

ФИЗИКА

11 КЛАСС



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
КОЛЕБАНИЯ



Гипотеза Джеймса Клерка Максвелла



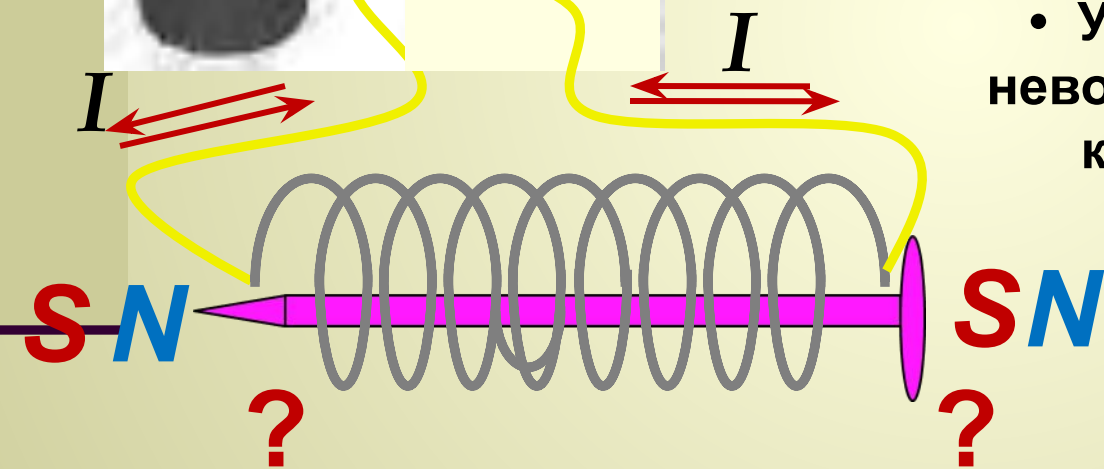
Существование электромагнитных полей было теоретически предсказано великим английским физиком Максвеллом в 1864 году.

Согласно теории **Максвелла**, переменные электрические и магнитные поля не могут существовать по отдельности: изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле порождает магнитное (таким образом получаем колебания электрического и магнитного полей, которые сопровождаются электромагнитными колебаниями)

ОТКРЫТИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ



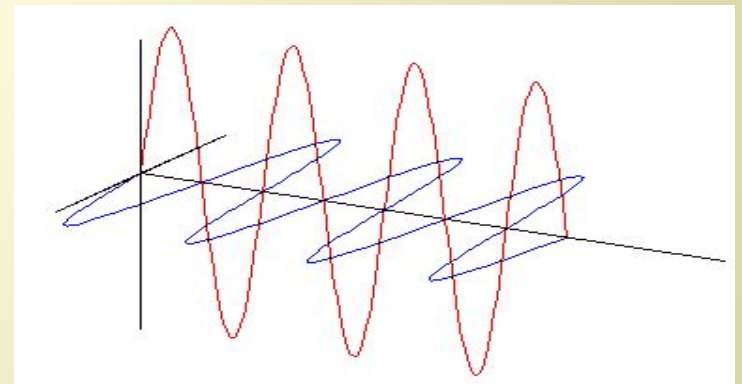
- Замыкали обкладки лейденской банки с помощью катушки
- Обнаруживали намагничивание стальной спицы, помещенной внутрь катушки
- Удивляло то, что заранее невозможно было предсказать, какой конец спицы будет северным полюсом, а какой - южным



- При разрядке конденсатора через катушку возникают колебания: конденсатор успевает многократно перезарядиться и ток меняет направление много раз

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются **электромагнитными колебаниями**

Эти колебания происходят с очень большой частотой, для их наблюдения и исследования используют электронный осциллограф

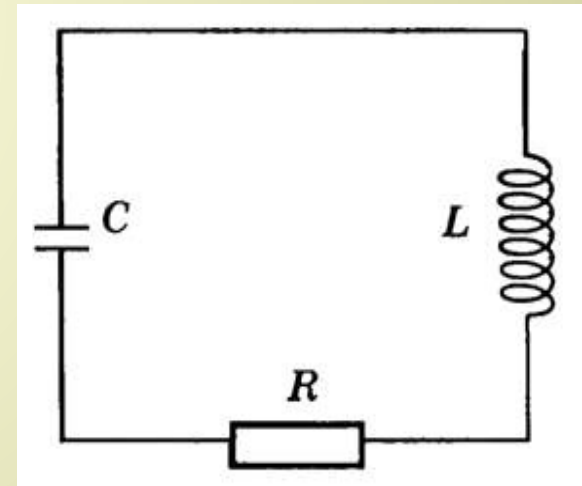


Колебательный контур

Простейшей системой, где могут возникнуть и существовать электромагнитные колебания, является **колебательный контур**.

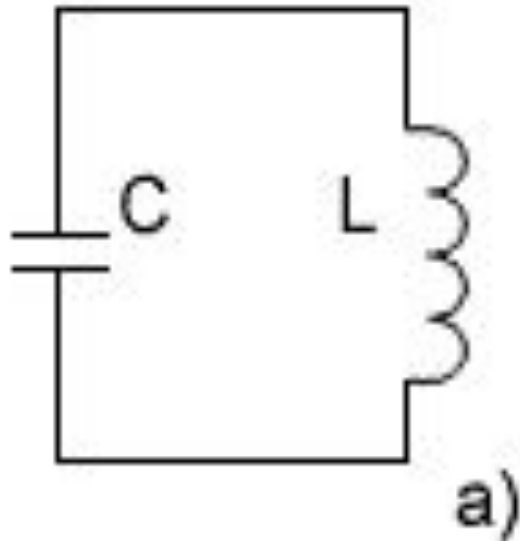
Колебательный контур — цепь, состоящая из включенных последовательно

- 1) катушки индуктивностью L ,
- 2) конденсатора емкостью C и
- 3) резистора сопротивлением R

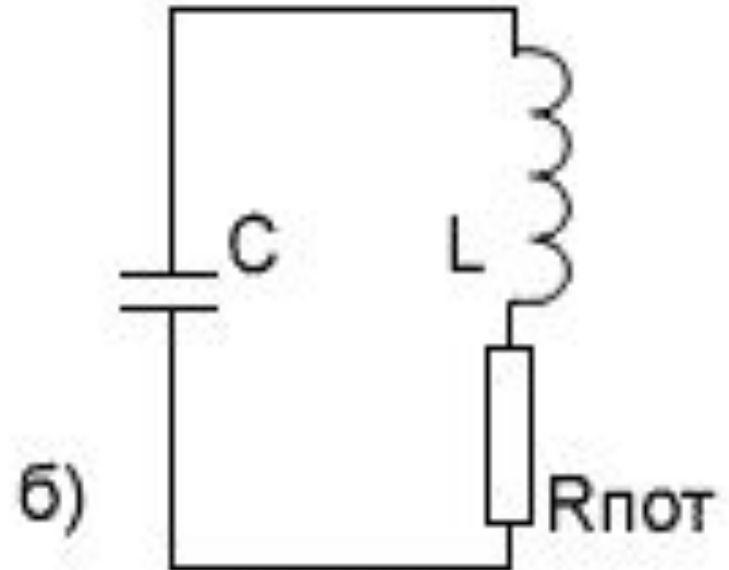


Идеальный контур Томсона

Идеальный контур Томсона — колебательный контур без активного сопротивления ($R = 0$).



идеальный
колебательный
контур

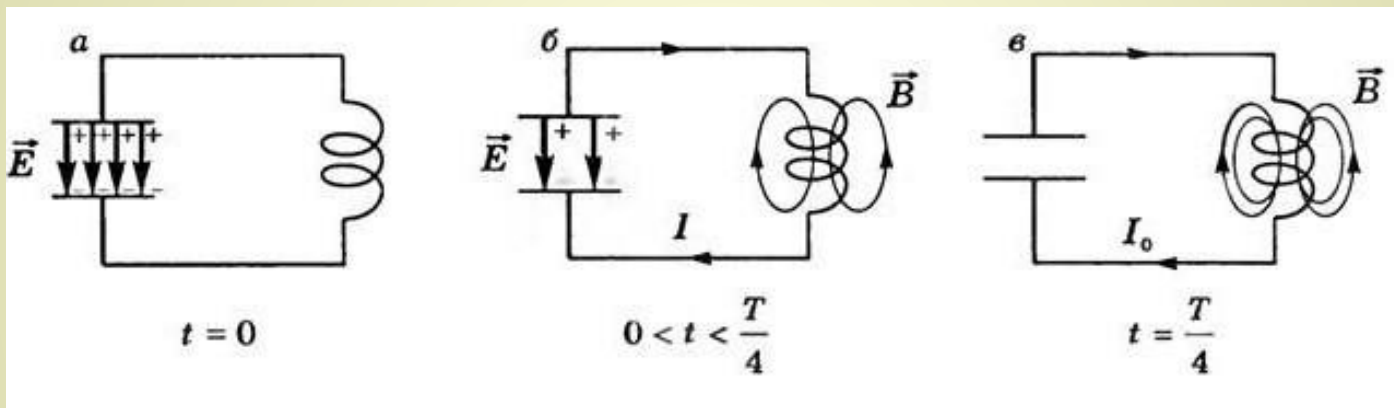


реальный
колебательный
контур

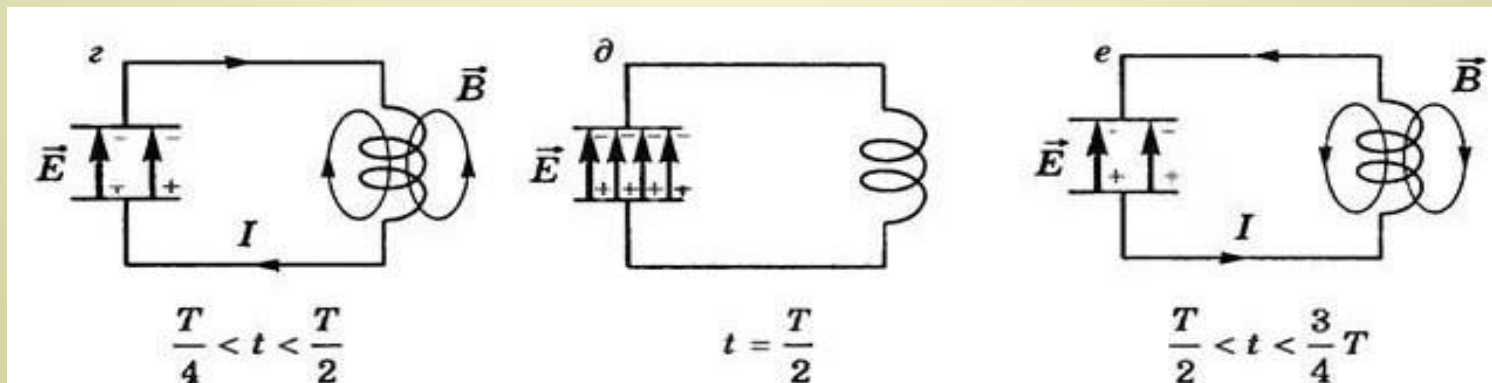
рис.6

Возникновение свободных э.м. колебаний

Если конденсатор зарядить и замкнуть на катушку, то по катушке потечет ток. Когда конденсатор разрядится, ток в цепи не прекратится из-за самоиндукции в катушке.

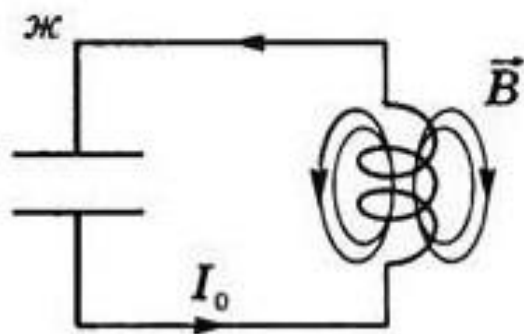


Индукционный ток, в соответствии с правилом Ленца, будет течь в ту же сторону и перезарядит конденсатор. (рис ∂)

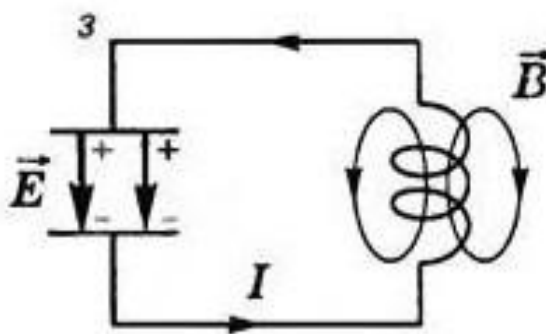


Возникновение свободных э/м колебаний

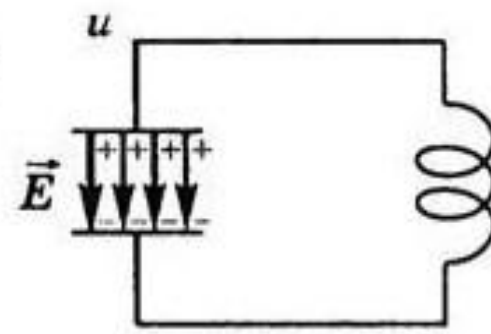
Ток в данном направлении прекратится, и процесс повторится в обратном направлении. Таким образом, в колебательном контуре будут происходить электромагнитные колебания.



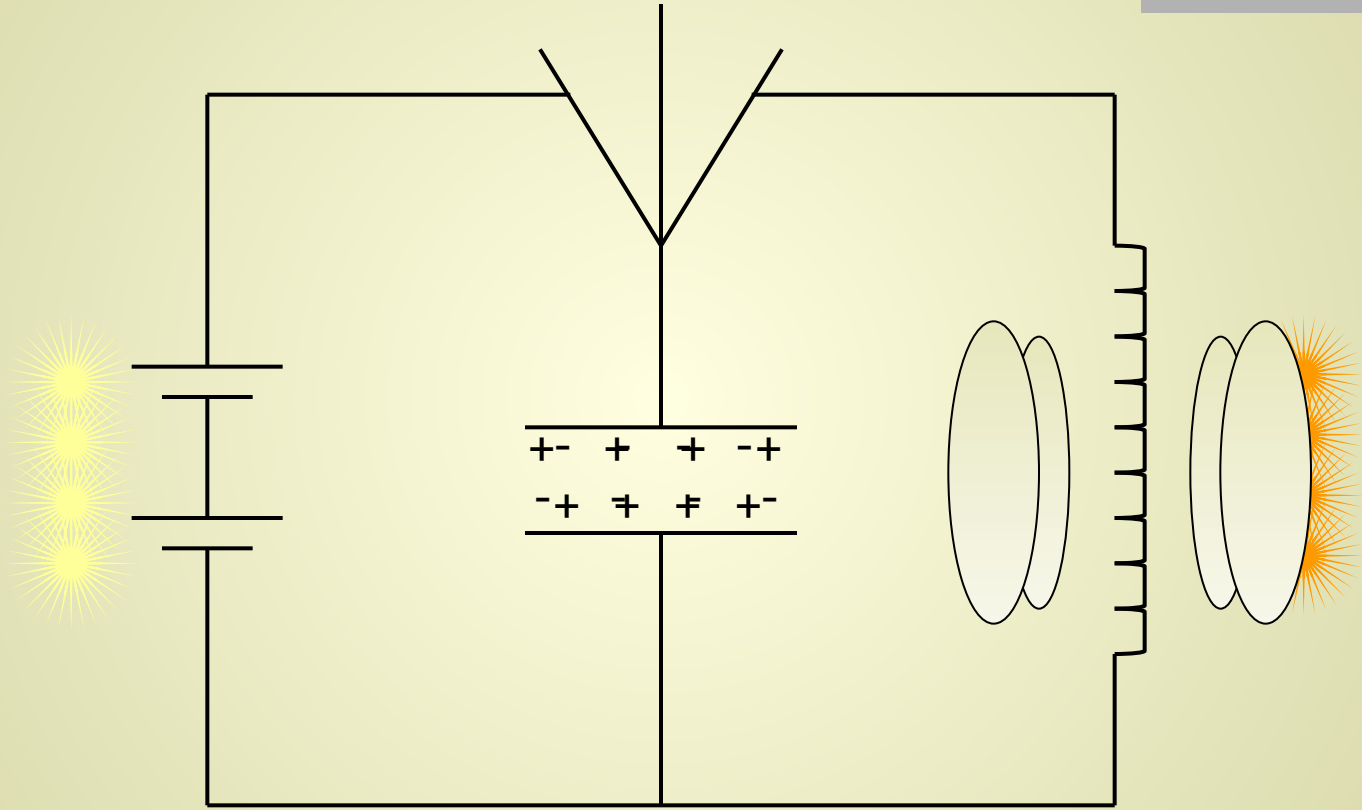
$$t = \frac{3}{4}T$$

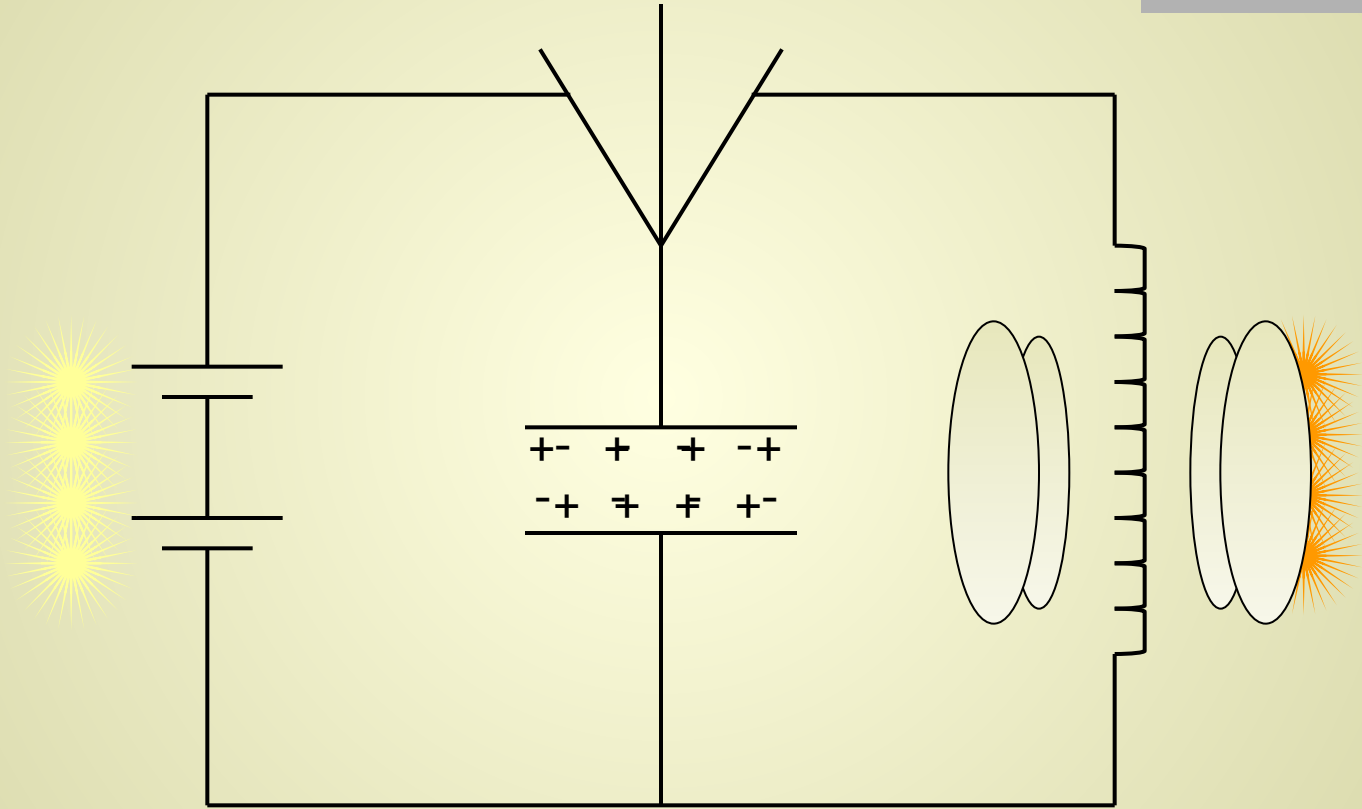


$$\frac{3}{4}T < t < T$$



$$t = T$$





Превращение энергии при э/м колебаний

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля $W_{\text{э}}$ уменьшается, так как уменьшается заряд на обкладках конденсатора, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока $W_{\text{м}}$.

Максимальная энергия электрического поля

$$\frac{q_m^2}{2C} \quad \frac{CU^2}{2}$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля станет равна нулю (так как заряд конденсатора равен нулю). Энергия магнитного поля станет максимальной (по закону сохранения энергии).

Максимальная энергия магнитного поля

$$\frac{LI^2}{2}$$

энергия W электромагнитного поля контура равна сумме его энергий магнитного $W_{\text{м}}$ и электрического $W_{\text{э}}$ полей.

Где i и q – сила тока и электрический заряд в любой момент времени

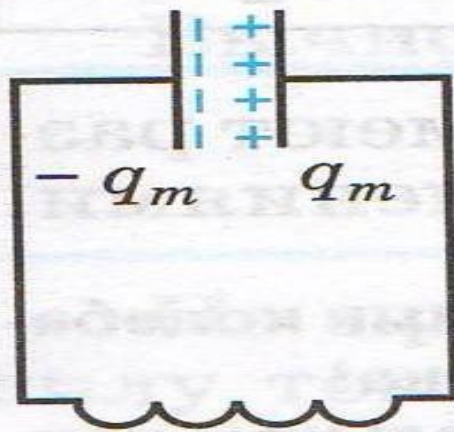
Преобразование энергии при э/м колебаний

Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме его энергий магнитного W_M и электрического W_E полей:

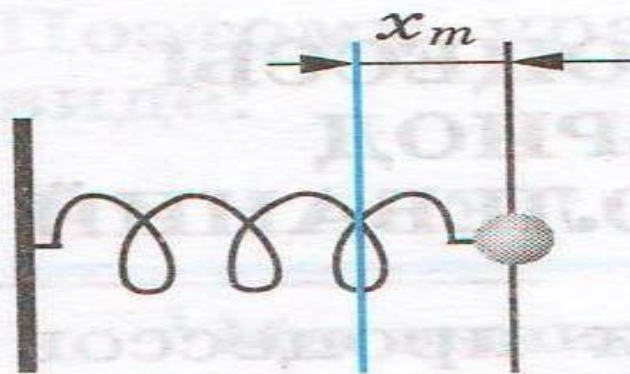
$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$$

Где i и q – сила тока и электрический заряд в любой момент времени

Аналогия между механическими
и электромагнитными
колебаниями

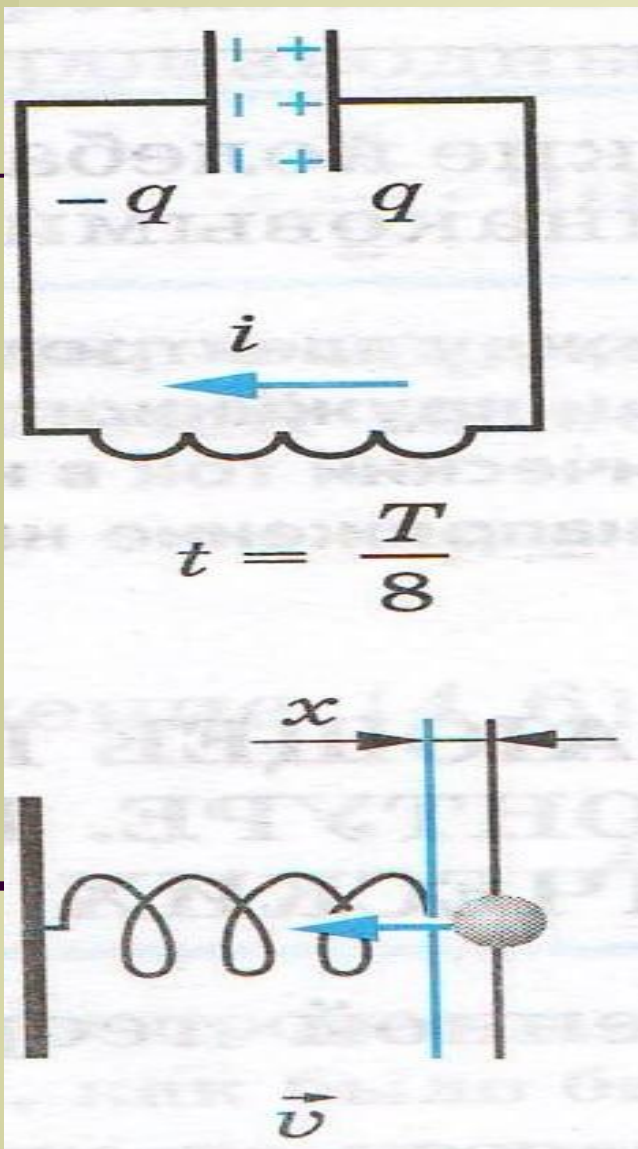


$t = 0$

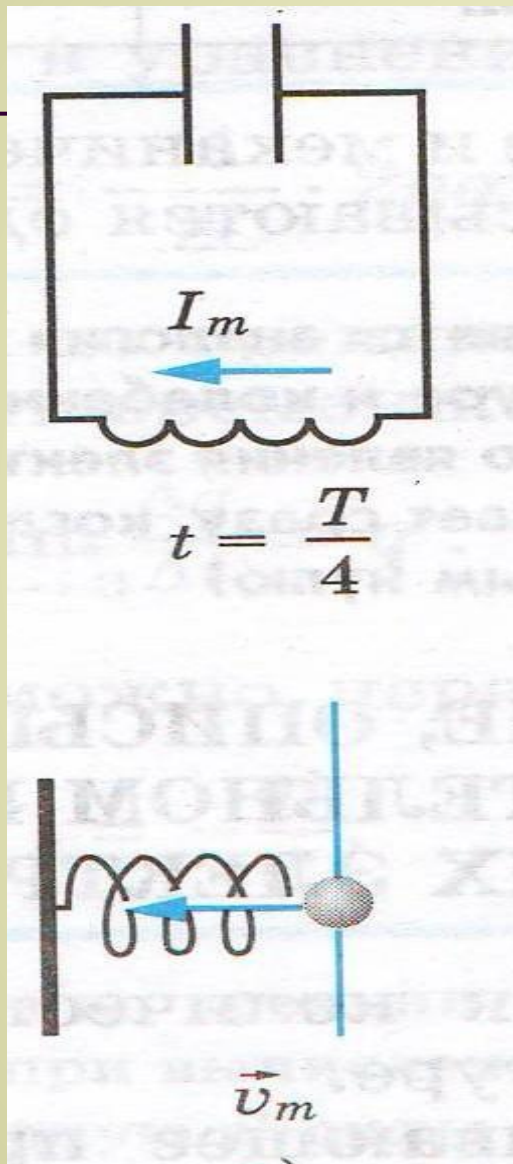


$\vec{v} = 0$

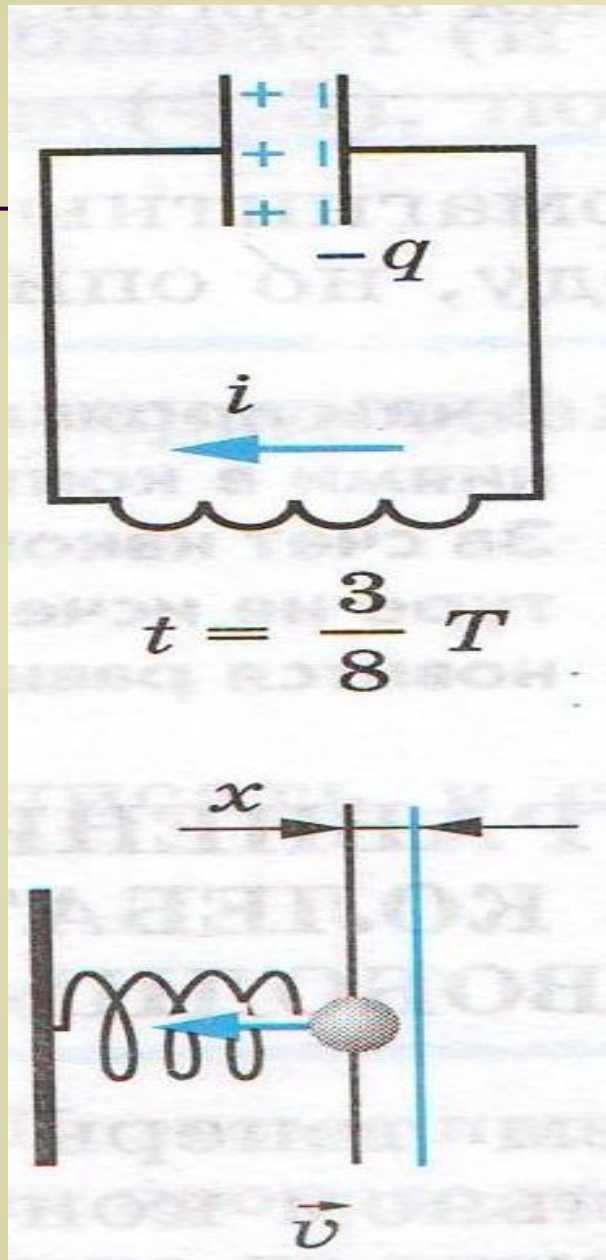
Зарядка конденсатора аналогична отклонению тела от положения равновесия на некоторую величину x_m .



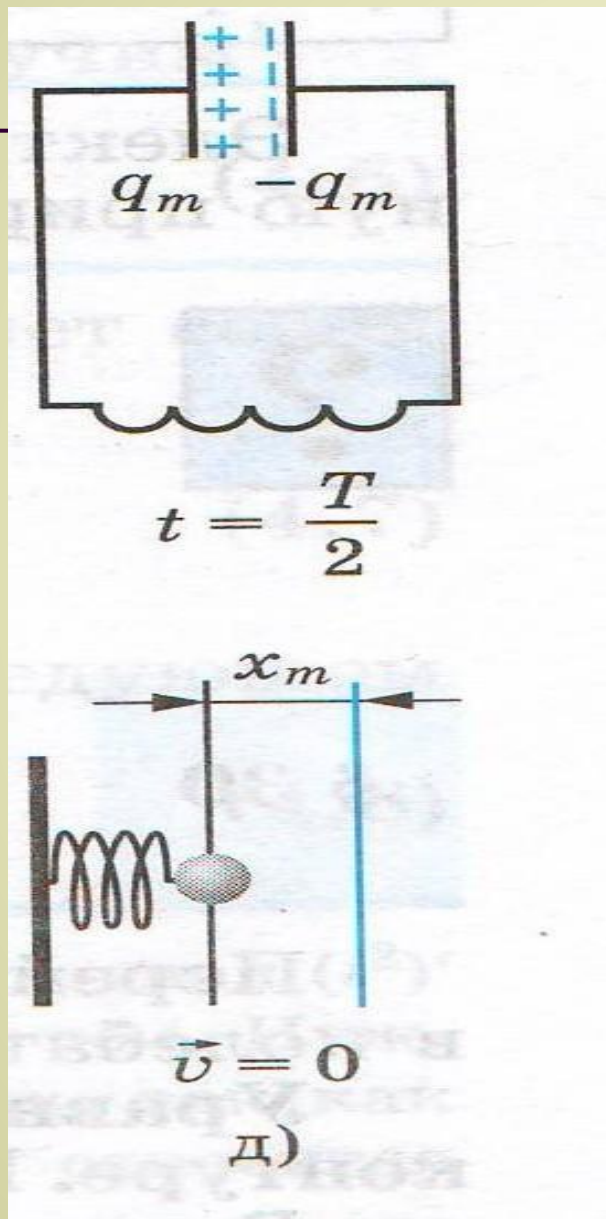
**Возникновение в цепи
тока соответствует
появлению в
механической
колебательной
системе скорости
тела под действием
силы упругости
пружины.**



Момент времени, когда конденсатор разрядится, а сила тока достигнет максимума, аналогичен тому моменту времени, когда тело с максимальной скоростью проходит положение равновесия.



**Далее конденсатор
начнет
перезаряжаться, а
тело в ходе
механических
колебаний
продолжает
смещаться влево от
положения
равновесия.**



**По происшествии
половины периода
колебаний
конденсатор
полностью
перезарядился, а
тело отклонилось в
крайнее левое
положение, когда его
скорость стала равна
нулю**

Соответствие между механическими и электромагнитными колебаниями можно свести в таблицу

Механическая величина	Электрическая величина
Координата x	Заряд q
Скорость v_x	Сила тока i
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Величина, обратная емкости, $\frac{1}{C}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

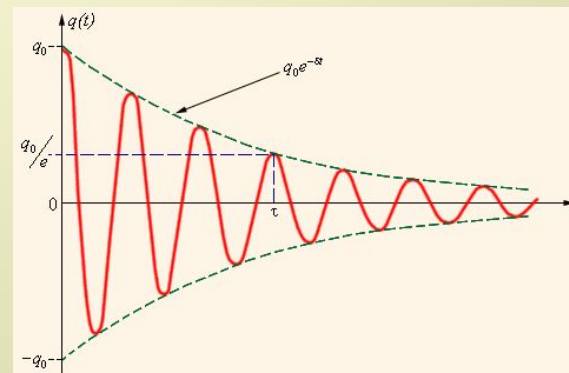
СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Свободные электромагнитные колебания – это периодически повторяющиеся изменения электромагнитных величин (q – электрический заряд, I – сила тока, U – разность потенциалов), происходящие *без потребления энергии от внешних источников*.

В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания будут затухающими из-за потерь энергии на нагревание проводов. **Согласно закону Джоуля-Ленца, энергия электрического тока будет постепенно превращаться в теплоту**

$$Q = I^2 R \Delta t$$

По этой причине **свободные колебания в контуре всегда являются затухающими**



Формула Томсона

Период электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре (т. е. в таком контуре, где нет потерь энергии) зависит от индуктивности катушки и емкости конденсатора и находится по формуле Томсона, где

T - это период колебания - промежуток времени, через который значения колеблющихся величин периодически повторяются

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

Уравнение, описывающее колебания в контуре

$$q'' = -\frac{1}{LC}q$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$$

формула Томсона

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

$$i = I_m \cos(\omega_0 t + \pi/2)$$

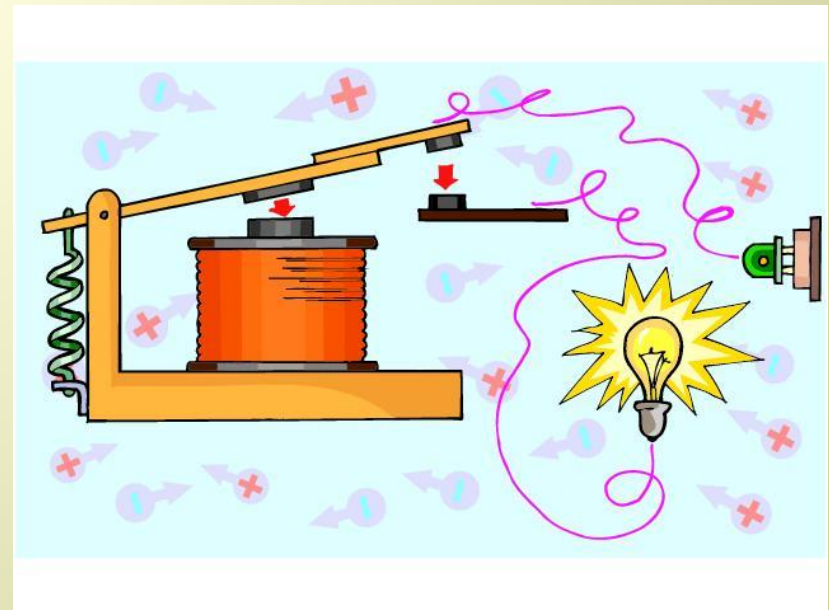
Вынужденные электромагнитные колебания

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

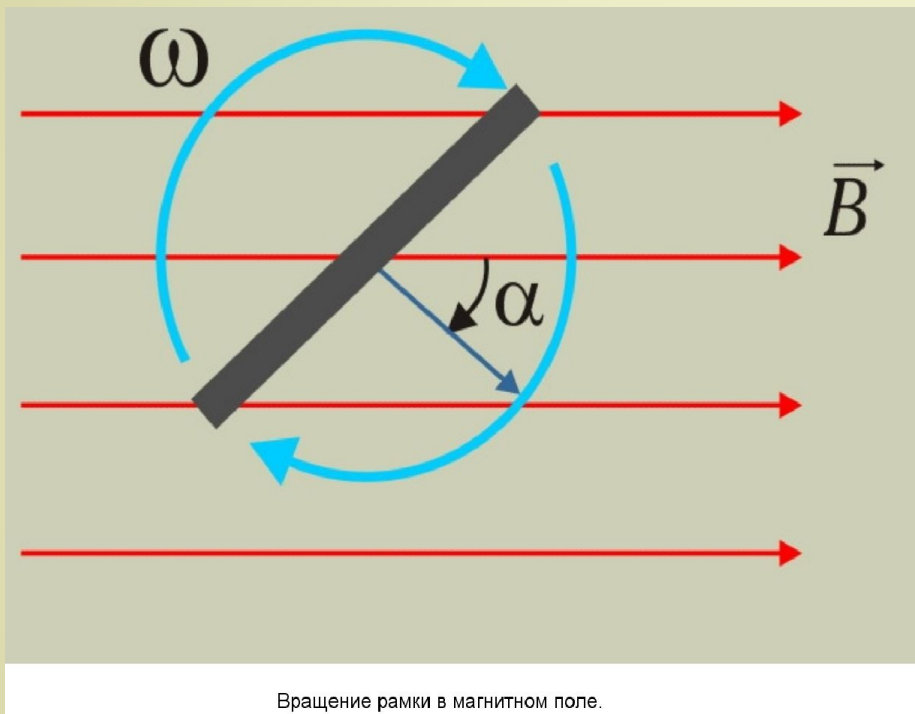
Электрический ток величина и направление которого меняются с течением времени называется **переменным**.

Переменный электрический ток представляет собой вынужденные электромагнитные колебания.
Частота переменного тока – число колебаний в 1с.

Стандартная промышленная частота переменного тока – 50Гц. Это значит, что за 1с ток 50 раз течет в одну сторону и 50 раз - в противоположную.



Получение переменной ЭДС



Переменный ток может возникать при наличии в цепи переменной ЭДС. Получение переменной ЭДС в цепи основано на явлении электромагнитной индукции. Для этого токопроводящую рамку равномерно с угловой скоростью ω вращают в однородном магнитном поле. При этом значение угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции будет определяться выражением:

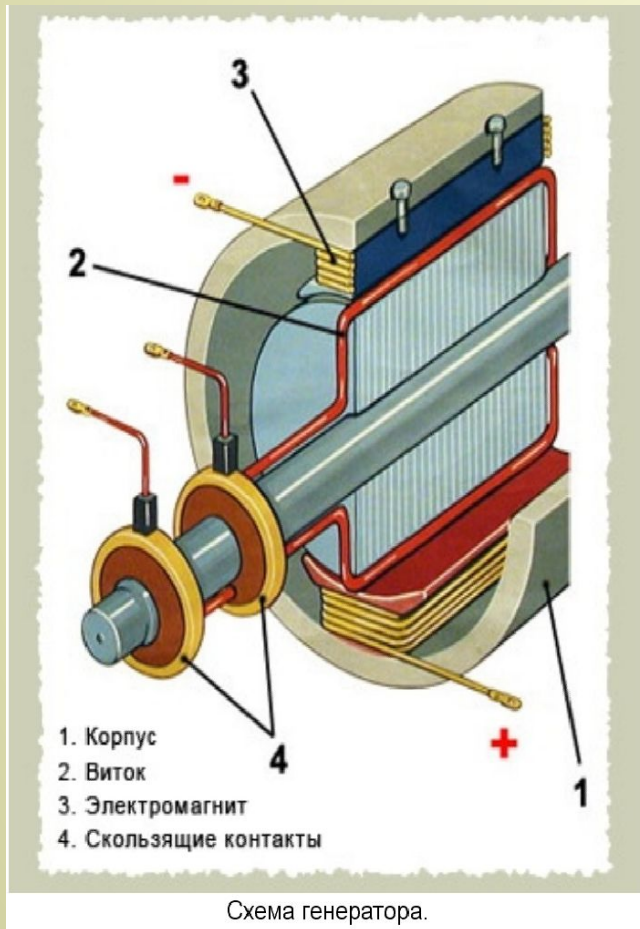
$$\alpha = \omega \cdot t$$

Следовательно, величина магнитного потока, пронизывающего рамку, будет изменяться со временем по гармоническому закону:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha = B \cdot S \cdot \cos \omega \cdot t$$

Согласно закону Фарадея, при изменении потока магнитной индукции, пронизывающего контур, в контуре возникает ЭДС индукции. Используя понятие производной, уточняем формулу для закона электромагнитной индукции

$$e = -\Phi'_t = -\left(B \cdot S \cdot \cos \omega \cdot t\right)'_t = B \cdot S \cdot \omega \sin \omega \cdot t$$



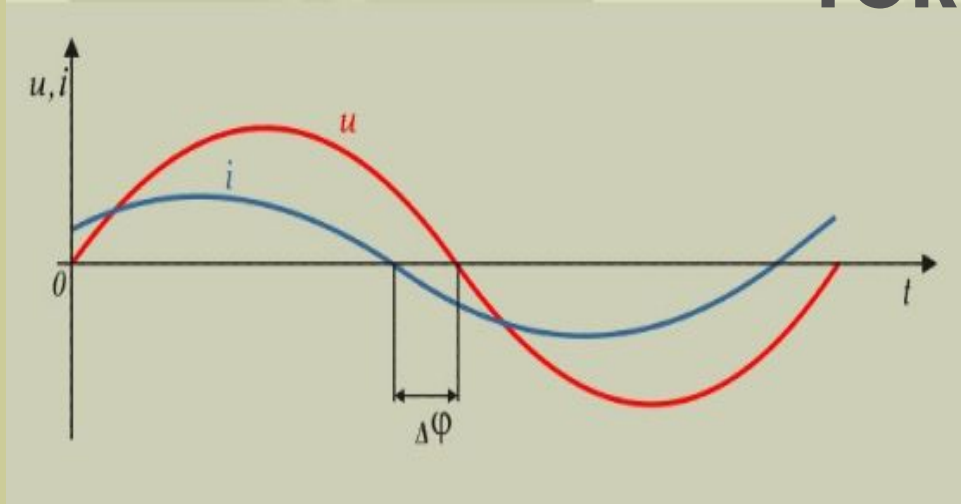
При изменении магнитного потока, пронизывающего контур, ЭДС индукции также изменяется со временем по закону синуса (или косинуса).

$$\varepsilon_m = B \cdot S \cdot \omega \quad \text{- максимальное значение или амплитуда ЭДС.}$$

Если рамка содержит **N** витков, то амплитуда возрастает в **N** раз. Подключив источник переменной ЭДС к концам проводника, мы создадим на них переменное напряжение:

$$u = U_m \cdot \sin \omega \cdot t$$

Общие соотношения между напряжением и силой тока



Как и в случае постоянного тока, сила переменного тока определяется напряжением на концах проводника. Можно считать, что в данный момент времени сила тока во всех сечениях проводника имеет одно и то же значение.

Но фаза колебаний силы тока может не совпадать с фазой колебаний напряжения.

В таких случаях принято говорить, что существует сдвиг фаз между колебаниями тока и напряжения. В общем случае мгновенное значение напряжения и силы тока можно определить:

$$u = U_m \cdot \sin \omega t \quad \text{ИЛИ} \quad u = U_m \cos \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

φ – сдвиг фаз между колебаниями тока и напряжения

I_m – амплитуда тока, А.

Вынужденные электромагнитные колебания

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

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

мгновенное значение ЭДС индукции в данный момент времени)

Эмплитудное значение ЭДС

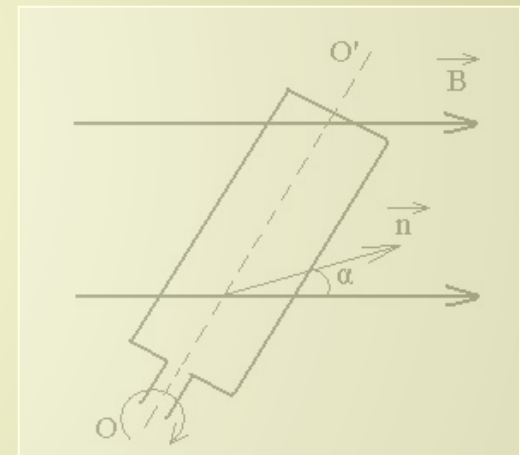
ω – циклическая частота переменной ЭДС

Магнитный поток Φ сквозь

плоскость рамки: $\Phi = BS \cos \alpha$

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

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

Эмплитуда ЭДС индукции