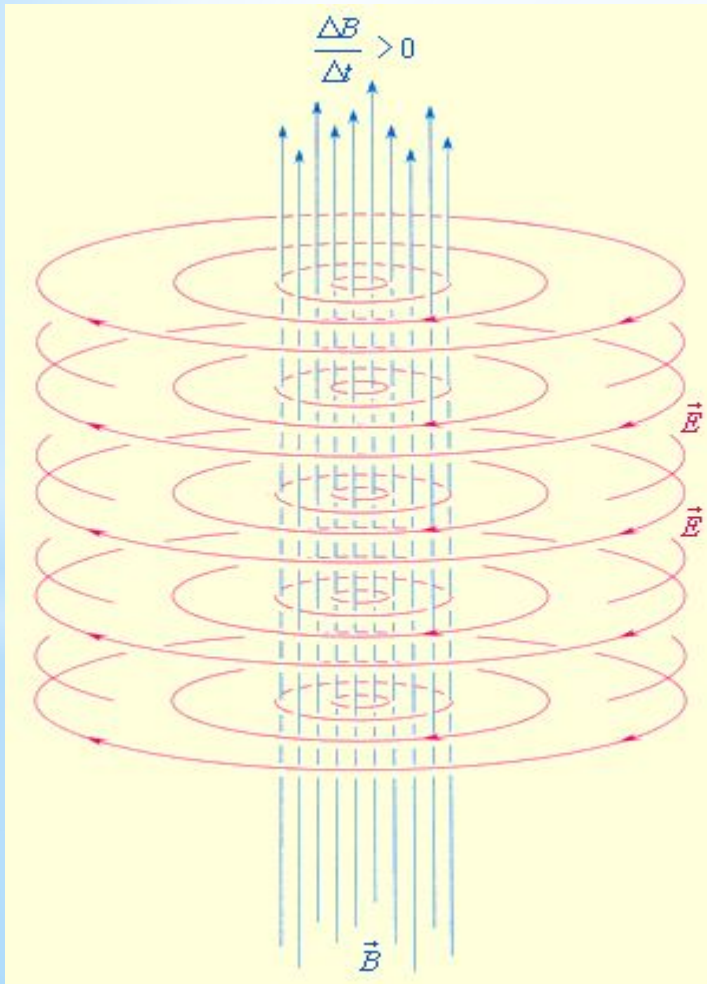


*** Электромагнитные колебания и волны**

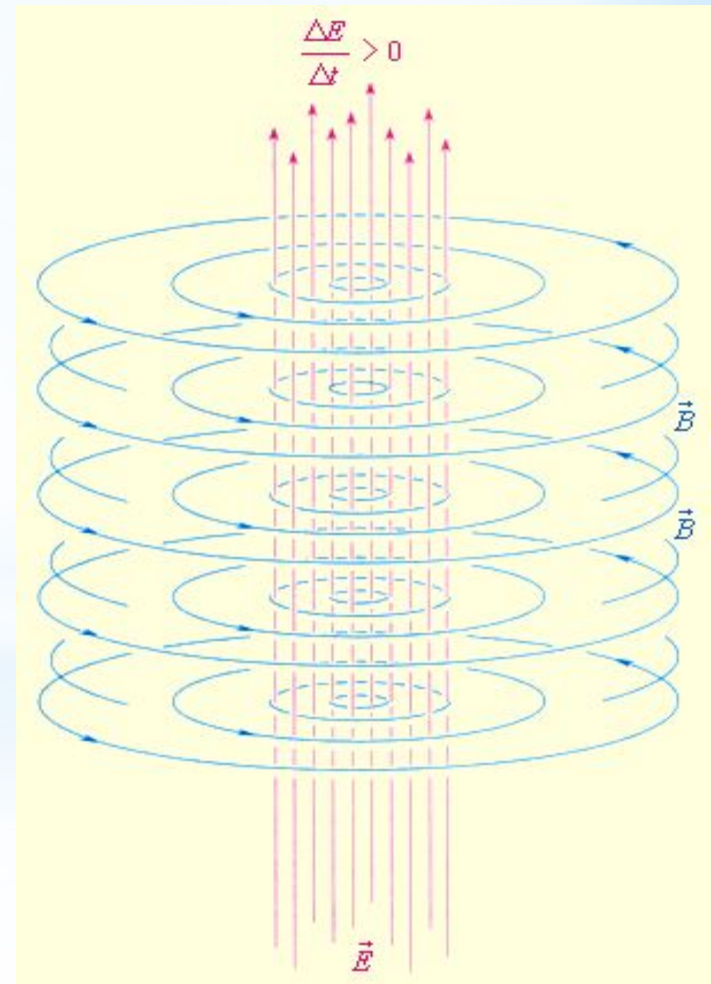
Уравнения Максвелла

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 $\square$, 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 $\square$, который является границей поверхности S

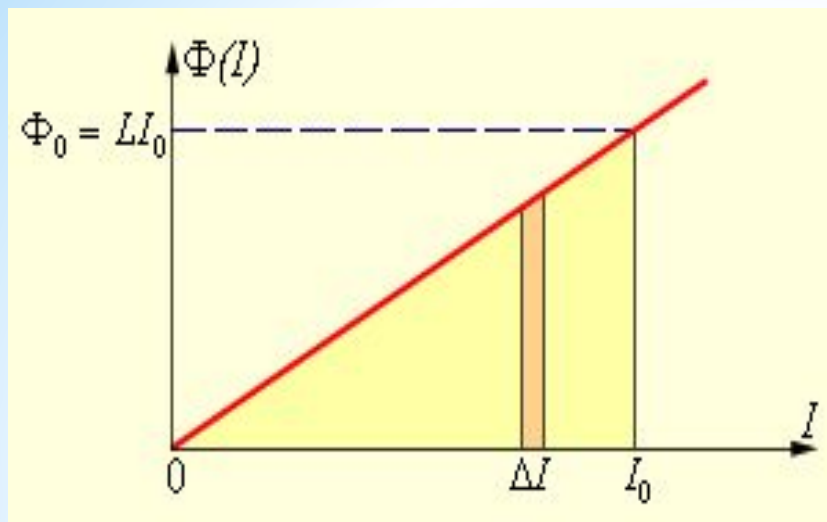
$$Q = \int_v \rho dv$$

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)

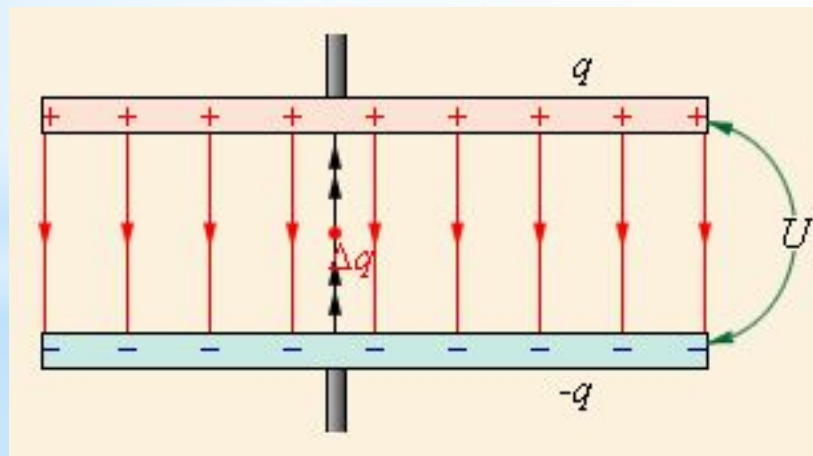
Энергия магнитного поля



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

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

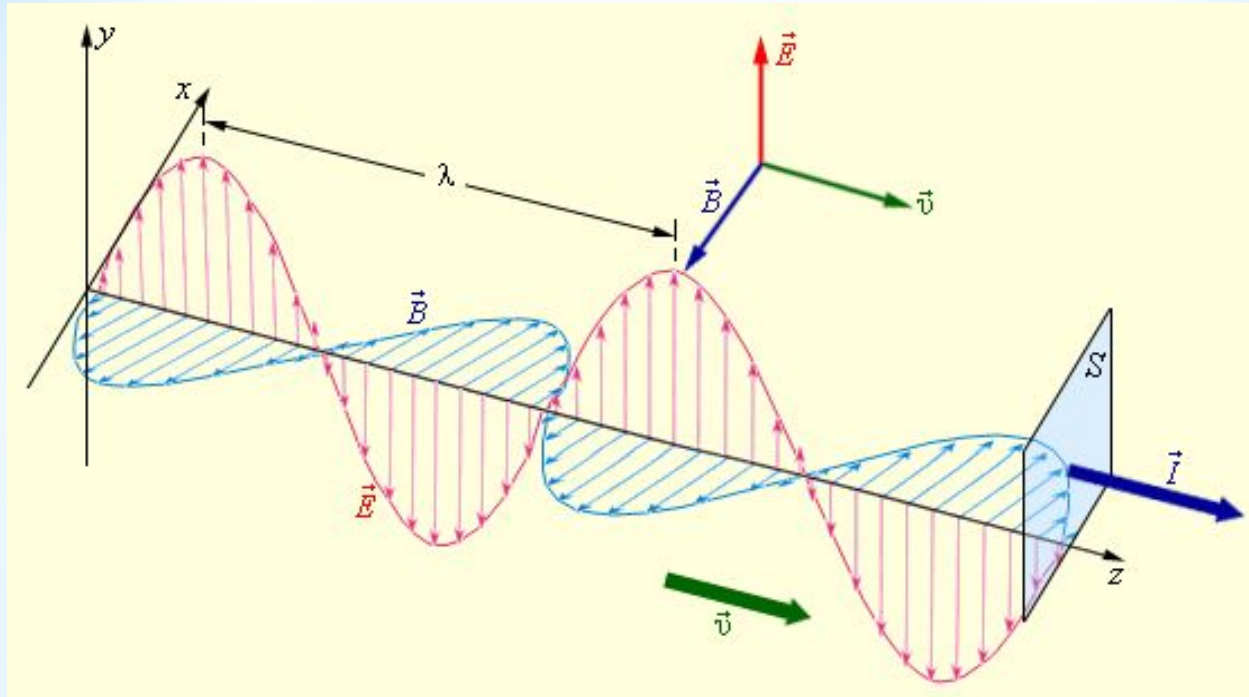
Энергия электрического поля



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

$$w_{\text{е}} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2}$$

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



$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

$$\frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

$$B = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{c} E$$

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}$$

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

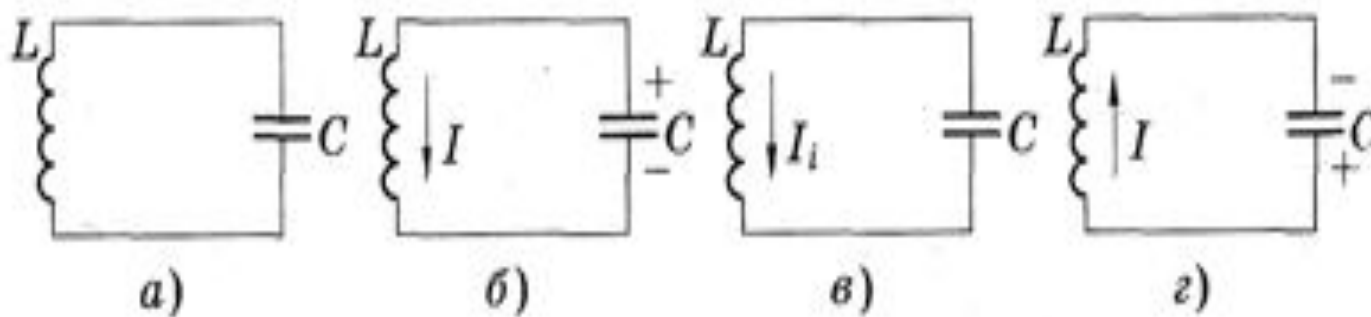
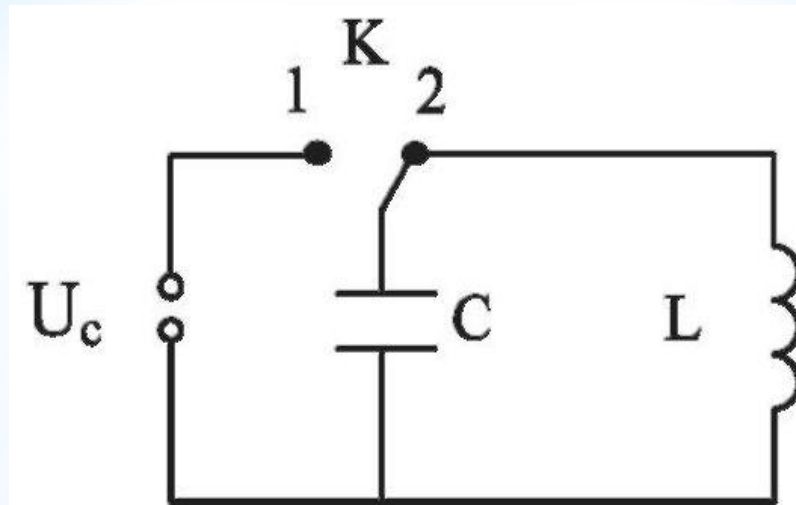


Рис. 29



$$* -L \frac{di}{dt} = q/C$$

**i - сила тока в катушке, q -заряд
конденсатора**

$$-L \frac{d^2 q}{dt^2} = q/C$$

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

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

* Решением этого уравнения является функция

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

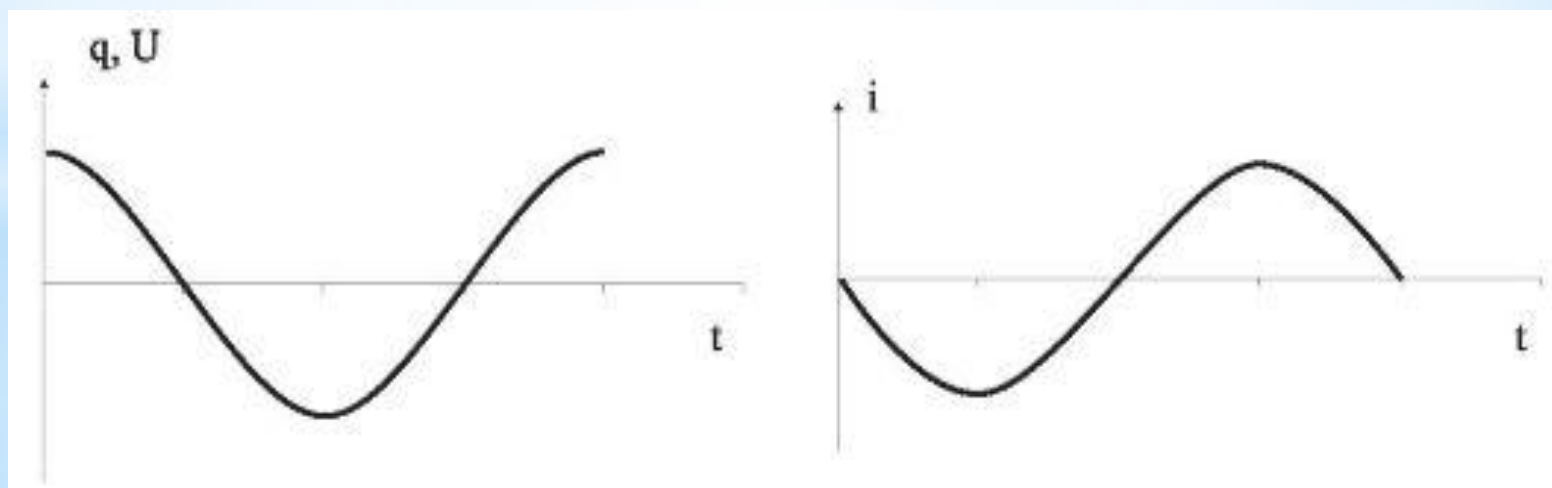
$q_{\max}$ - амплитудное значение заряда

ω_0 - собственная частота колебаний

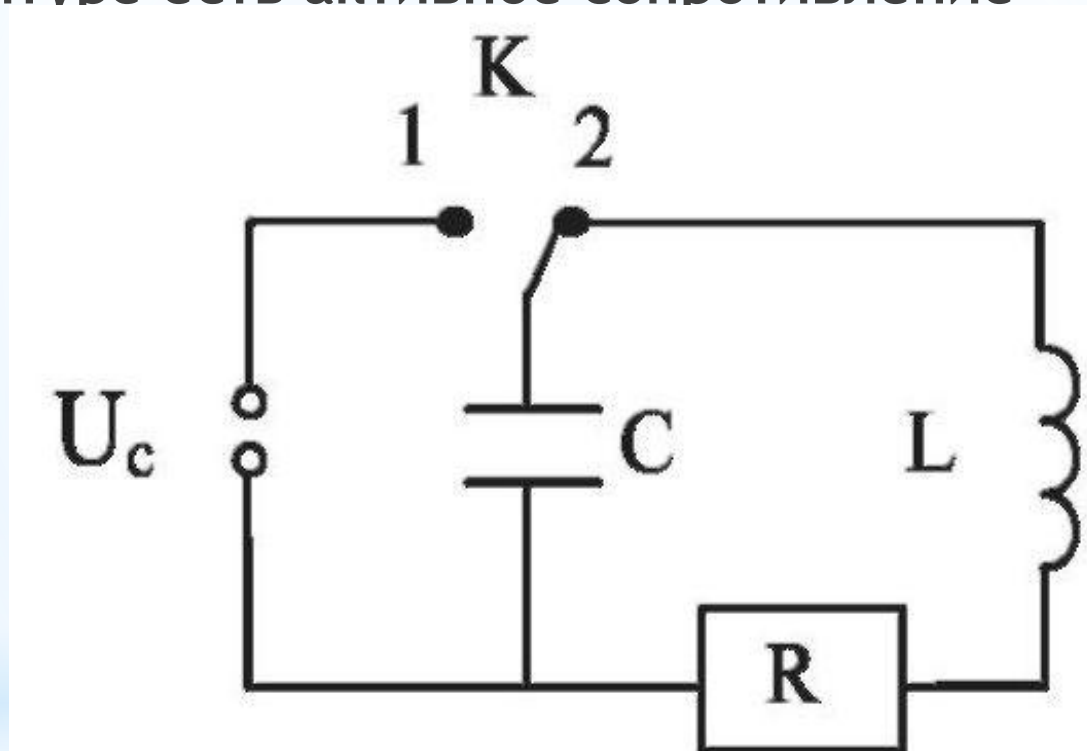
Период колебаний определяется формулой

$$\text{Томсона } T = 2\pi / \omega_0 = 2\pi / \sqrt{1/(LC)}$$

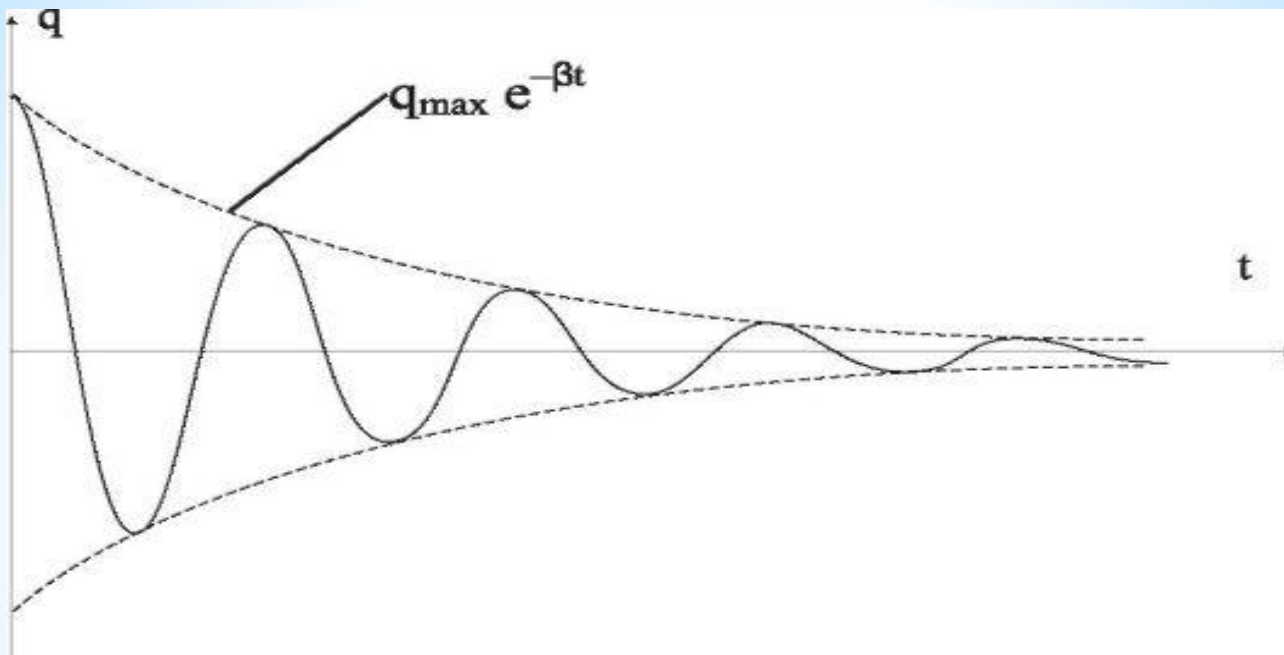
По гармоническому закону изменяется также сила тока и напряжение



*Затухающие колебания - в реальном контуре есть активное сопротивление



$$-Ld^2q/dt^2 = iR + q/C$$

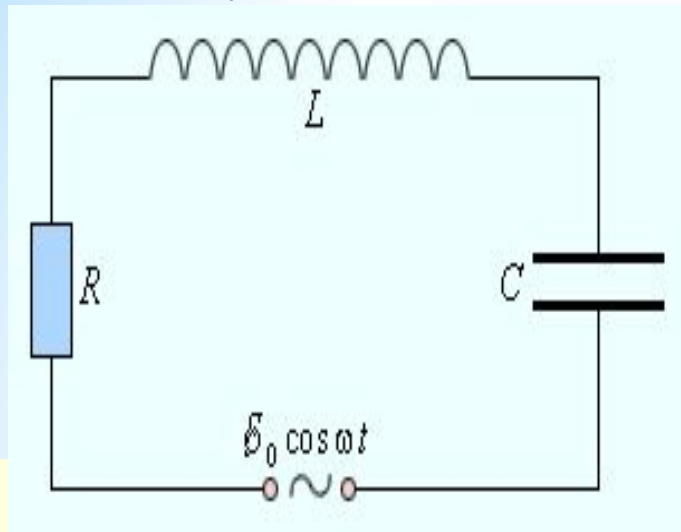


$$Ld^2q/dt^2 + R dq/dt + q/C = 0$$

$$2\beta = R/L$$

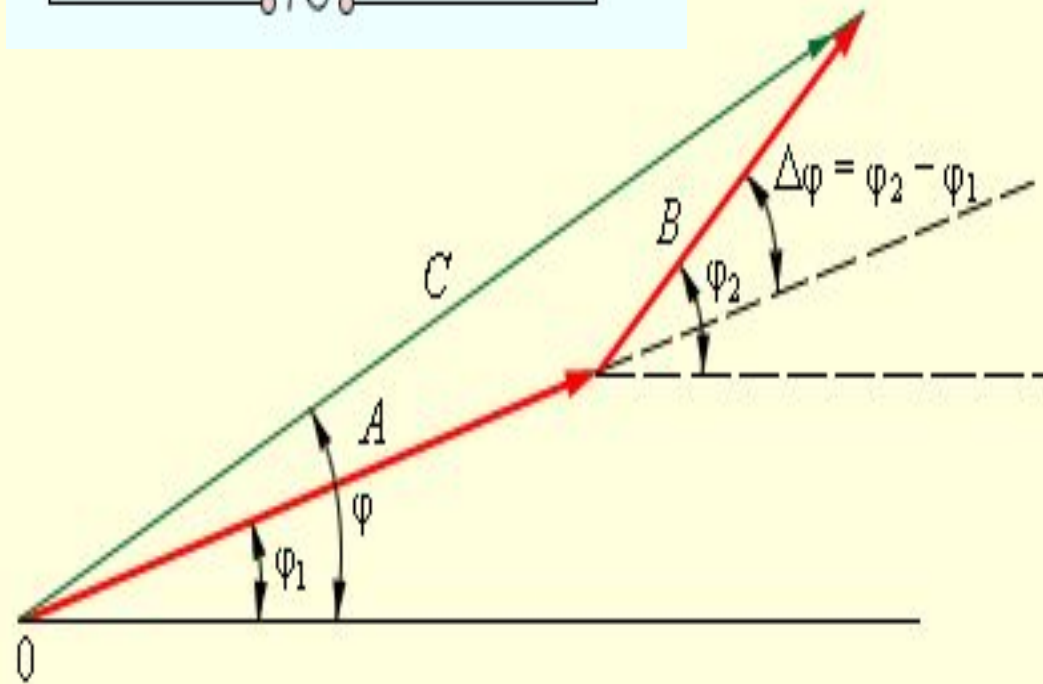
* Характеристикой затухания является *логарифмический декремент затухания*
 $\theta = \beta T_3 = 2\pi\beta/\omega_3$, где T_3 и ω_3 - период и частота затухающих колебаний соответственно

*Вынужденные электромагнитные колебания



$$U_R + U_C + U_L = \mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$$

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

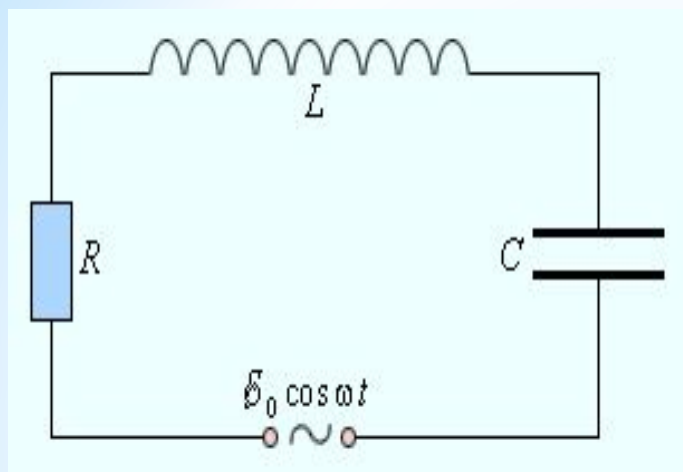


$$\omega L I_L = U_L$$

$$R I_R = U_R$$

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

Резонанс в контуре с последовательно соединенными элементами

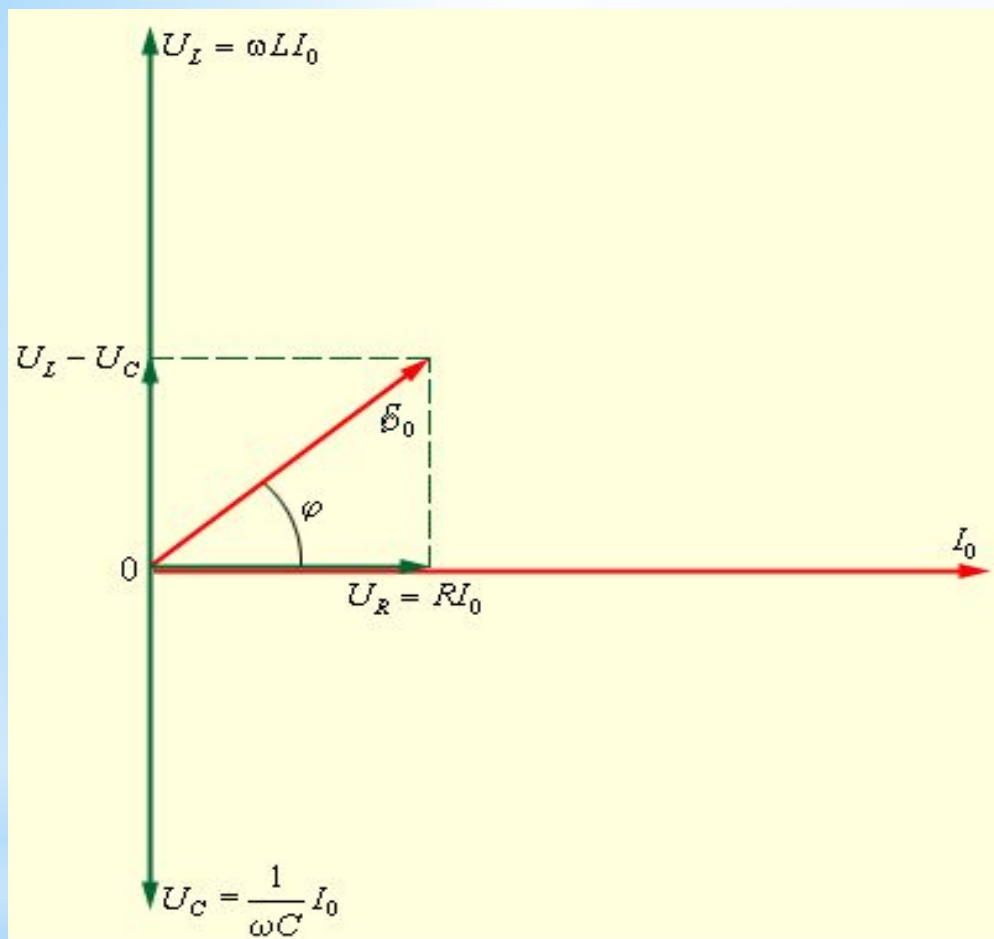


$$RI_R = U_R.$$

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

$$\omega L I_L = U_L.$$

Векторная диаграмма для последовательного RLC-контура

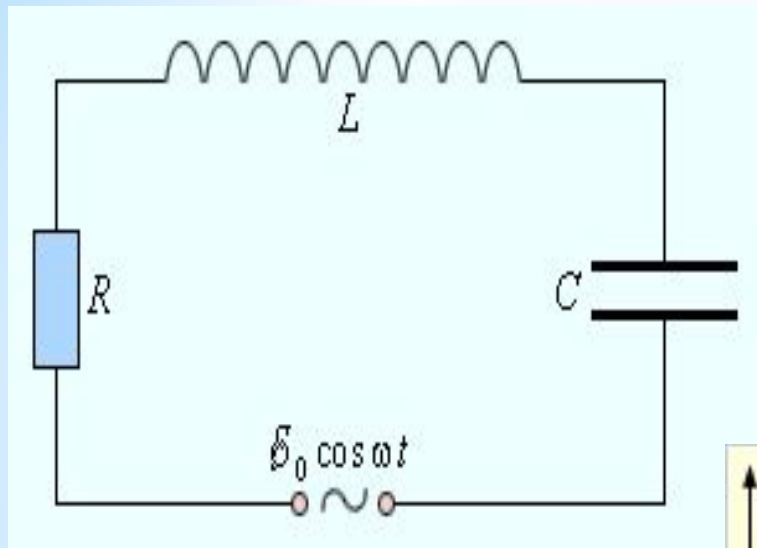


$$I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

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

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

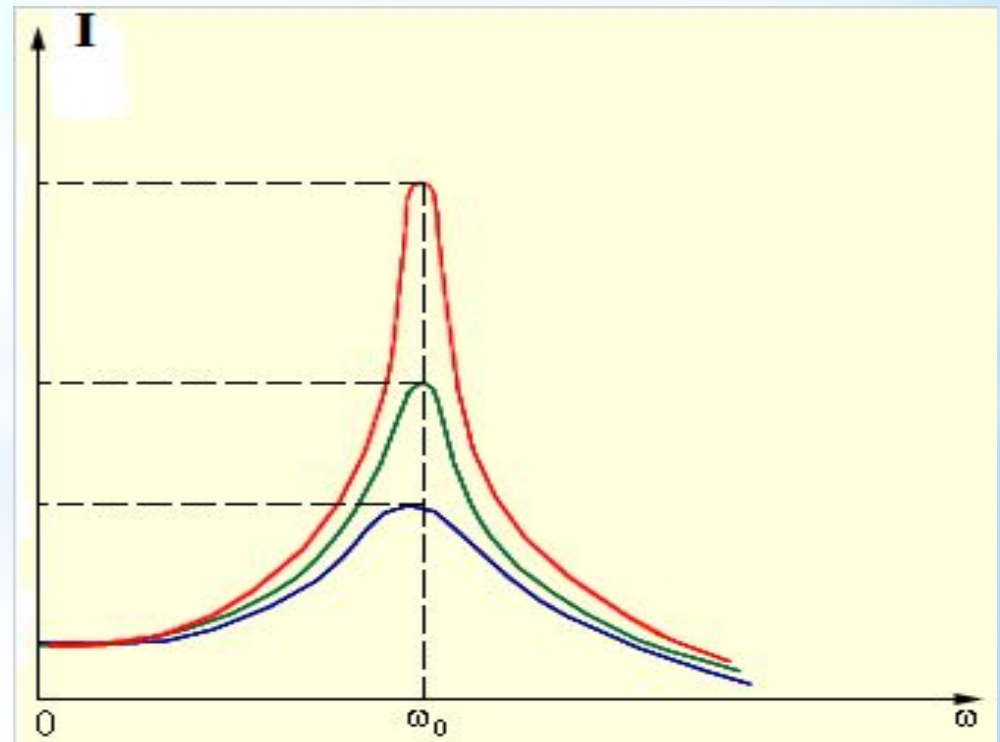
Резонанс в контуре с последовательно соединенными элементами

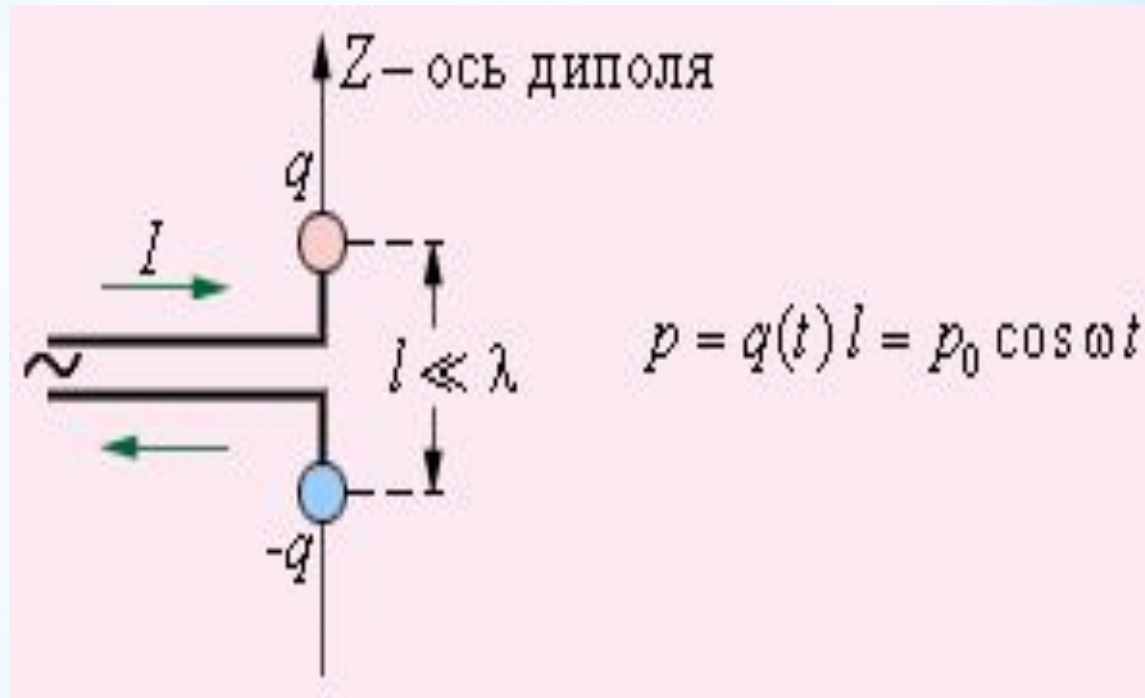


$$RI_R = U_R$$

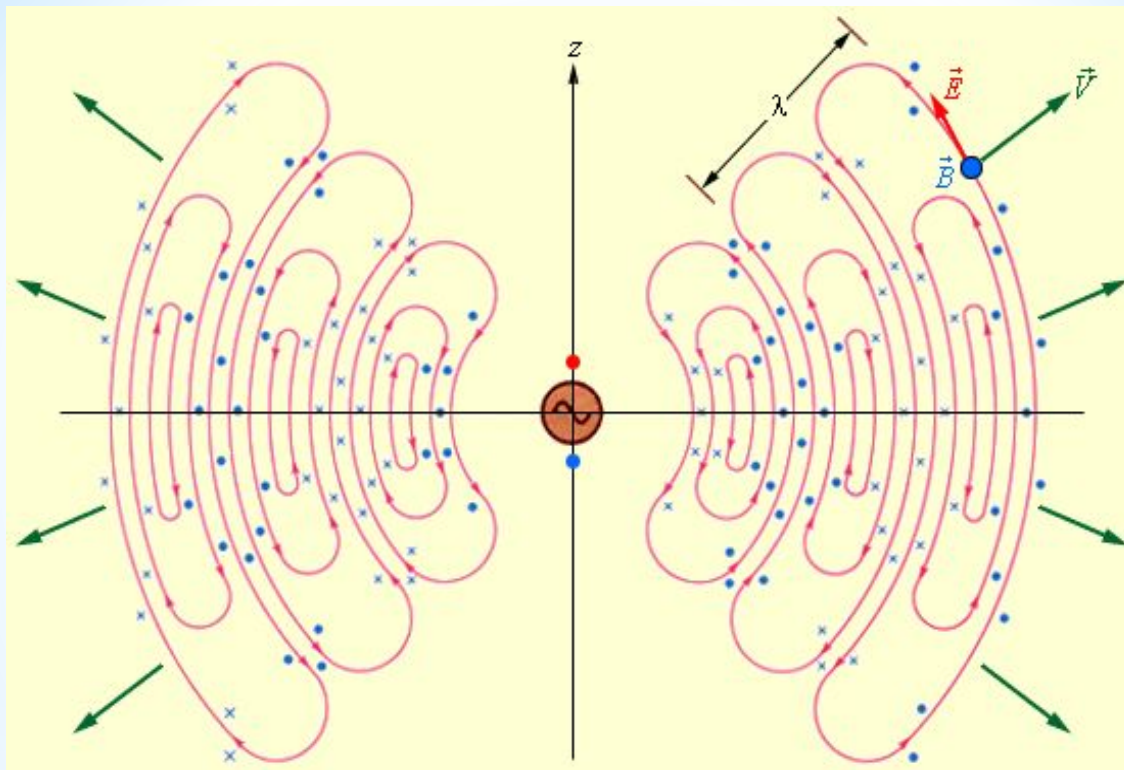
$$\frac{1}{\omega C} I_C = U_C$$

$$\omega L I_L = U_L$$





*** 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.

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

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