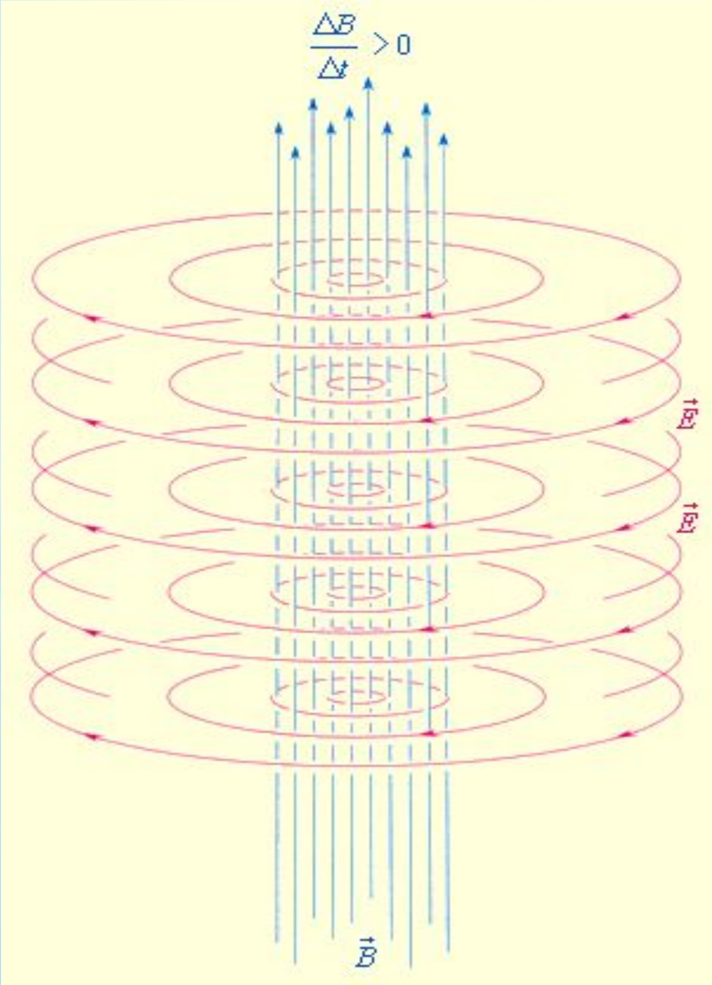
* Электромагнитные колебания и волны

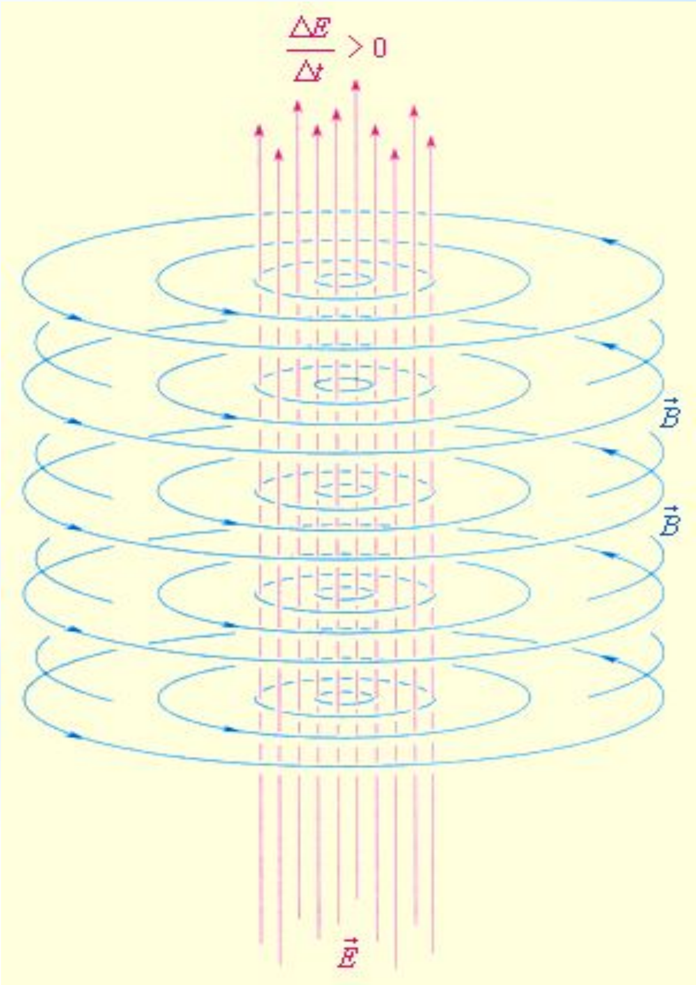
Уравнения Максвелла

Ток смещения

Изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты, - это явление электро-магнитной индукции



Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле – это ток смещения



Уравнения Максвелла

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$$

Поток электрической индукции через замкнутую поверхность S пропорционален величине свободного заряда, находящегося в объёме V , который окружает поверхность S

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

Поток магнитной индукции через замкнутую поверхность S равен нулю (магнитные заряды не существуют)

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

* **Изменение потока магнитной индукции, проходящего через незамкнутую поверхность S , взятое с обратным знаком, пропорционально циркуляции электрического поля на замкнутом контуре ▫ , который является границей поверхности S**

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$$

Полный электрический ток свободных зарядов и ток смещения через незамкнутую поверхность S , пропорциональны циркуляции магнитного поля на замкнутом контуре ▫, который является границей поверхности S

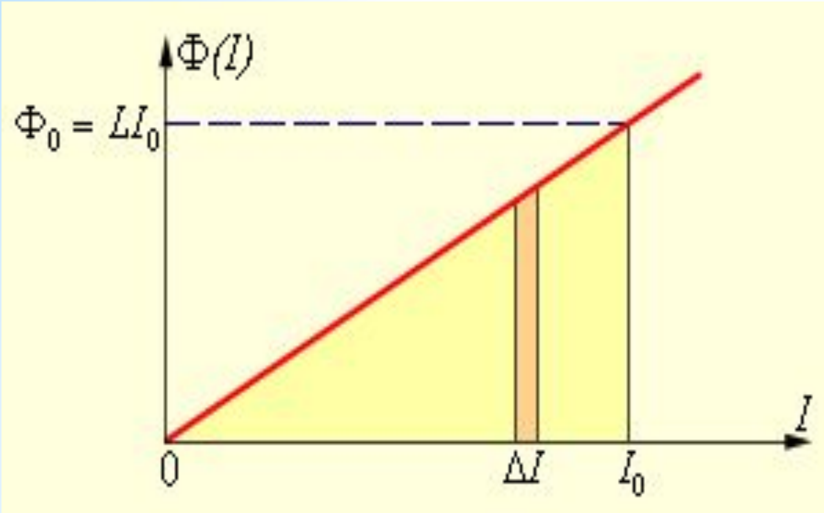
$$Q = \int_v \rho \, dv$$

Электрический заряд, заключённый в объёме V, ограниченном поверхностью S (в единицах СИ — Кл)

$$I = \int_s \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s}$$

Электрический ток, проходящий через поверхность S (в единицах СИ — А)

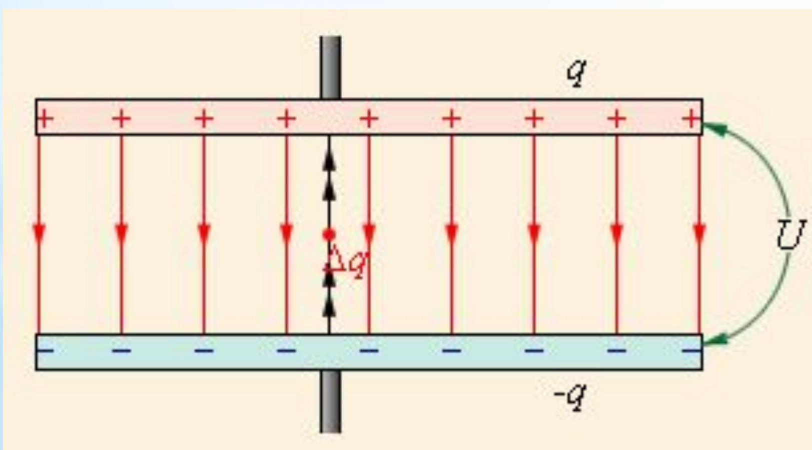
Энергия магнитного поля



$$W_{\text{м}} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

$$w_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\,\mu_0\,\mu},$$

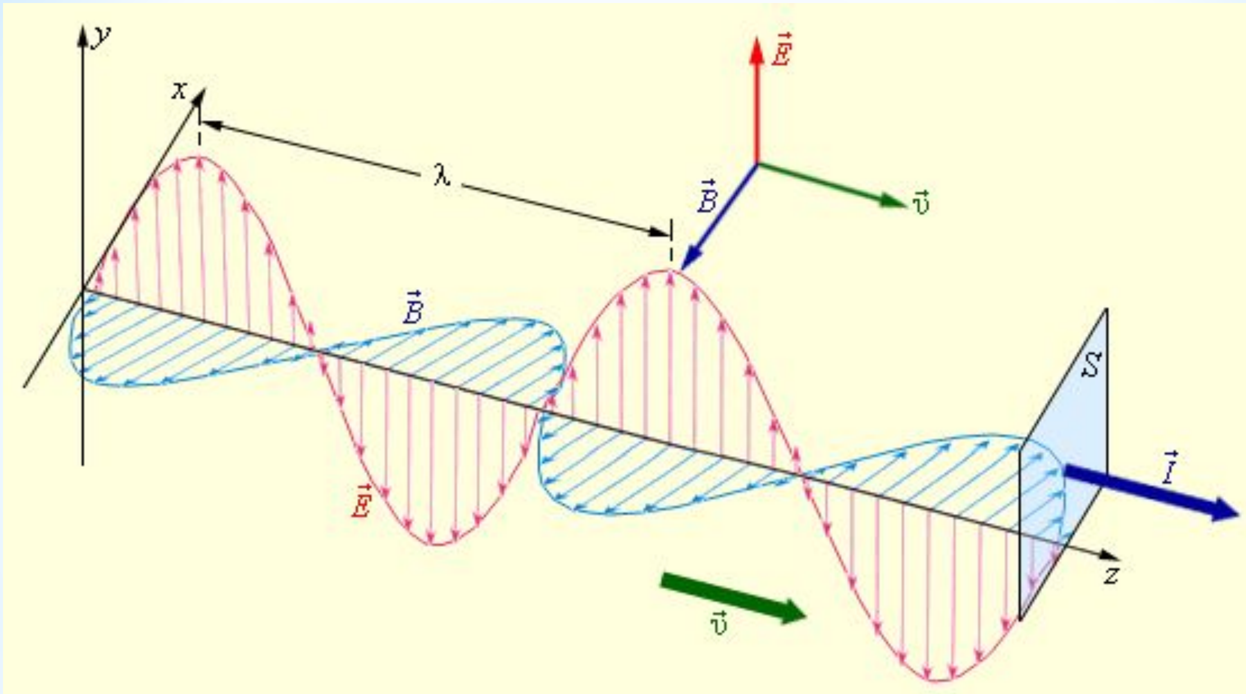
Энергия электрического поля



$$W_{\text{e}} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}.$$

$$w_{\text{e}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2},$$

Электромагнитные волны – поперечные и распространяются с конечной скоростью ***c***, они переносят энергию и импульс



$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}.$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} = 2{,}99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c}E.$$

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

Шкала электромагнитных волн

Колебательный контур

* **Электромагнитные колебания** — это колебания электрического и магнитного полей, которые сопровождаются периодическим изменением заряда, силы тока и напряжения. Простейшей системой, где могут возникнуть и существовать свободные электромагнитные колебания, является колебательный контур

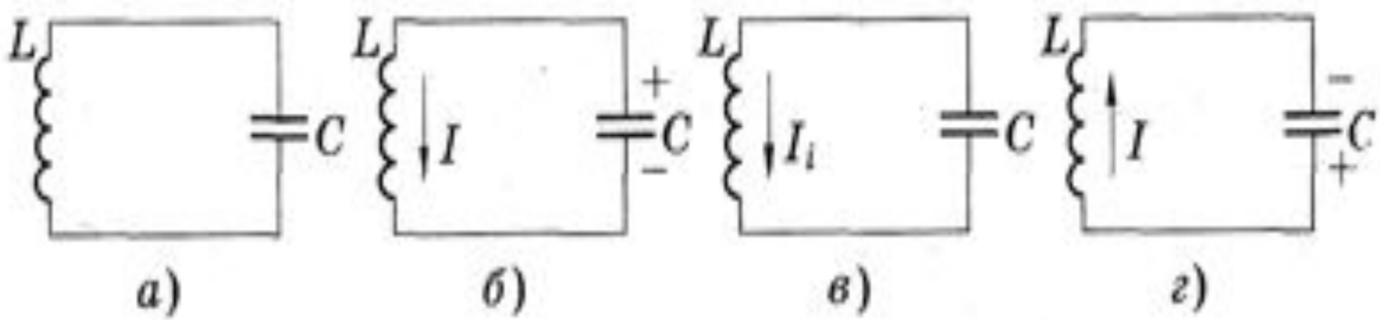
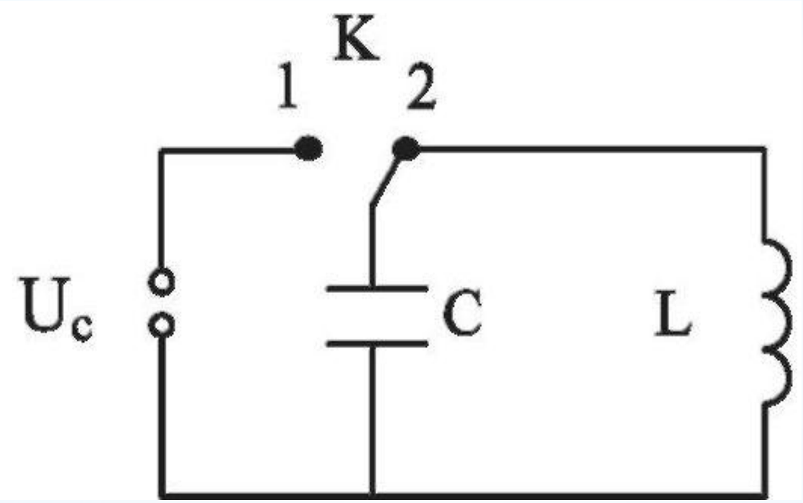


Рис. 29



* **$-L\,di/dt = q/C$**

i- сила тока в катушке, q-заряд конденсатора

$-L\,d^2q/dt^2 = q/C$

$d^2q/dt^2 + \omega_0{}^2 q = 0$

$\omega_0 = \sqrt{1/(LC)}$

*Решением этого уравнения является функция

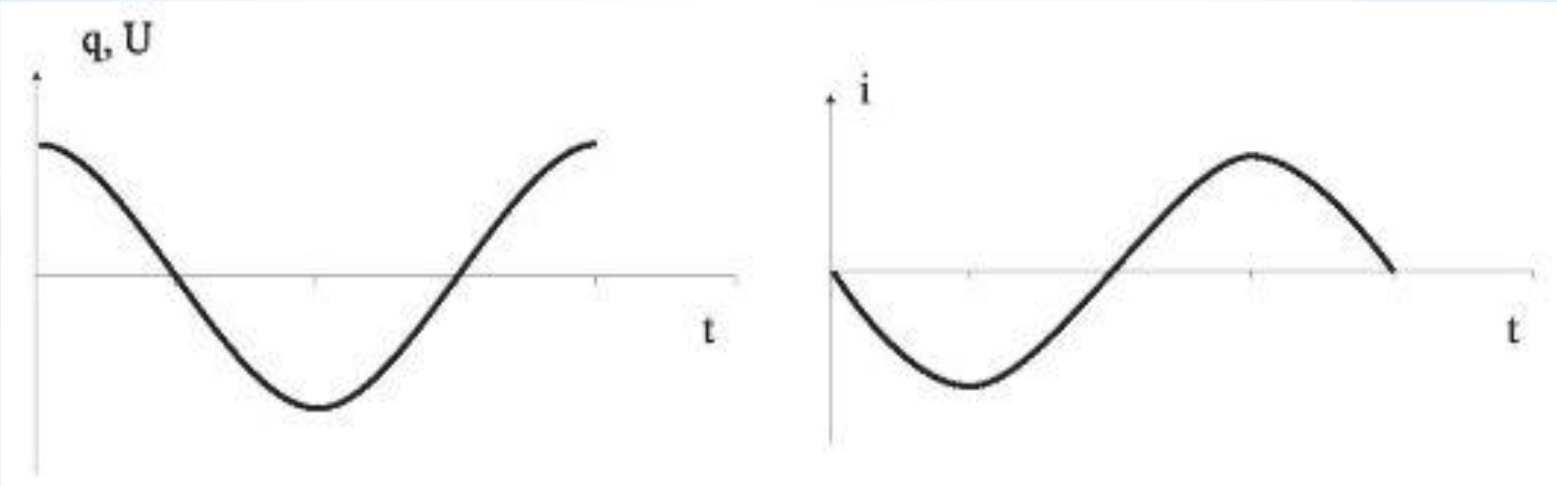
$q = q_{max} \cos(\omega_0 t)$

q_{max}- амплитудное значение заряда

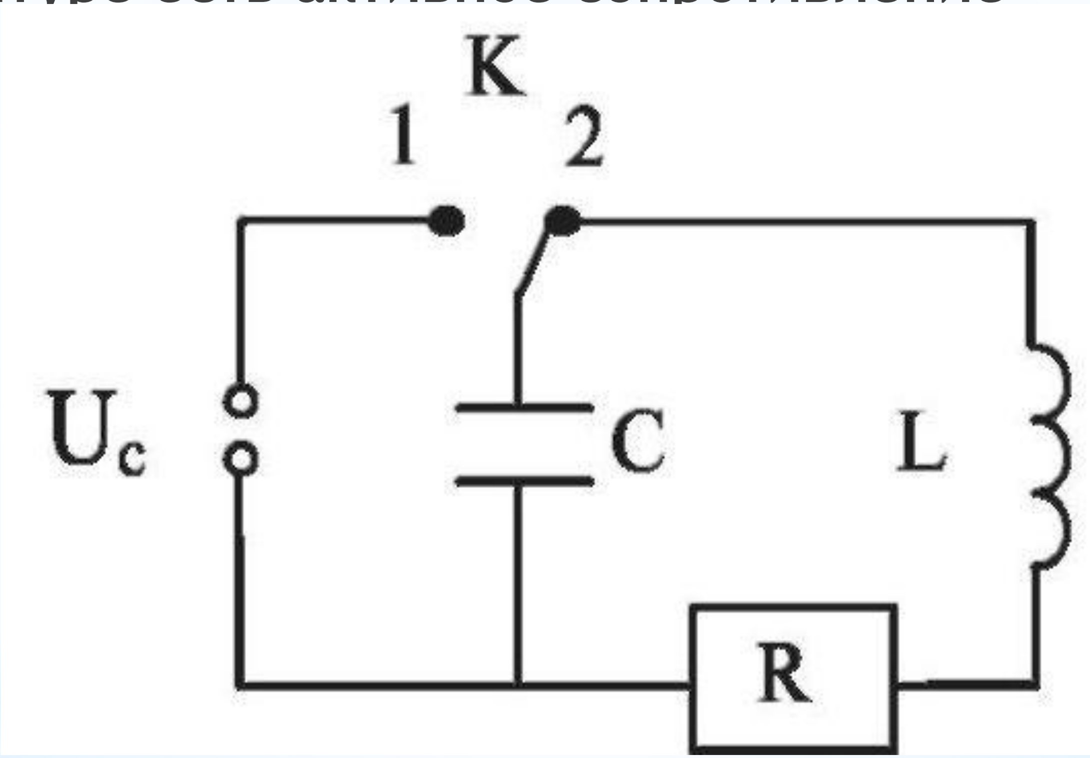
ω_0- собственная частота колебаний

Период колебаний определяется формулой Томсона $T = 2\pi/\omega_0 = 2\pi/\sqrt{1/(LC)}$

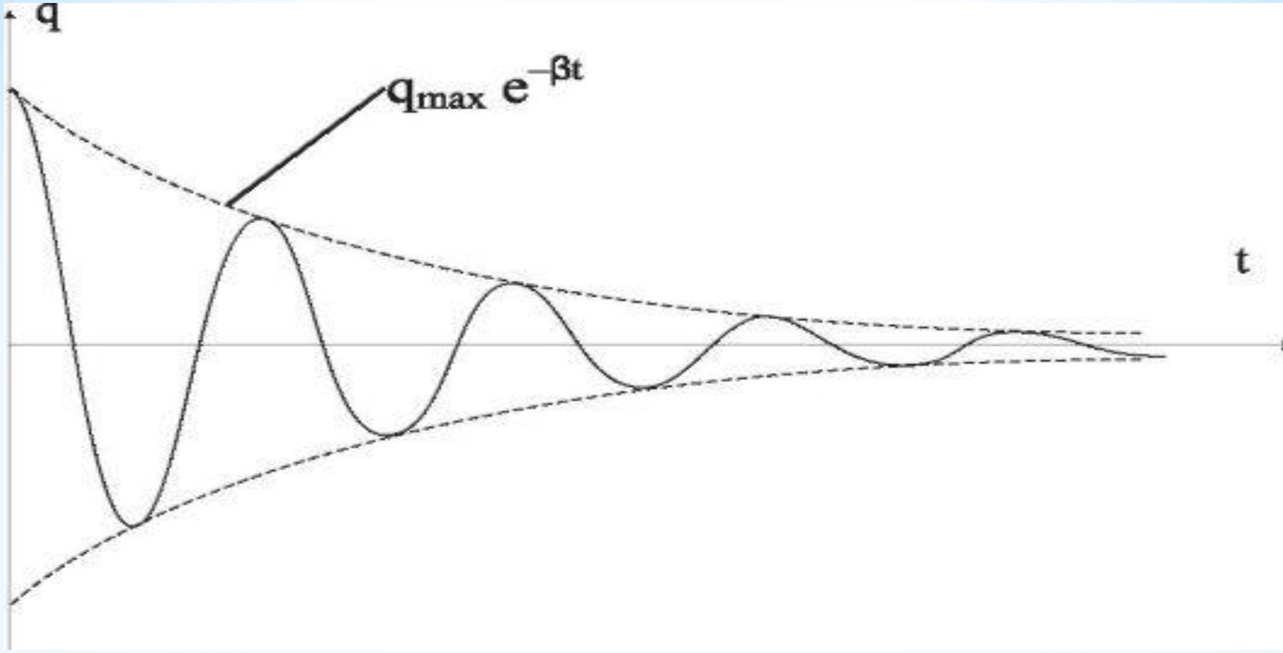
По гармоническому закону изменяется также сила тока и напряжение



* Затухающие колебания – в реальном контуре есть активное сопротивление



$$-L d^2q/dt^2 = iR + q/C$$

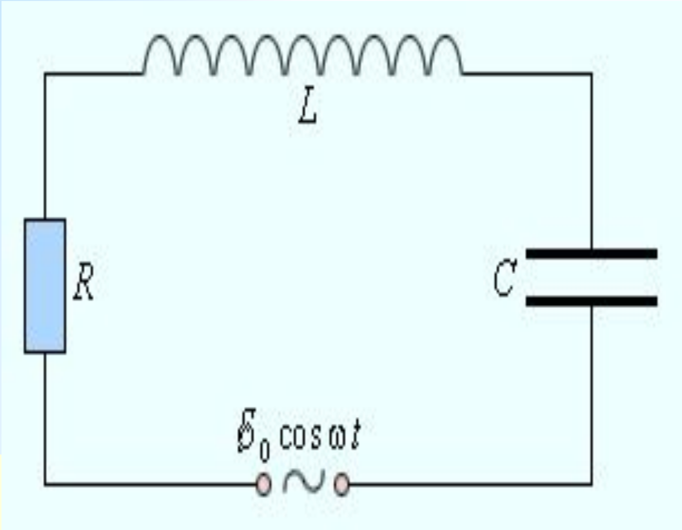


$2\beta = R/L$

$$Ld^2q/dt^2 + R\, dq/dt + q/C = 0$$

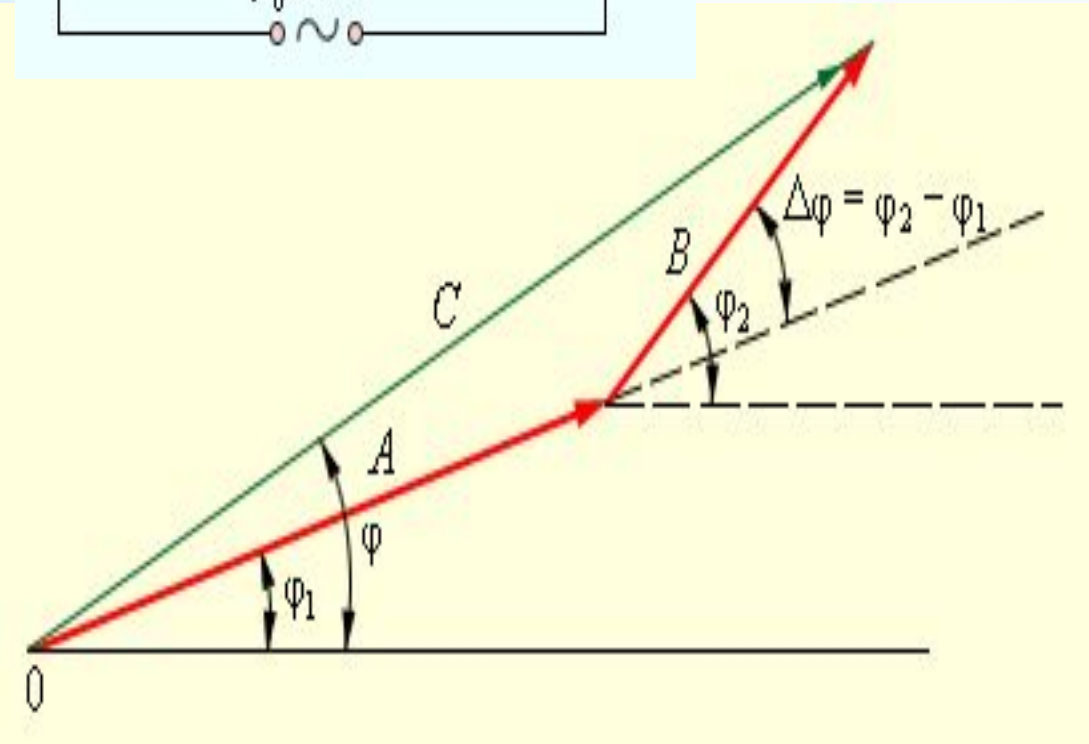
* **Характеристикой затухания является *логарифмический декремент затухания* $\theta = \beta T_з = 2\pi\beta/\omega_з$, где $T_з$ и $\omega_з$ - период и частота затухающих колебаний соответственно**

*Вынужденные электромагнитные колебания



$U_R + U_c + U_L = \varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos \omega t$

u_R (t), u_C (t) и u_L (t) – мгновенные значения напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке соответственно

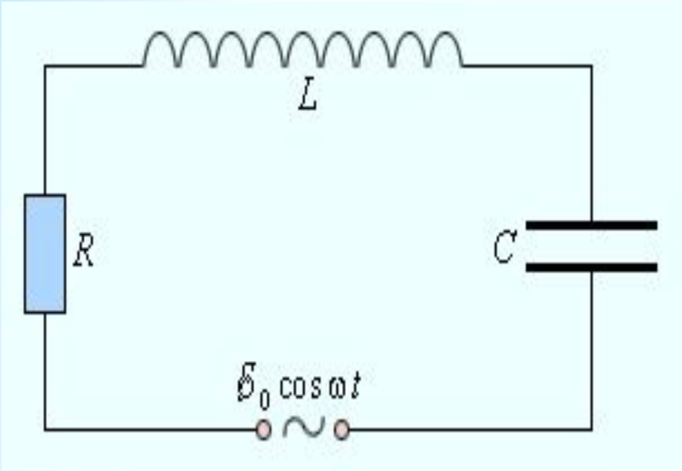


$\omega L I_L = U_L$

$R I_R = U_R.$

$$\frac{1}{\omega C} I_C = U_C.$$

Резонанс в контуре с последовательно соединенными элементами

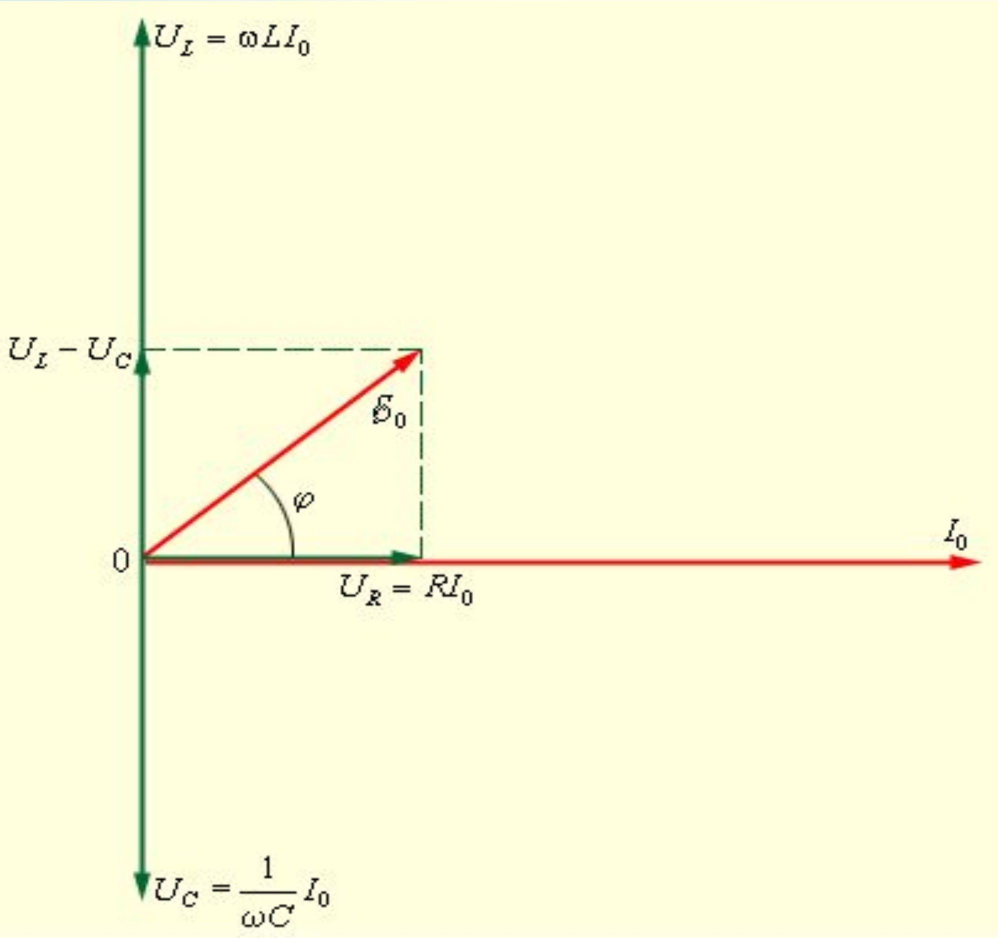


$$RI_R = U_R.$$

$$\frac{1}{\omega C} I_C = U_C.$$

$$\omega L I_L = U_L.$$

Векторная диаграмма для последовательного RLC-контура

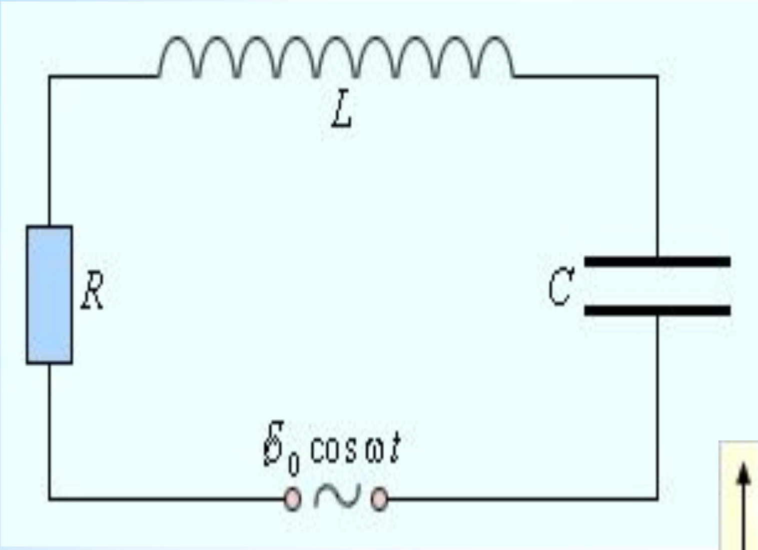


$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

$$\omega^2 = \omega_{\text{рез}}^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$Q = 2\pi \frac{\text{Запас энергии в колебательной системе}}{\text{Потеря энергии за 1 период}}.$$

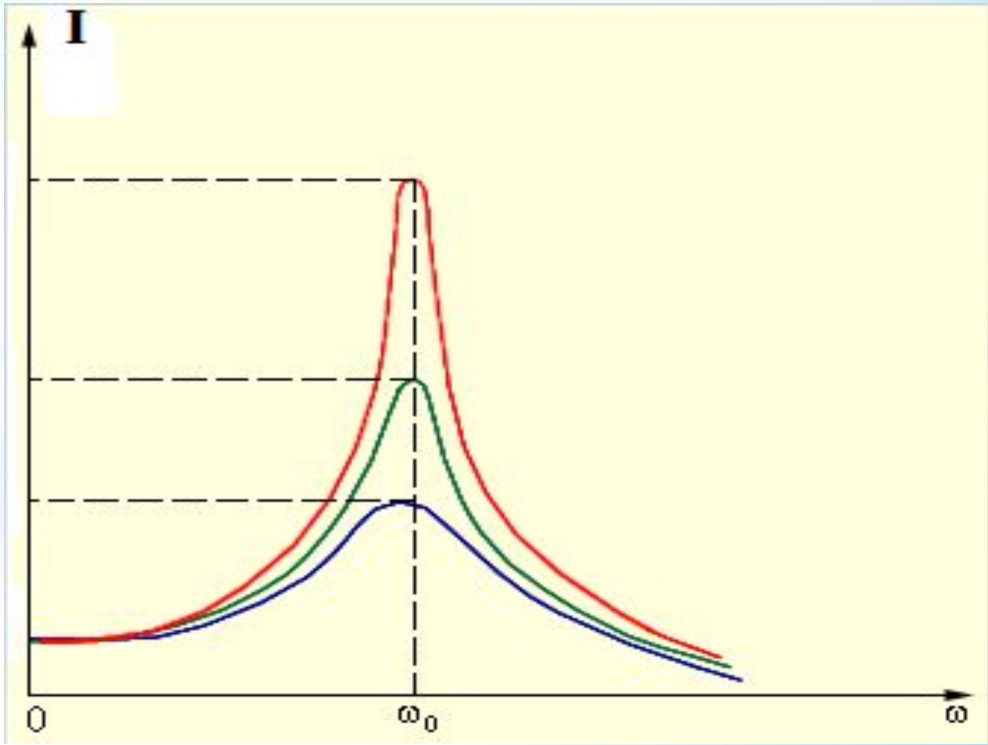
Резонанс в контуре с последовательно соединенными элементами

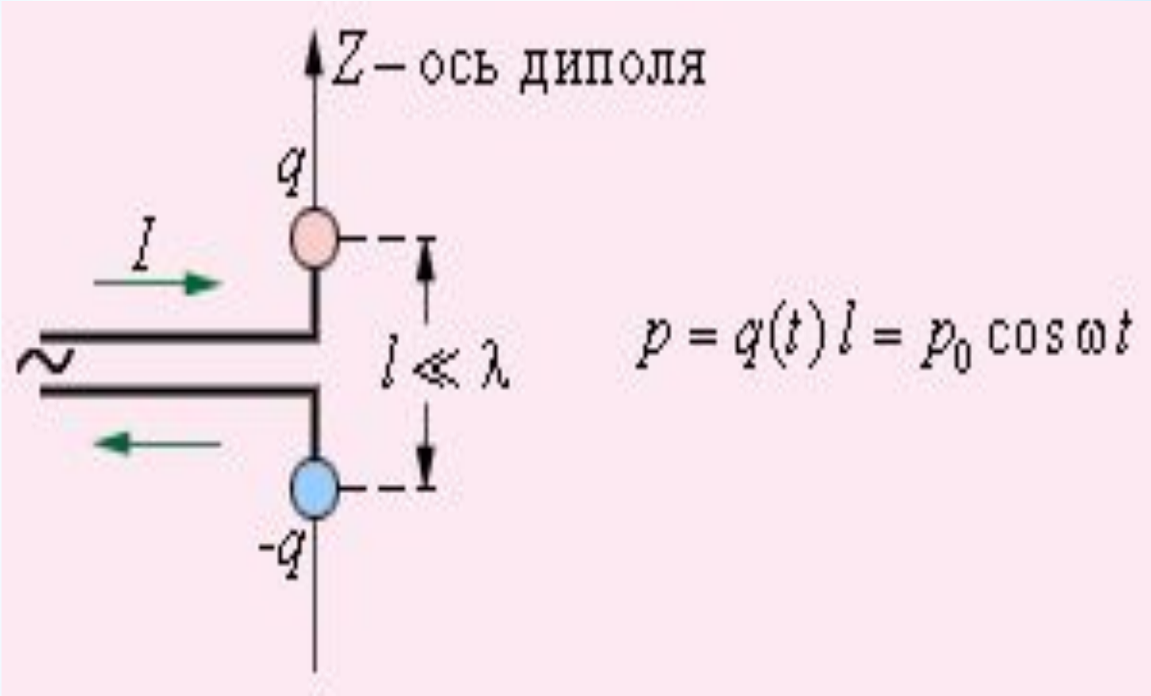


$$RI_R = U_R.$$

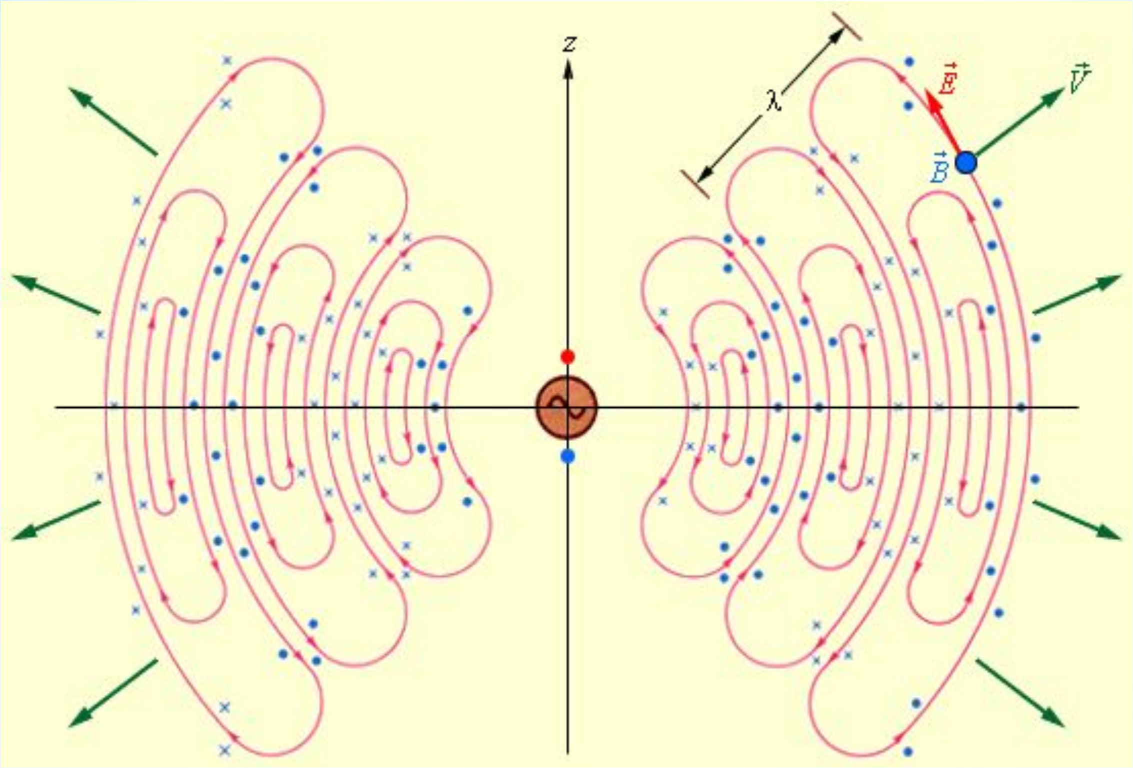
$$\frac{1}{\omega C} I_C = U_C.$$

$$\omega L I_L = U_L.$$





* Элементарный диполь, совершающий гармонические колебания



Структура электромагнитной волны, излучаемой диполем

* Волновое уравнение и уравнение бегущей волны
* $$\Delta\vec{E} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2};$$

$$\Delta\vec{H} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2},$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; v – фазовая скорость.

$$E_y = E_0\cos(\omega t - kx + \varphi);$$

$$H_z = H_0\cos(\omega t - kx + \varphi),$$