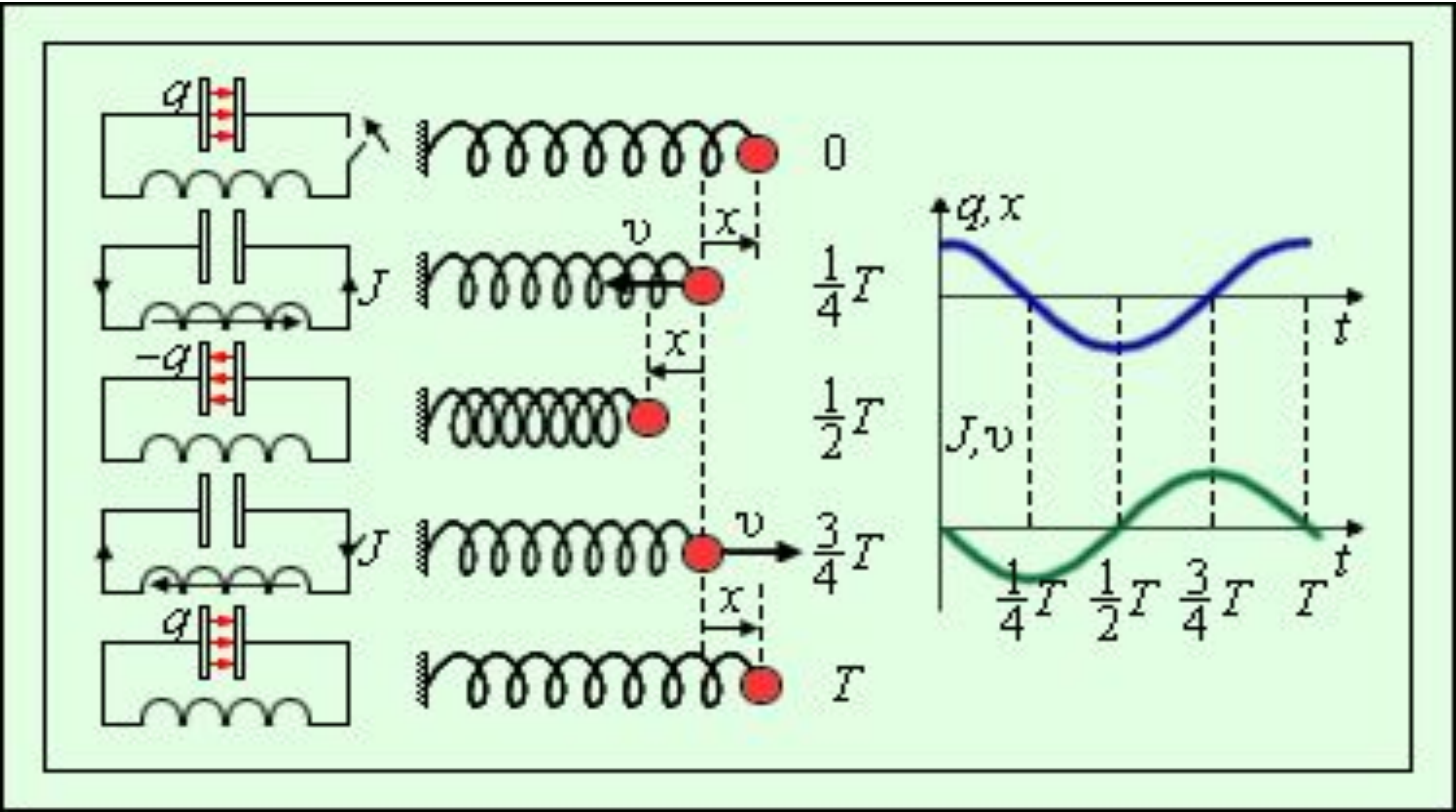
$$W_м = \frac{Li^2}{2}$$ энергия магнитного поля катушки

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

Свободные электромагнитные колебания.

Свободные электромагнитные колебания – это колебания происходящие под действием внутренних сил периодических изменениях 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	$\upsilon = \frac{dx}{dt}$
Индуктивность	L	Масса	m
Величина, обратная электроемкости	$\frac{1}{C}$	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	$\frac{m\upsilon^2}{2}$
Магнитный поток	LI	Импульс	$m\upsilon$

Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний заряда в электромагнитном контуре

Дифференциальное уравнение колебаний в контуре:

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

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

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

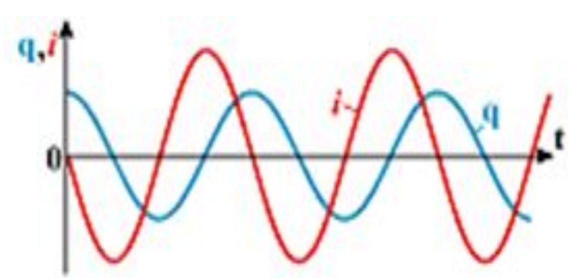
ω_0 – циклическая частота колебаний

Частота и период колебаний в контуре

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

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

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

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

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

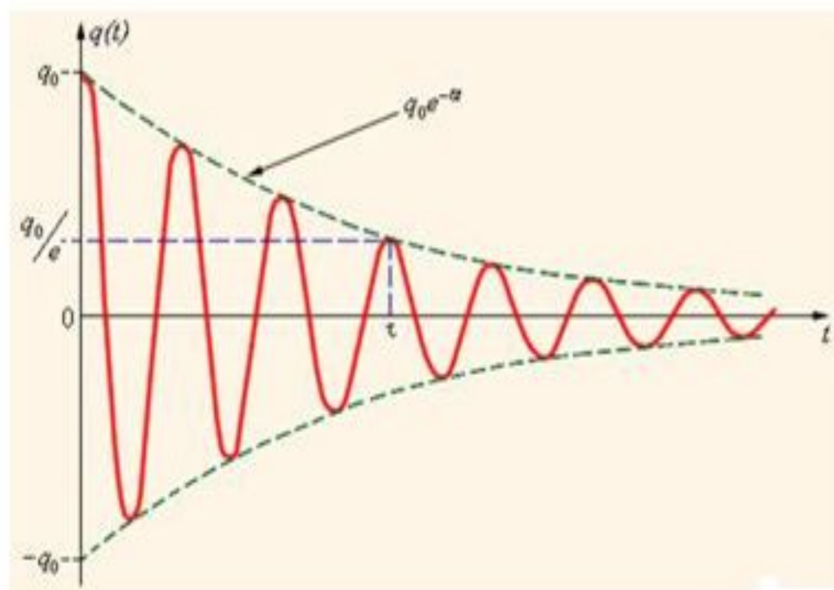
Циклическая частота свободных электромагнитных колебаний в контуре:

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

Период затухающих колебаний:

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

Зависимость заряда от времени при затухающем колебании

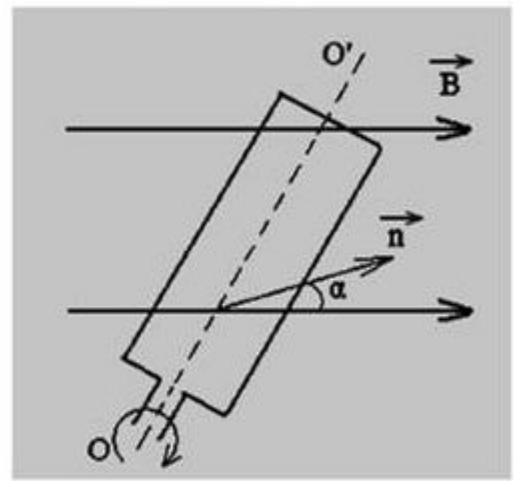


Вынужденные электромагнитные колебания

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 Ф сквозь плоскость рамки:

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

α – угол между нормалью $\vec{n}$ к плоскости рамки и напряжением 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.

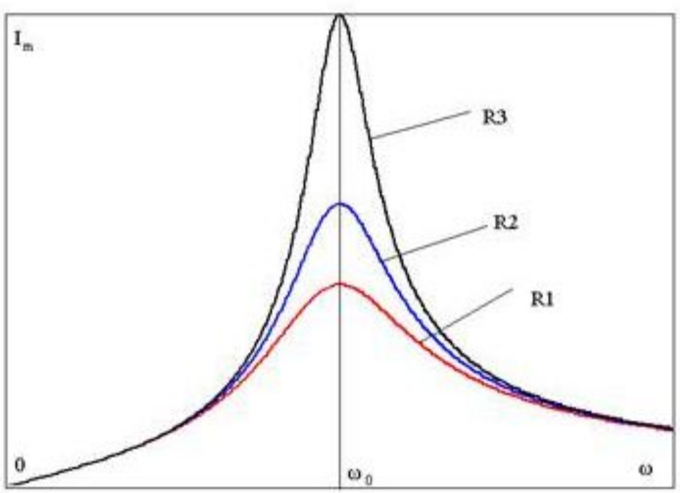
Если Um = const , то амплитуда вынужденных колебаний силы тока зависит от ω *:*

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

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

ω_0 – *собственная частота колебаний*

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



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

$$I_m = \frac{U_m}{|X|} = U_m \left|\omega C - \frac{1}{\omega L}\right| = |I_{mC} - I_{mL}|$$

I_{mC} и I_{mL} – *амплитудные значения силы токов*

U_m – *амплитудное значение приложенного U*

$$\text{Если } \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow I_{mC} = I_{mL},\ I_m = 0,\ R \to \infty$$

Условие резонанса токов:

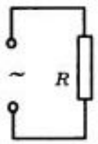
$$\omega \to \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

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 действующими значениями и амплитудными: $I = \frac{I_м}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_м}{\sqrt{2}}$.

АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



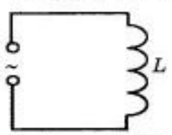
$I_м = \frac{U_м}{R}$, $I = \frac{U}{R}$

Колебания напряжения и силы тока совпадают по фазе.

Если $u = U_м \cos\omega t$, то $i = I_м \cos\omega t$.

Мощность переменного тока (средняя за период), выделяющаяся на активном сопротивлении, $P = \frac{1}{2} I_м U_м = IU = I^2 R$.

ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



$I_м = \frac{U_м}{X_L}$, $I = \frac{U}{X_L}$.

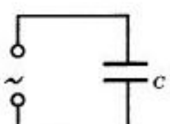
Колебания напряжения опережают по фазе колебания силы тока на четверть периода.

Если $i = I_м \cos\omega t$, то

$u = U_м \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = -U_м \sin\omega t$.

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

ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



$I_м = \frac{U_м}{X_C}$, $I = \frac{U}{X_C}$.

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

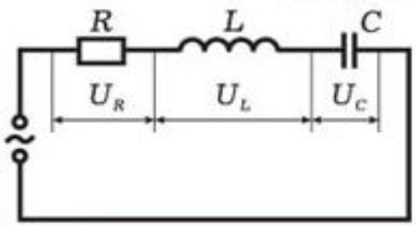
Если $i = I_м \cos\omega t$, то

$u = U_м \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = U_м \sin\omega t$.

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

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

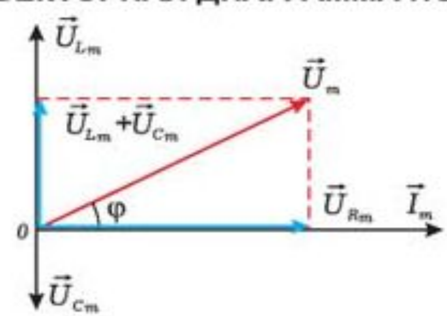


$$i = I_m \cos\omega t$$

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

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

ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ



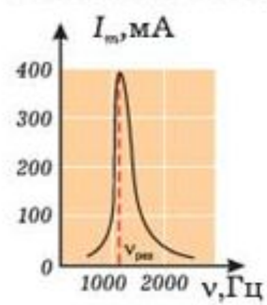
$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}$$

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

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

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

РЕЗОНАНС В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



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

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

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