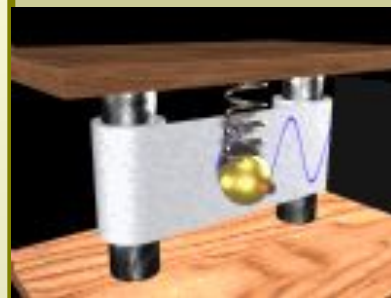


ФИЗИКА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ



Гипотеза Джеймса Клерка Максвелла



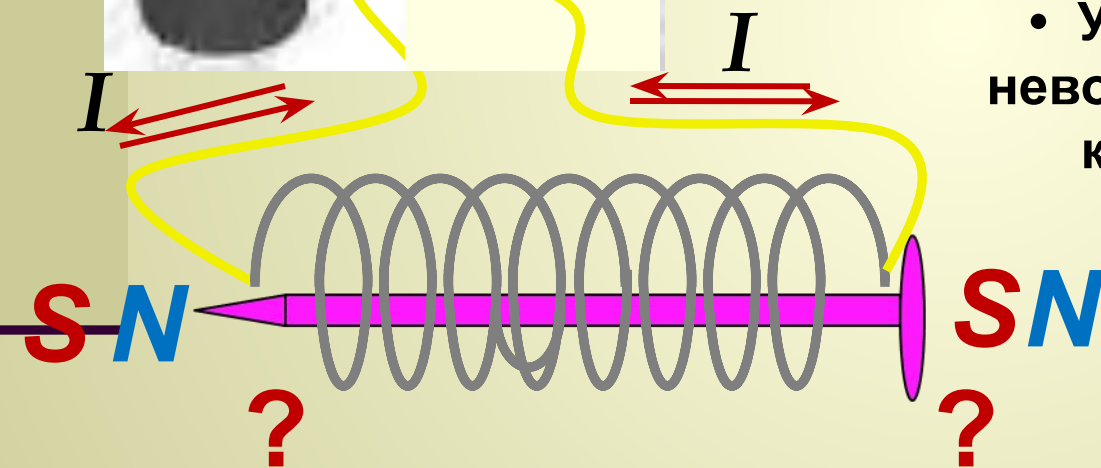
Существование электромагнитных полей было теоретически предсказано великим английским физиком Максвеллом в 1864 году.

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



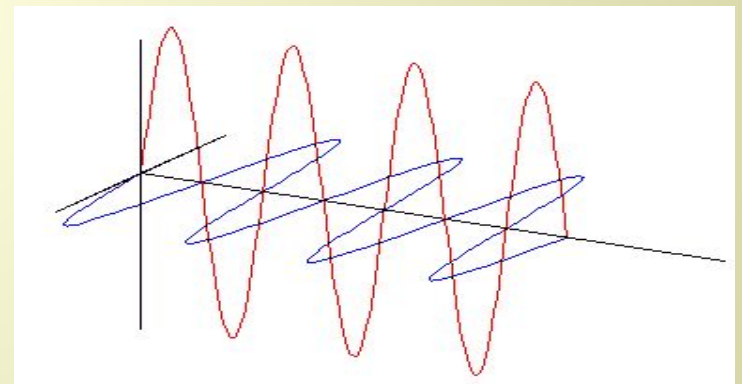
- Замыкали обкладки лейденской банки с помощью катушки
- Обнаруживали намагничивание стальной спицы, помещенной внутрь катушки
- Удивляло то, что заранее невозможно было предсказать, какой конец спицы будет северным полюсом, а какой - южным



- 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

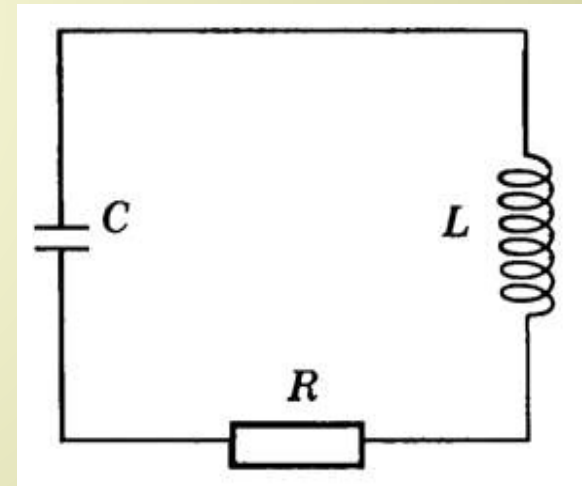


Колебательный контур

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

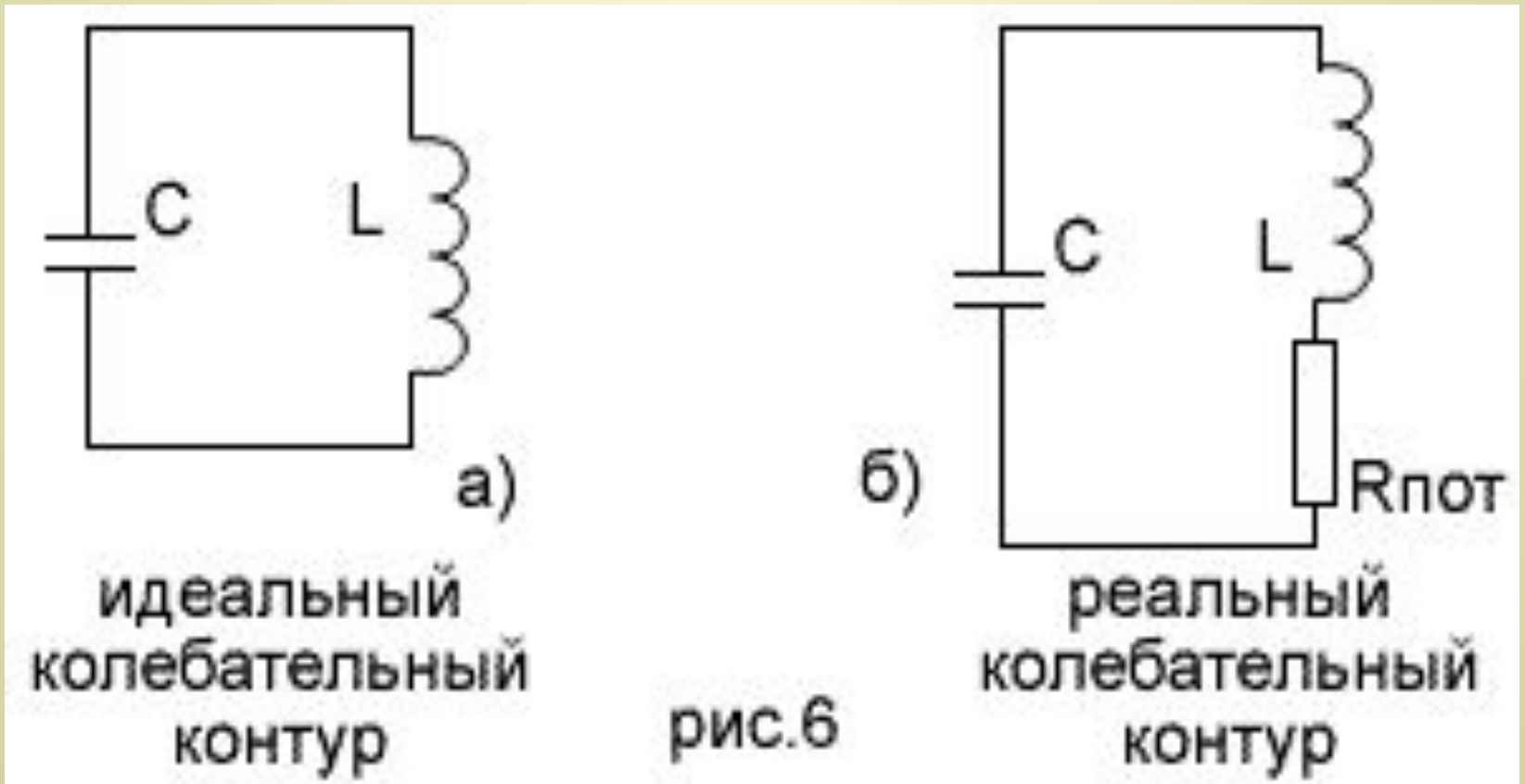
Колебательный контур — цепь, состоящая из включенных последовательно

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



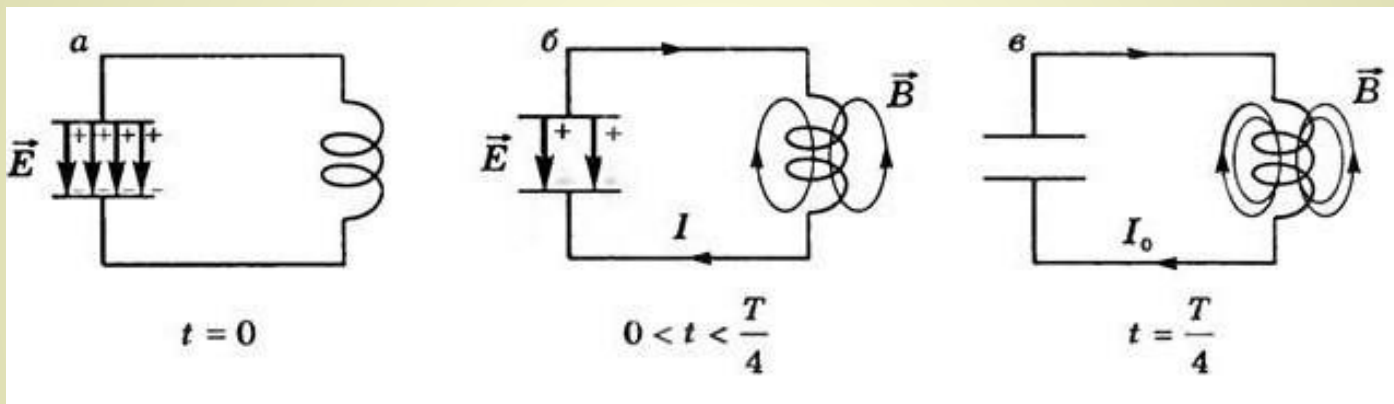
Идеальный контур Томсона

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

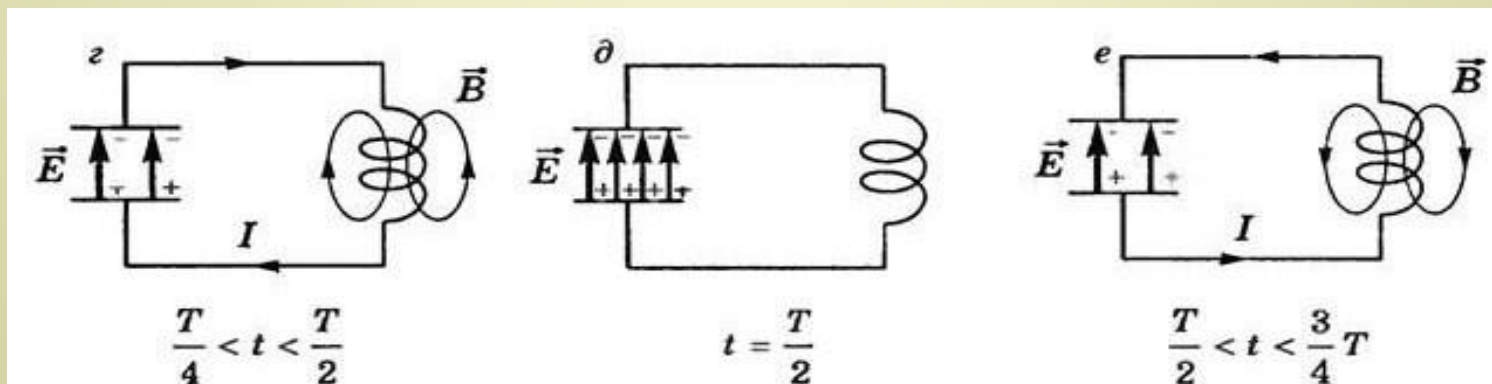


Возникновение свободных э.м. колебаний

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.

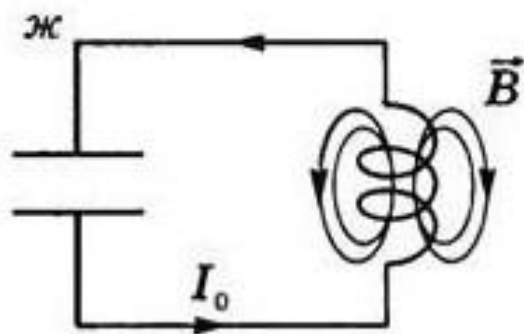


Индукционный ток, в соответствии с правилом Ленца, будет течь в ту же сторону и перезарядит конденсатор. (рис ∂)

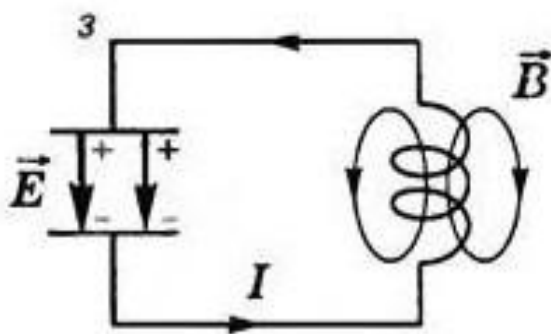


Возникновение свободных э/м колебаний

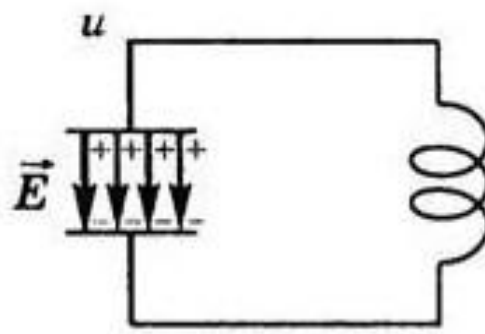
Ток в данном направлении прекратится, и процесс повторится в обратном направлении. Таким образом, в колебательном контуре будут происходить электромагнитные колебания.



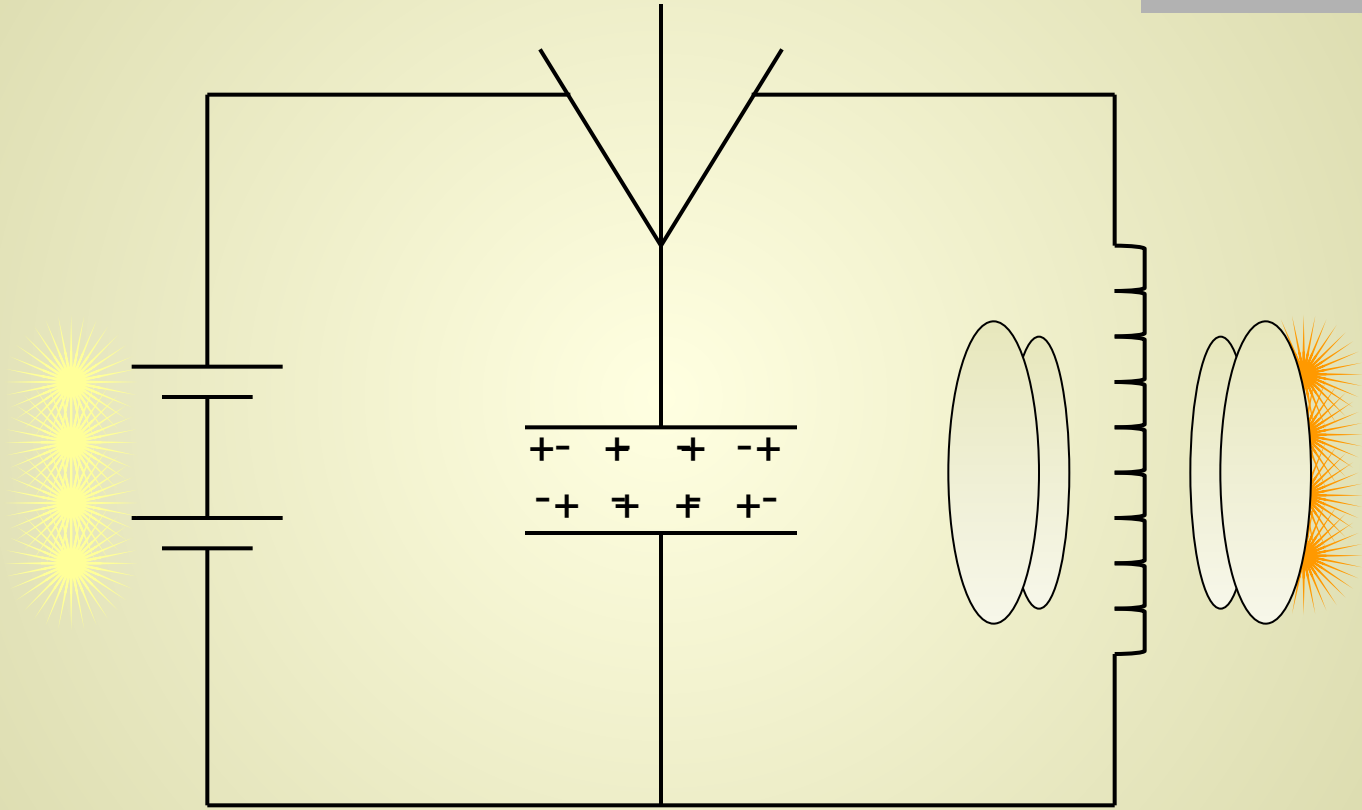
$$t = \frac{3}{4}T$$

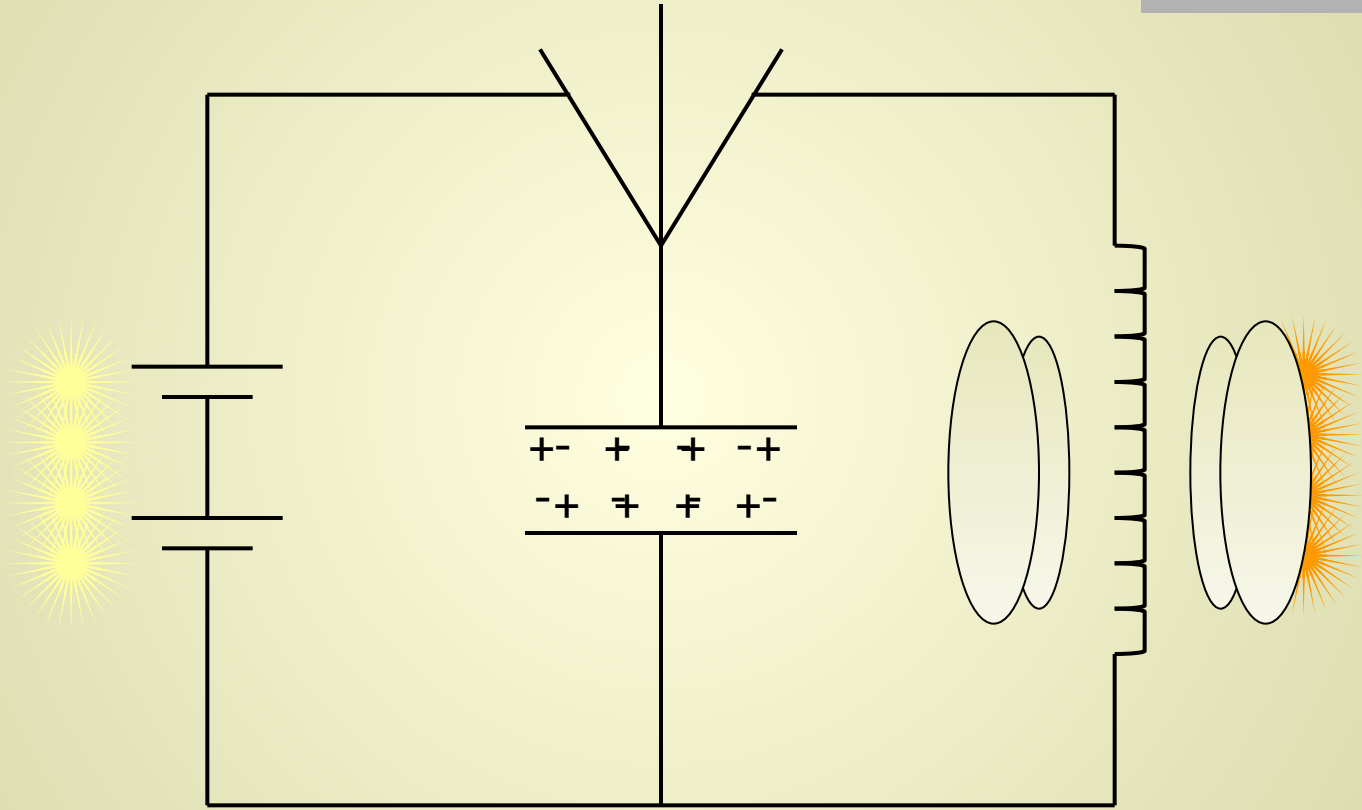


$$\frac{3}{4}T < t < T$$



$$t = T$$





Преобразование 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

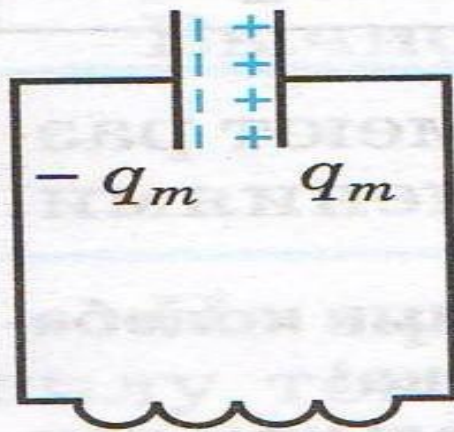
Преобразование энергии при э/м колебаний

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

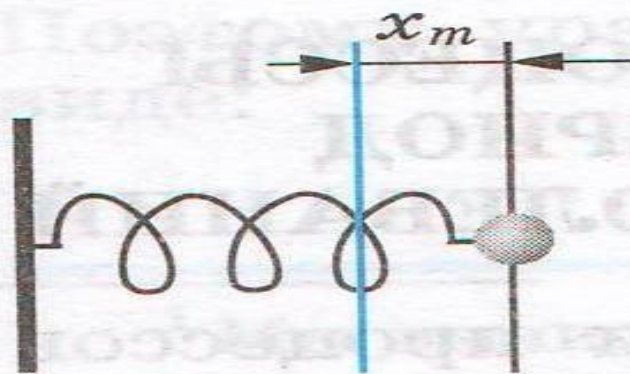
$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q_m^2}{2C}$$

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

Аналогия между механическими
и электромагнитными
колебаниями

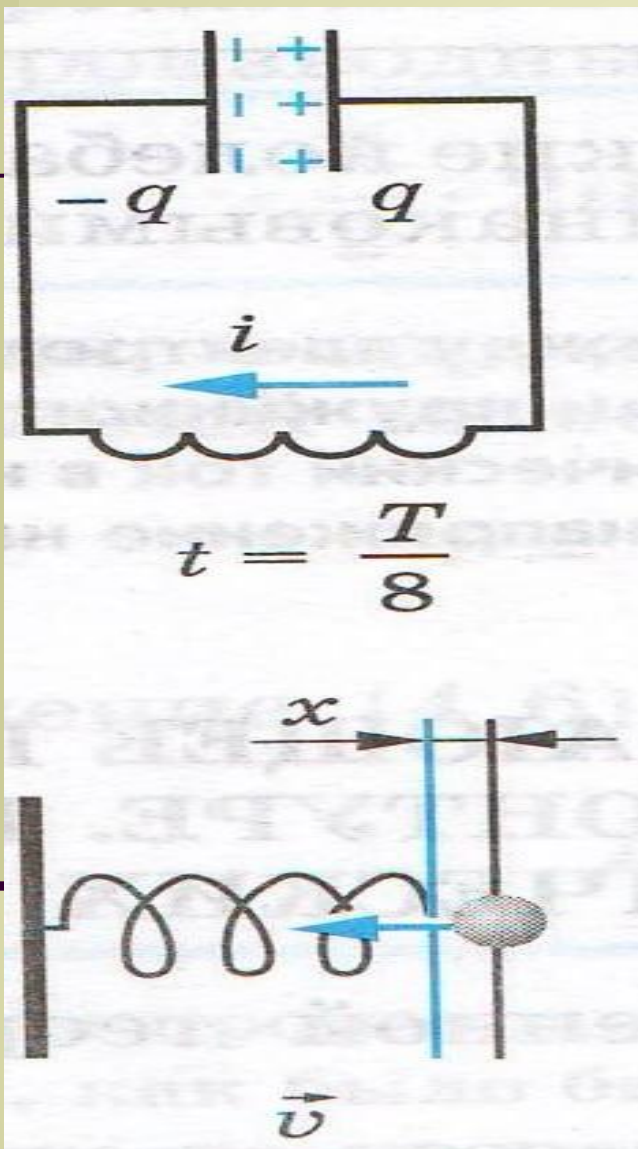


$t = 0$

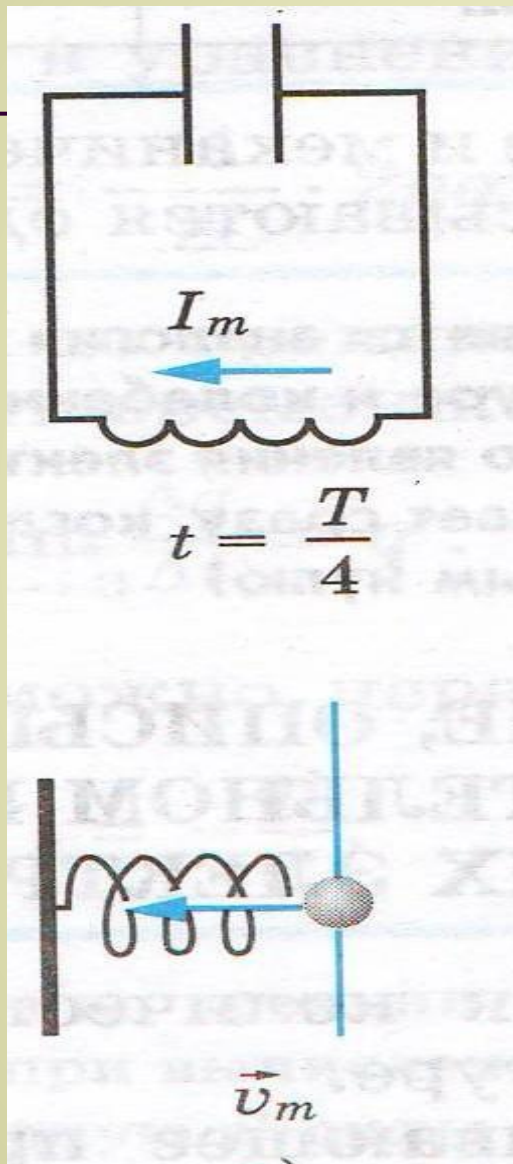


$\vec{v} = 0$

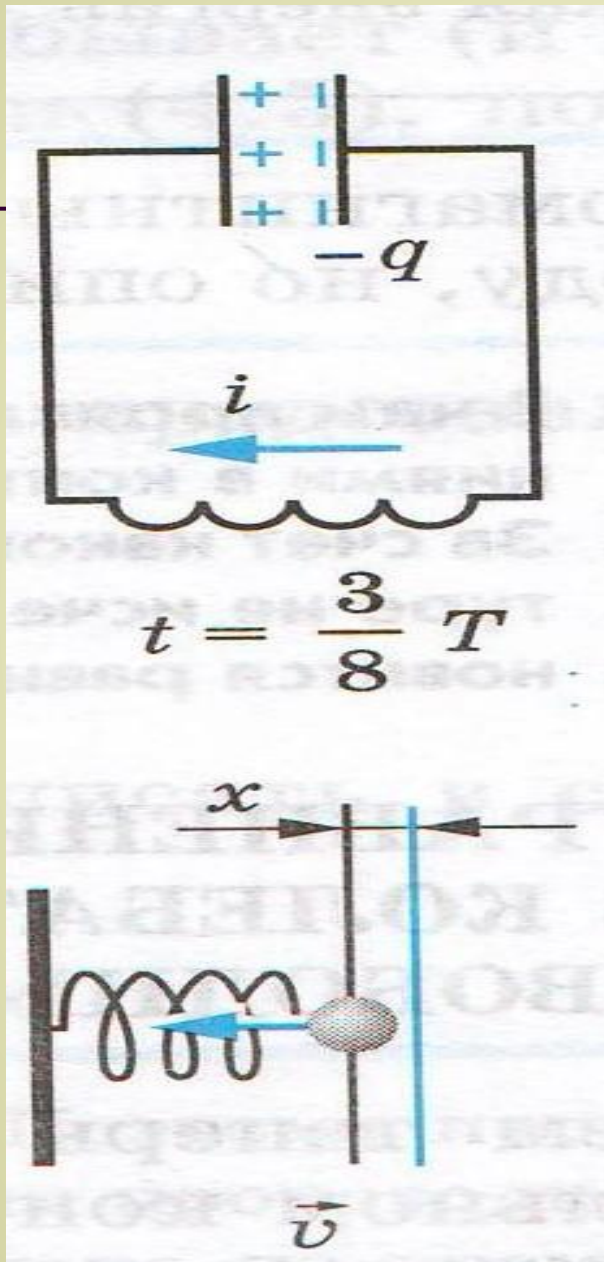
Зарядка конденсатора аналогична отклонению тела от положения равновесия на некоторую величину x_m .



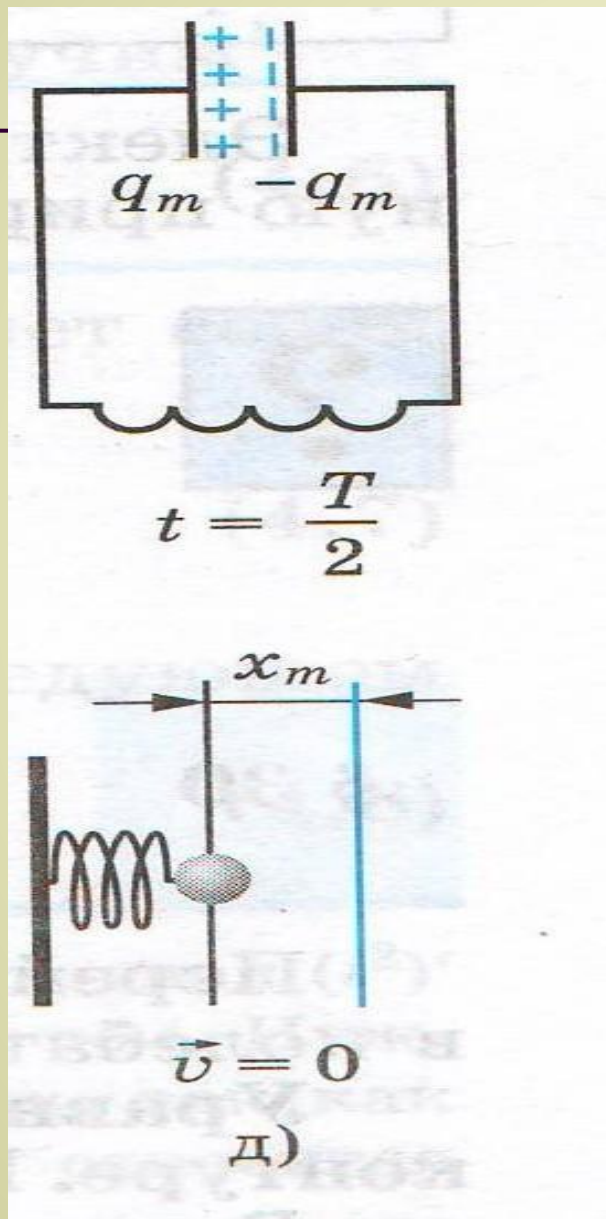
Возникновение в цепи тока соответствует появлению в механической колебательной системе скорости тела под действием силы упругости пружины.



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

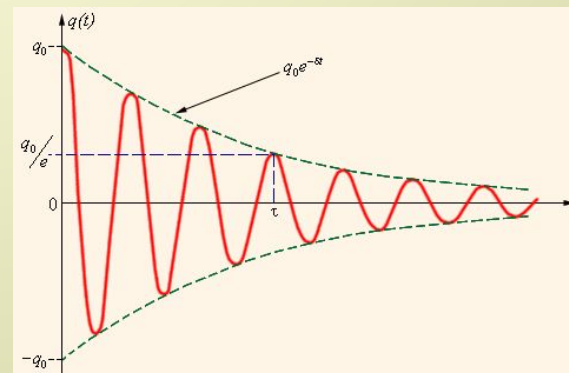
СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

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

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

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

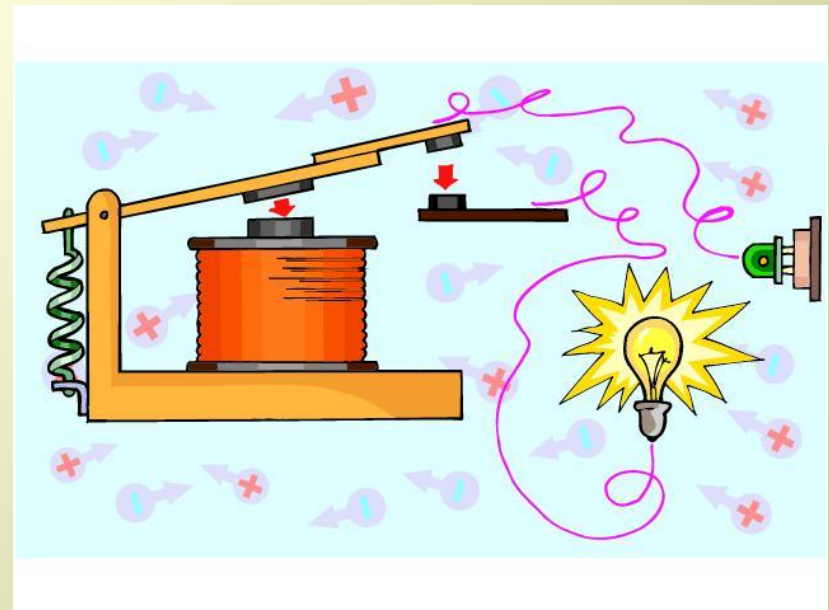
Вынужденные электромагнитные колебания

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

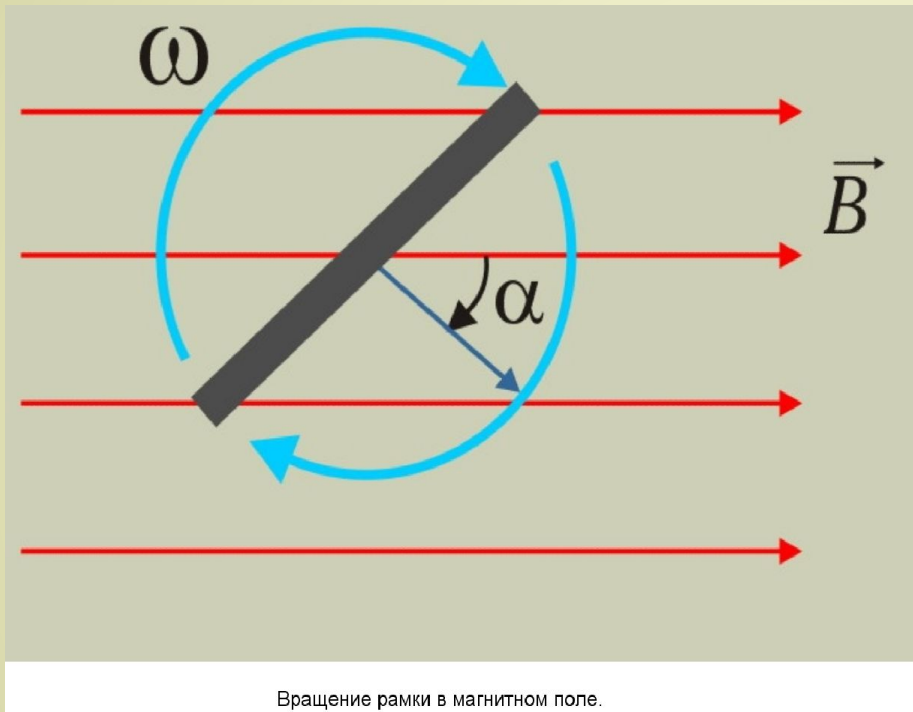
Электрический ток величина и направление которого меняются с течением времени называется **переменным**.

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:

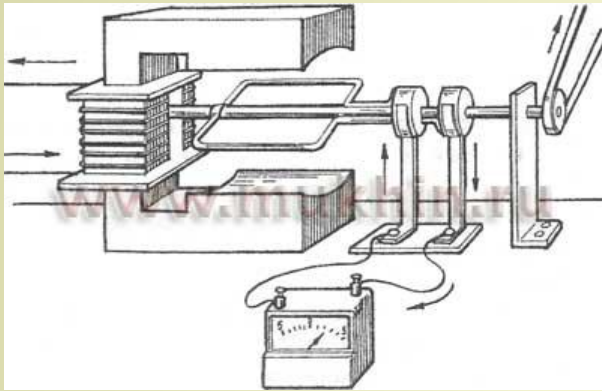
$$\alpha = \omega \cdot t$$

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:

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

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

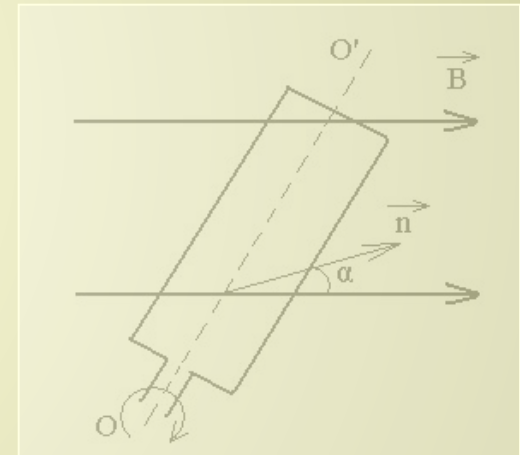
Магнитный поток Φ сквозь

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:

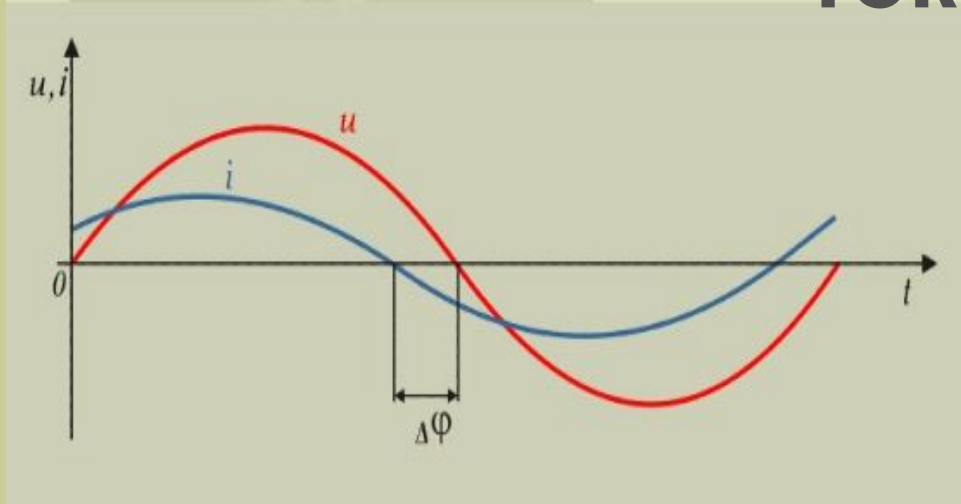
$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

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

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

Эмплитуда ЭДС индукции

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:

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

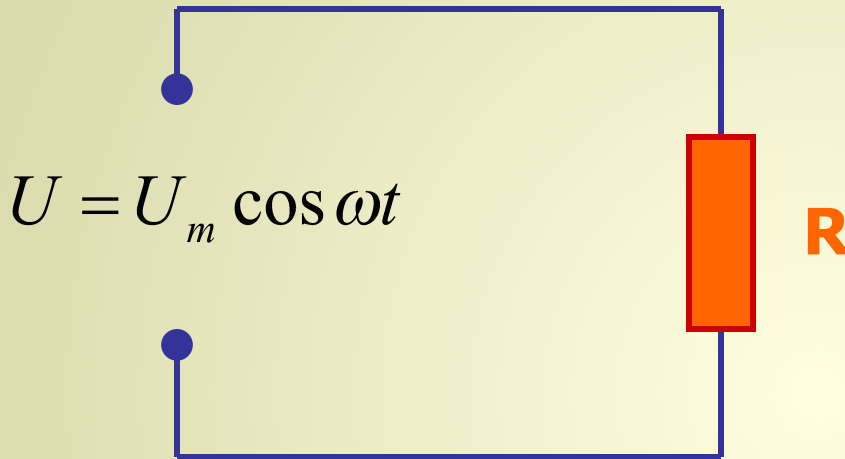
$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

φ – сдвиг фаз между колебаниями тока и напряжения

I_m – амплитуда тока, А.

1. Действующие значения тока и напряжения. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Рассмотрим активное сопротивление в цепи переменного тока:



Мгновенное значение силы тока через активное сопротивление пропорционально мгновенному значению напряжения

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t$$

Колебания напряжения и силы тока на активном сопротивлении совпадают по фазе

РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

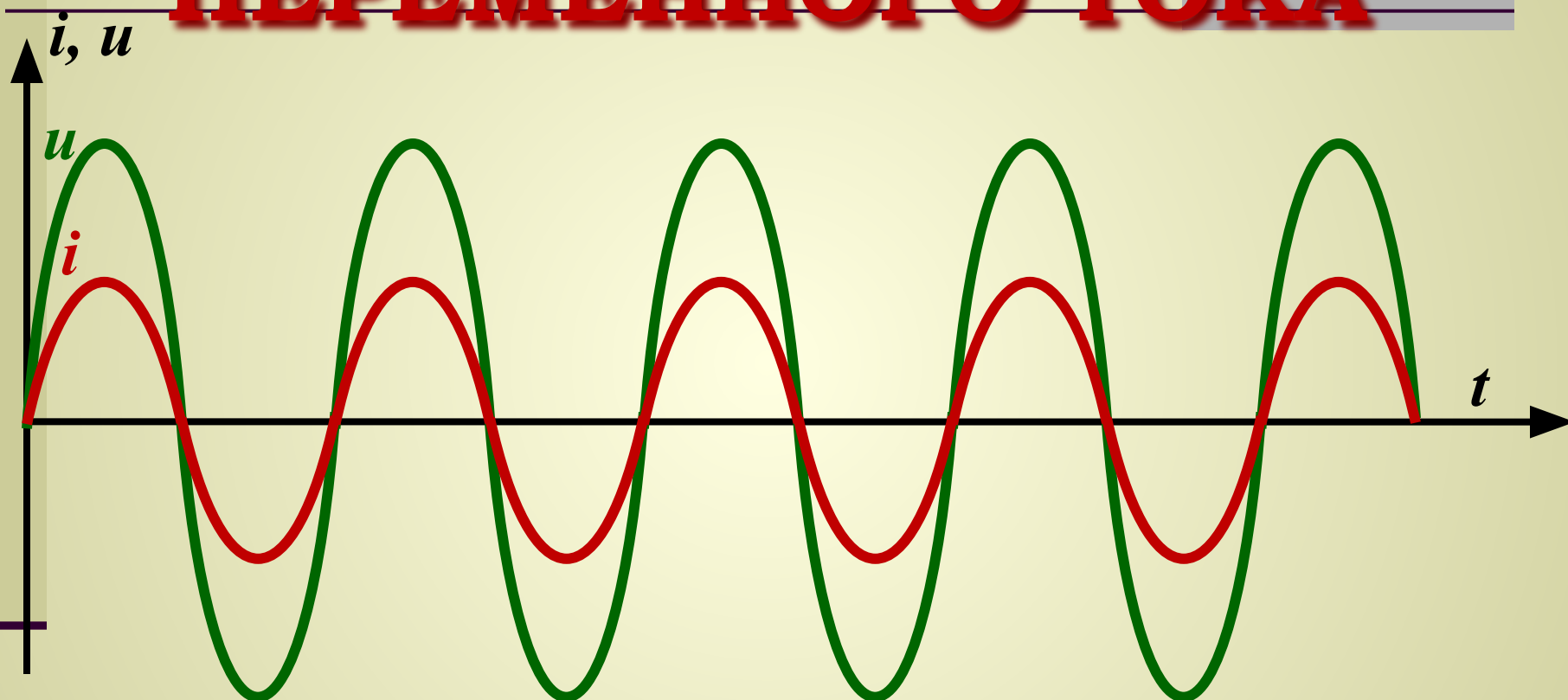
$u = U_m \cos \omega t$ – мгновенное значение напряжения
 $i = I_m \cos \omega t$ – мгновенное значение силы тока

$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение силы тока $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение напряжения

$I = \frac{U}{R}$ $I_m = \frac{U_m}{R}$ – закон Ома для цепи переменного тока с резистором, R – активное сопротивление

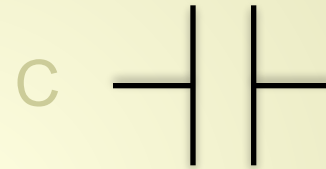
$P = IU = I^2 R$ – действующее значение мощности

РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

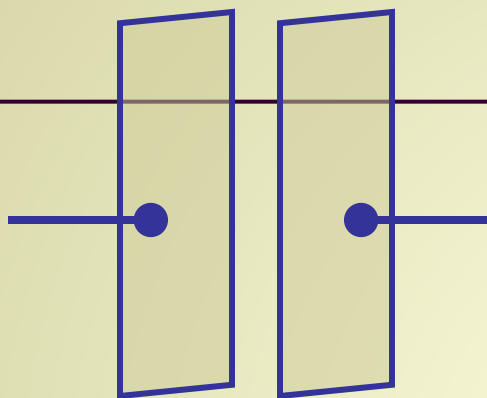


В цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление, колебания силы тока i и напряжения u совпадают по фазе

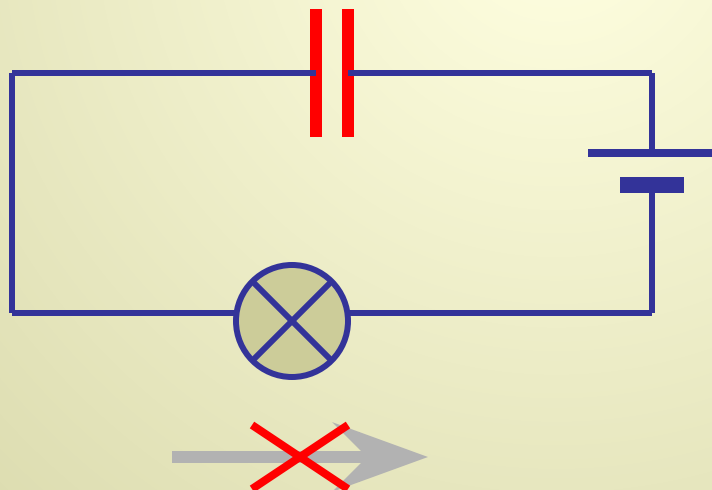
2. Конденсатор в цепи переменного тока



Давайте вспомним, что такое конденсатор



Конденсатор – это система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика (воздуха, слюды, керамики ...)



Ясно, что конденсатор – это разрыв в цепи (подобно разомкнутому выключателю), поэтому **постоянный ток конденсатор не проводит**

Итак, конденсатор проводит переменный ток, однако он оказывает току сопротивление, которое называется **емкостным сопротивлением**

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

X_C - емкостное сопротивление

ω - циклическая частота протекающего тока

C – емкость конденсатора

ν - частота тока

КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

$q = C U_m \cos \omega t$ - мгновенное значение заряда

$u = U_m \cos \omega t$ - мгновенное значение напряжения

$i = q' = -C U_m \omega \sin \omega t$

$I_m = U_m C \omega$ - максимальное значение силы тока

$i = I_m \cos (\omega t + \pi)$ - мгновенное значение силы тока

$I = \frac{U}{X_C}$ - закон Ома для цепи переменного тока с конденсатором

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ - емкостное сопротивление

КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



В цепи переменного тока, содержащей конденсатор, колебания силы тока i опережают колебания напряжения u на $\frac{\pi}{2}$

3. Индуктивность в цепи переменного тока

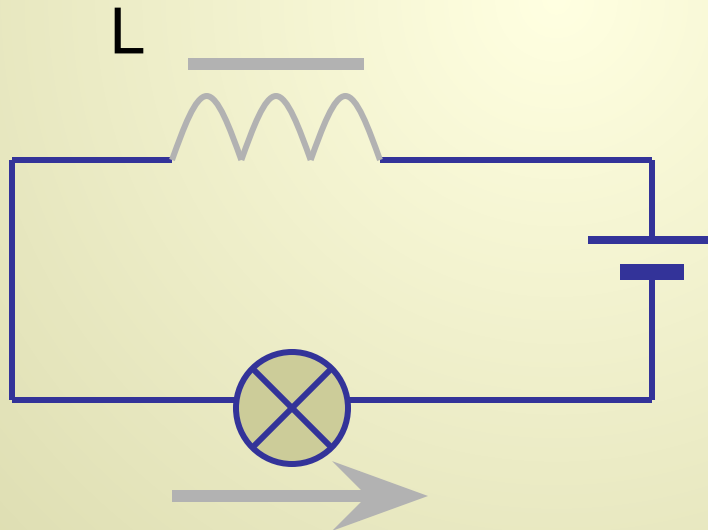


L



Давайте вспомним, что такое индуктивность

Индуктивность L – это физическая величина, подобная массе в механике. Как в механике для изменения скорости тела нужно время, и масса является мерой этого времени (**инерция**), так и электродинамике для изменения тока через проводник нужно время и индуктивность является мерой этого времени (**самоиндукция**)

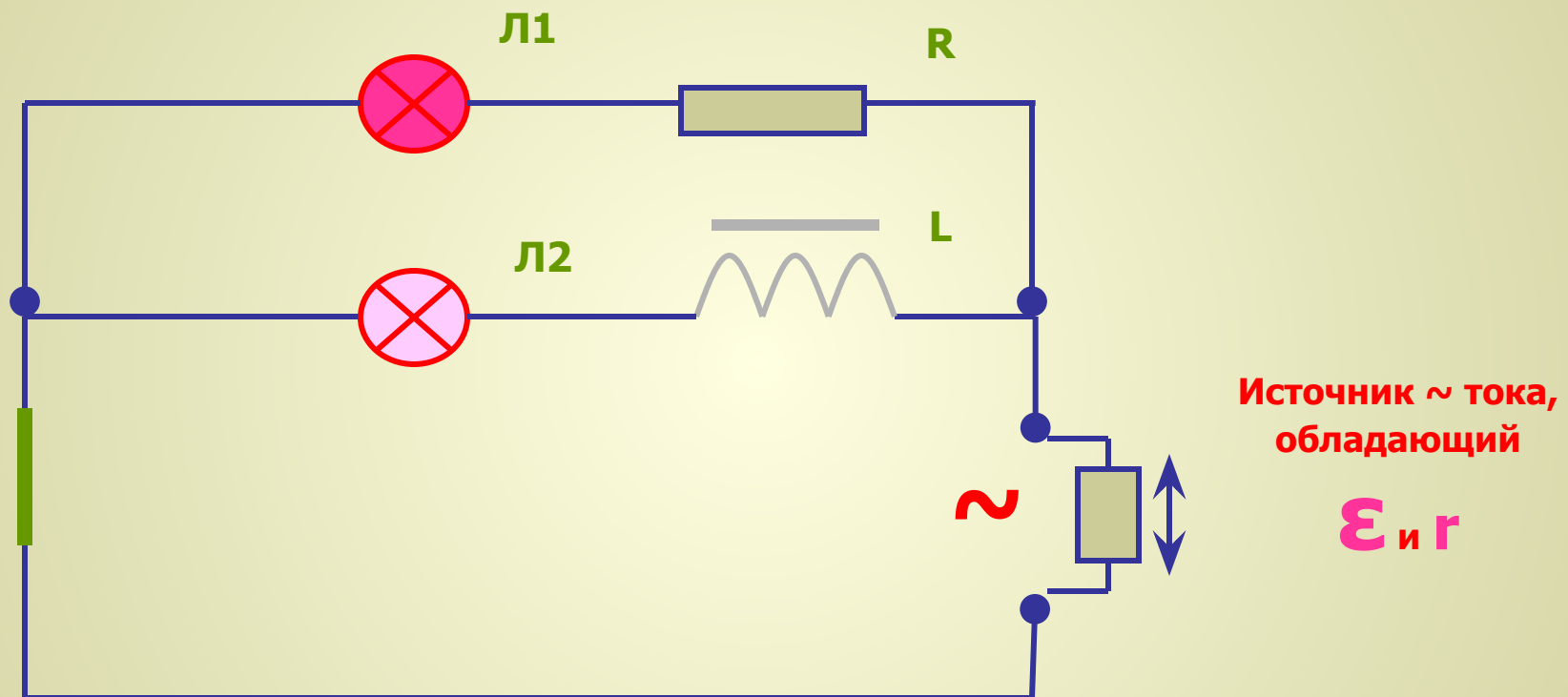


Катушка индуктивности – это обычный проводник с необычной формой, обладающий активным сопротивлением. Поэтому катушка хорошо проводит постоянный ток, значение которого ограничено только его активным сопротивлением

Явление самоиндукции возникает только в моменты включения и выключения (препятствует любому изменению тока)

Посмотрим, как ведет себя индуктивность в цепи переменного тока:

Замкнем цепь и сравним яркость горения лампочек 1 и 2



В цепи сопротивление R выберем равным активному сопротивлению L

Лампочка Л1 горит гораздо ярче, чем Л2

Почему ?

Все дело в **явлении самоиндукции**, возникающей в катушке при любом изменении тока, которое мешает этому изменению – поэтому у катушки индуктивности кроме активного сопротивления провода, из которого она сделана, появляется еще одно сопротивление, обусловленное явлением самоиндукции и называемое **индуктивным сопротивлением** X_L

$$X_L = \omega L = 2\pi\nu L$$

ω - циклическая частота протекающего тока

L – индуктивность катушки

ν - частота тока

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



The diagram shows a rectangular circuit loop with an inductor symbol (a coil) on the right side. A sine wave symbol is drawn over the left side of the loop, indicating an AC current source.

$$i = I_m \sin \omega t - \text{мгновенное значение силы тока}$$

$$e_i = -L i' = -L I_m \omega \cos \omega t$$

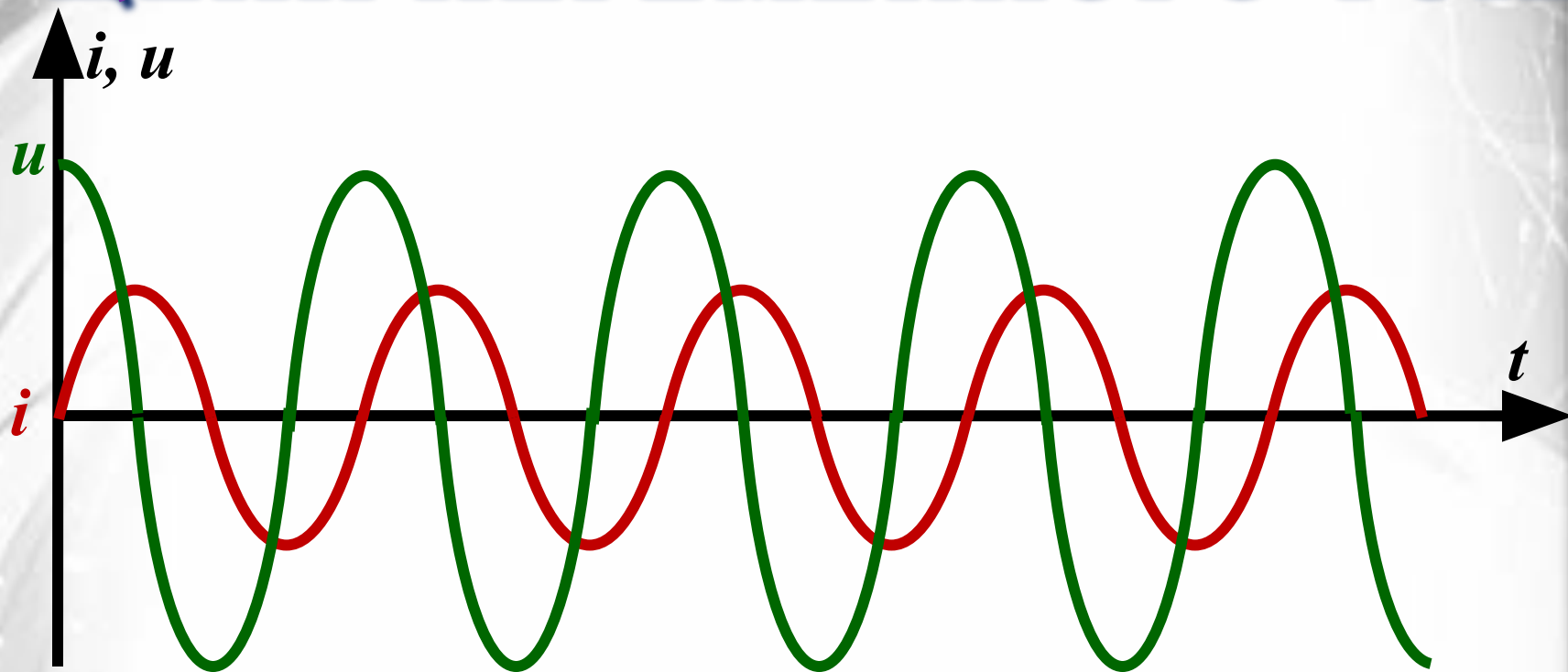
$$u = -e_i = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) - \text{мгновенное значение напряжения}$$

$$U_m = L I_m \omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} - \text{закон Ома для цепи переменного тока с катушкой индуктивности}$$

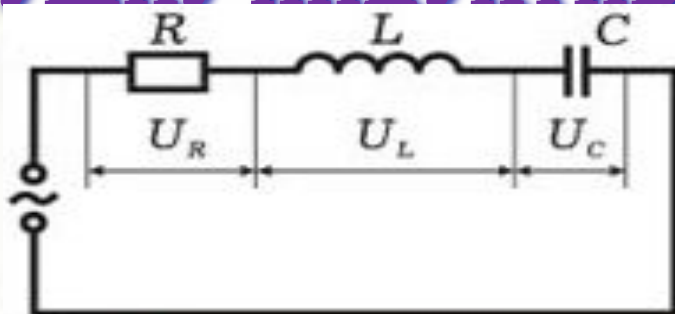
$$X_L = \omega L - \text{индуктивное сопротивление}$$

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



В цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности, колебания напряжения u опережают колебания силы тока i на $\frac{\pi}{2}$

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОДЕРЖАЩЕЙ РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР, КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ

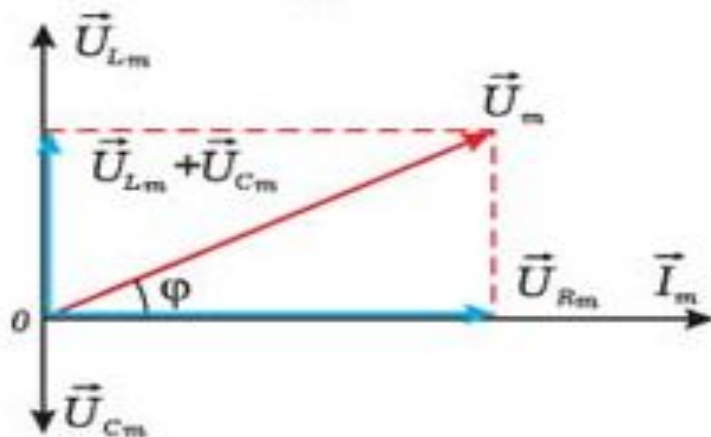


$$i = I_m \cos \omega t$$

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

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

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

Резонанс в электрической цепи – явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тока при совпадении частот $\omega_0 = \omega$, где ω_0 – собственная частота колебаний контура; ω – частота питающего напряжения

$$X_C = X_L \quad \frac{1}{\omega_0} = \omega_0 L \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

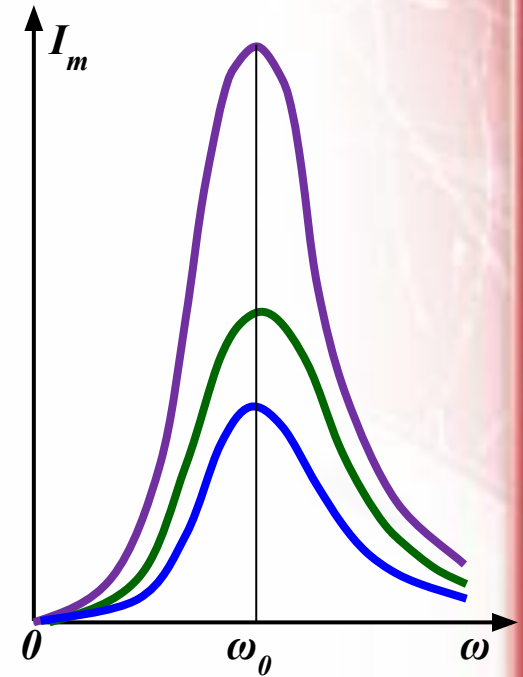
Когда $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ в цепи наблюдается резонанс

Амплитуда установившихся колебаний

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R}, \quad \text{при } R \rightarrow 0, \quad I \rightarrow \infty$$

При максимальной силе тока: $\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} = \frac{4\pi^2}{T^2}$

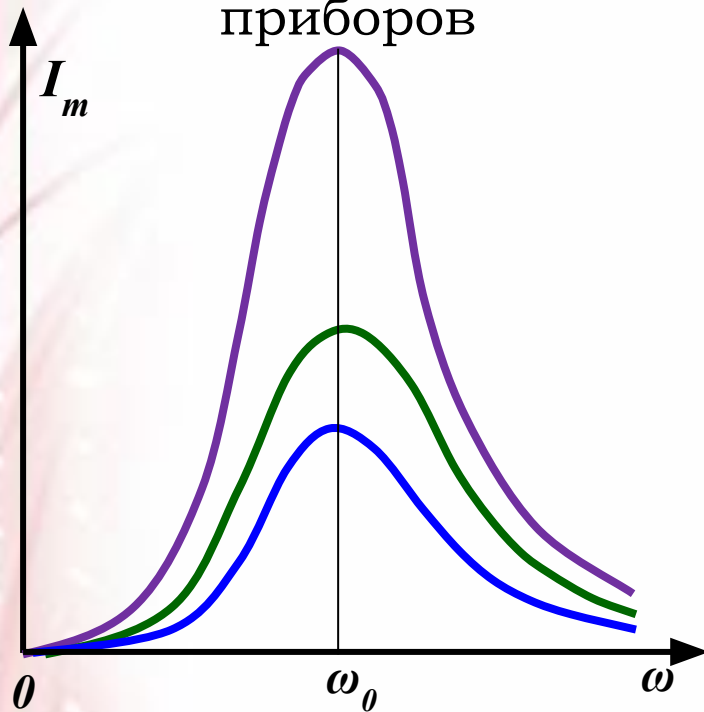
$$T = 2\pi\sqrt{LC} \implies T = T_{cob} \quad (\omega = \omega_{cob})$$



ПОЛЬЗА РЕЗОНАНСА

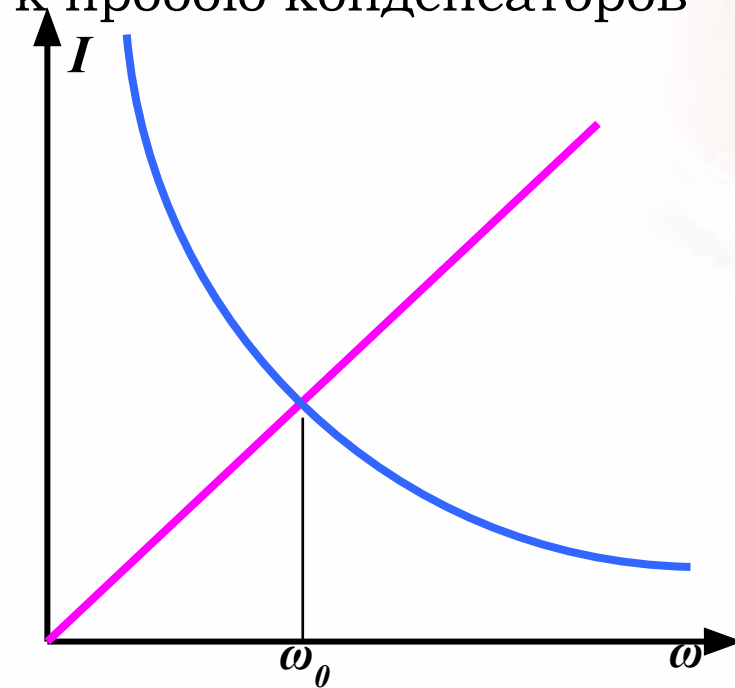
$$\omega = \omega_0$$

Используется при осуществлении радиосвязи, основана работа измерительных приборов

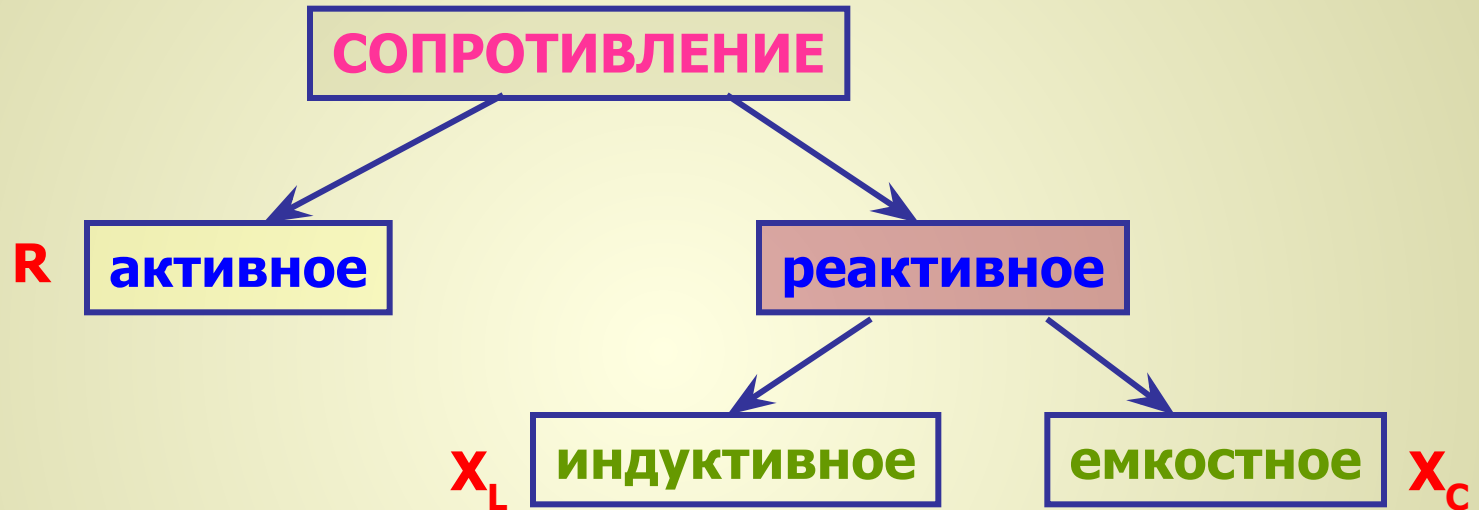


ВРЕД РЕЗОНАНСА

При резком возрастании тока – приводит к нарушению изоляции витков катушки индуктивности; при резком увеличении напряжения – к пробое конденсаторов

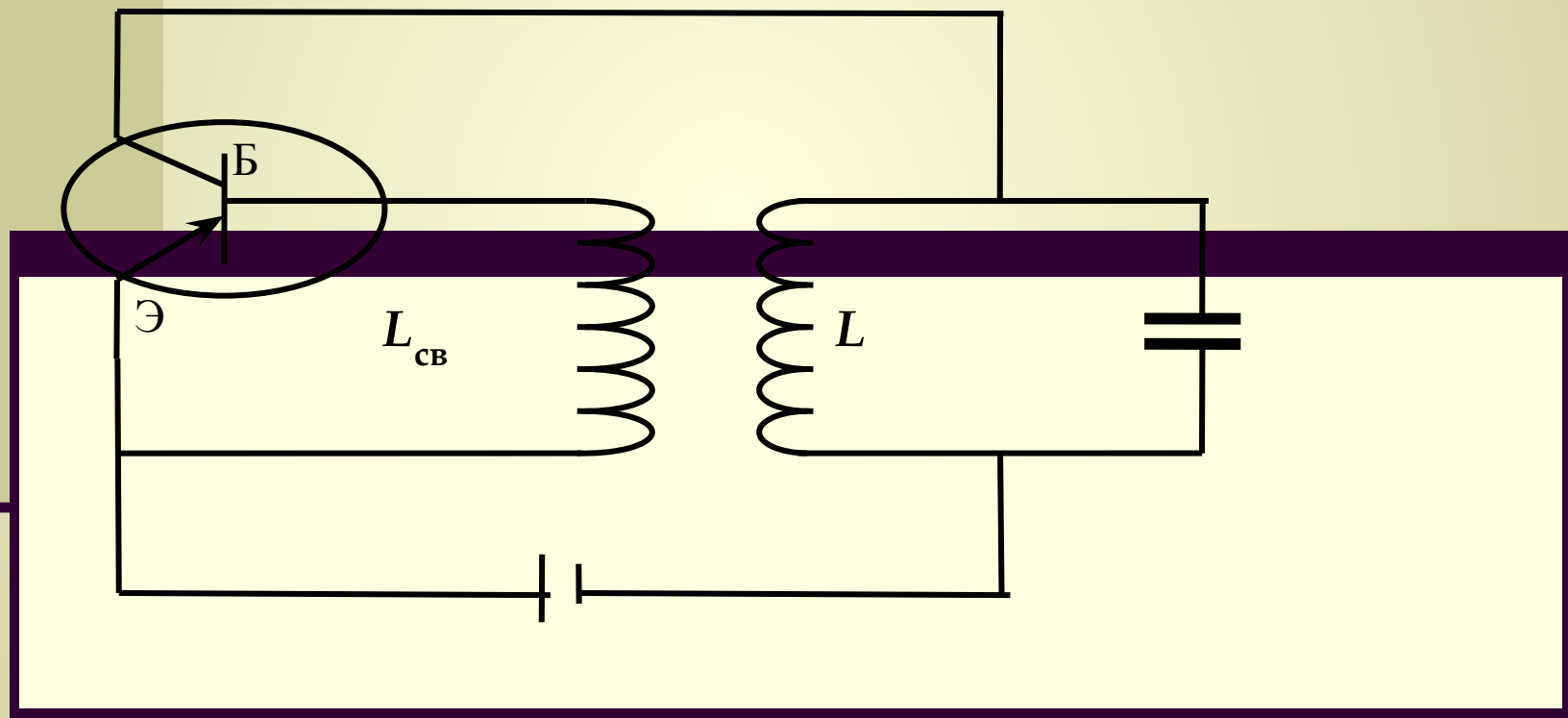


Таким образом, в цепи переменного тока можно выделить 3 вида сопротивлений (или три вида элементов, оказывающих сопротивление току)



Реальные электрические цепи содержат все виды сопротивлений (активное, индуктивное и емкостное), поэтому ток в реальной цепи зависит от ее полного (эквивалентного) сопротивления, а сдвиг фаз определяется величиной **L** и **C** цепи

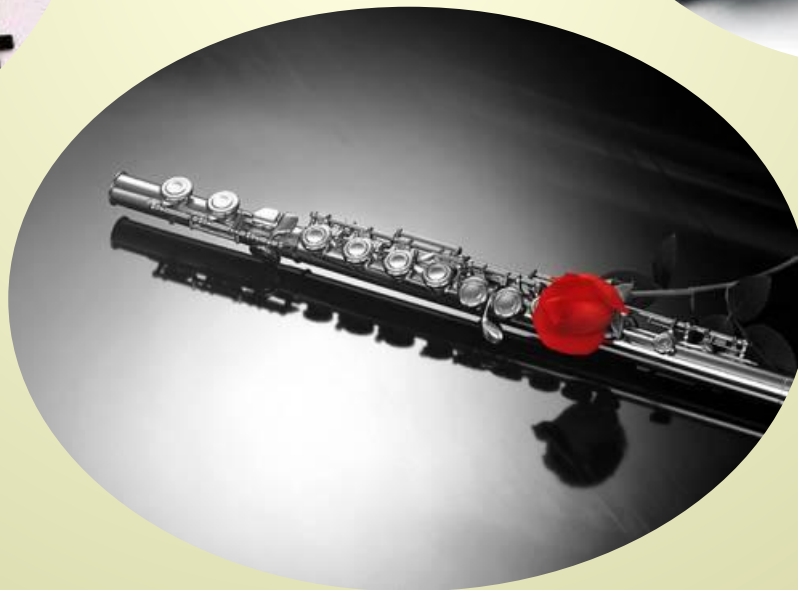
Генератор на транзисторе. Автоколебания.



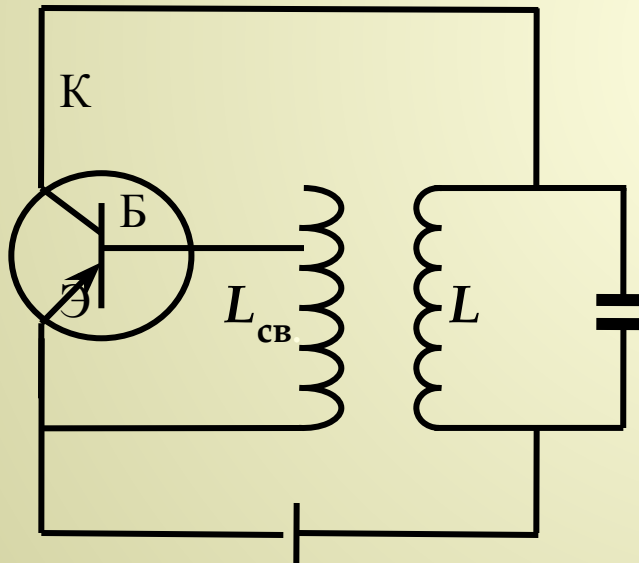
- Автоколебательной называется колебательная система, совершающая незатухающие колебания за счёт действия источника энергии, не обладающего колебательными свойствами.



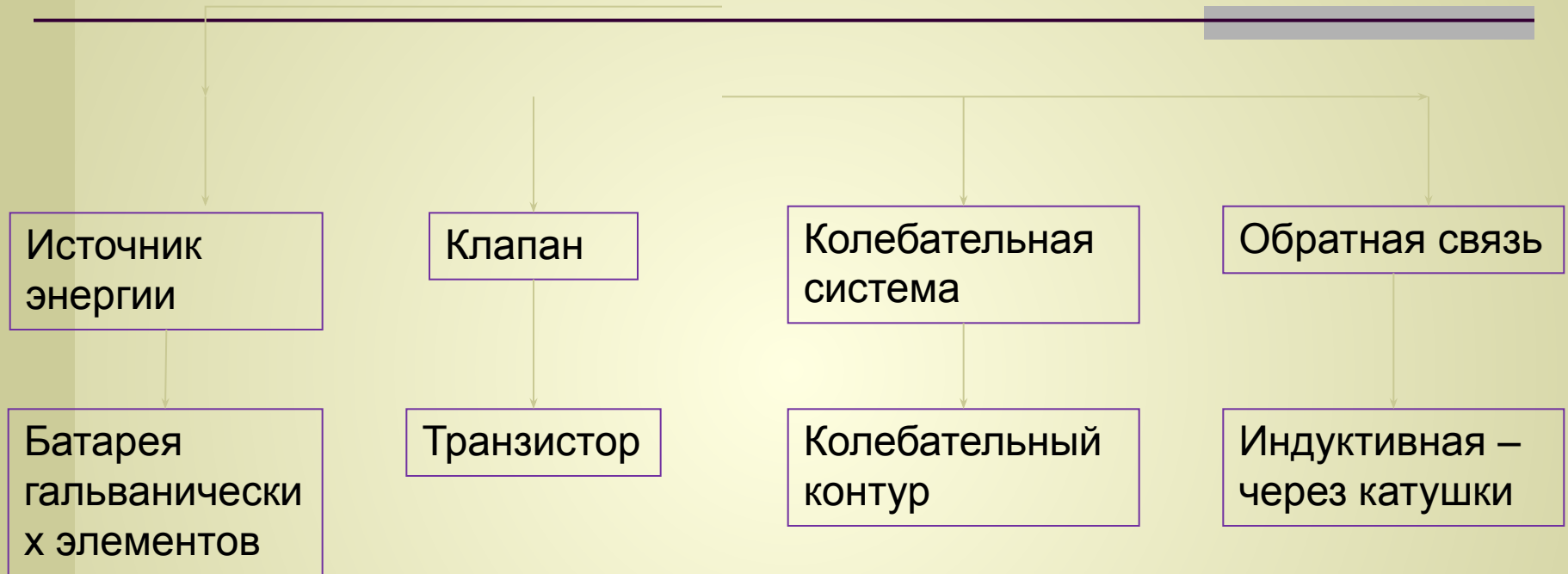
Например: часы, двигатель внутреннего сгорания, духовые инструменты.



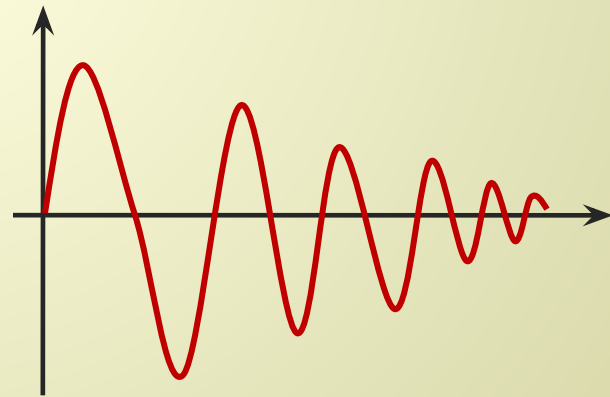
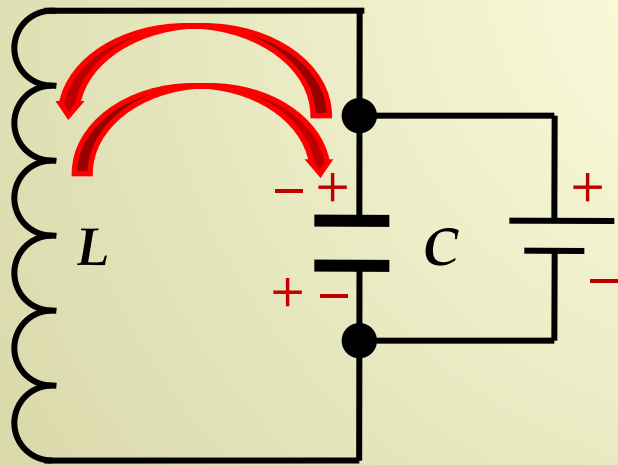
- Обратная связь в генераторе автоколебаний должна удовлетворять двум условиям:
- 1. энергия от источника должна поступать в такт с колебаниями в контуре.
- 2. поступающая от источника энергия должна быть равна её потерям в контуре.



Колебательная система состоит из:

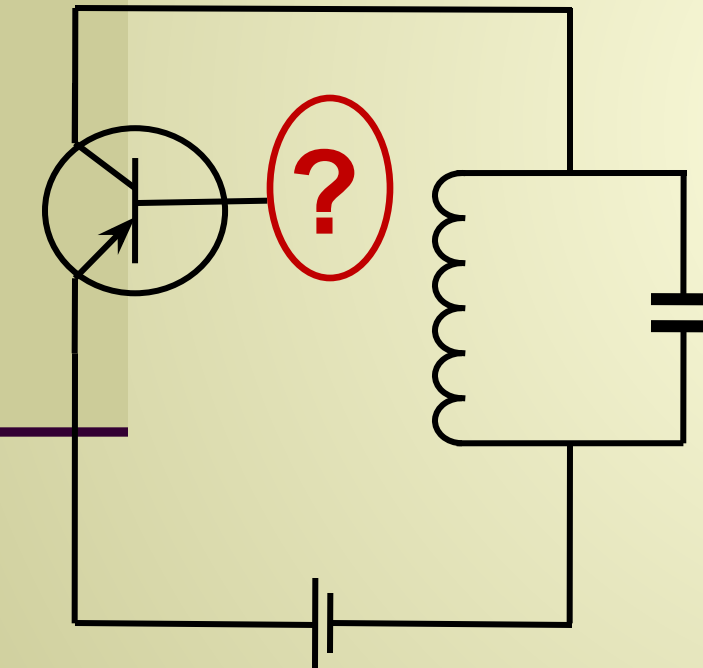


- Колебания в контуре происходит с большой частотой.
 - Конденсатор восполняет потери энергии лишь в те моменты, когда его полярность совпадает с полярностью источника.
-
- В те моменты, когда полярности противоположны, он будет разряжаться через источник.

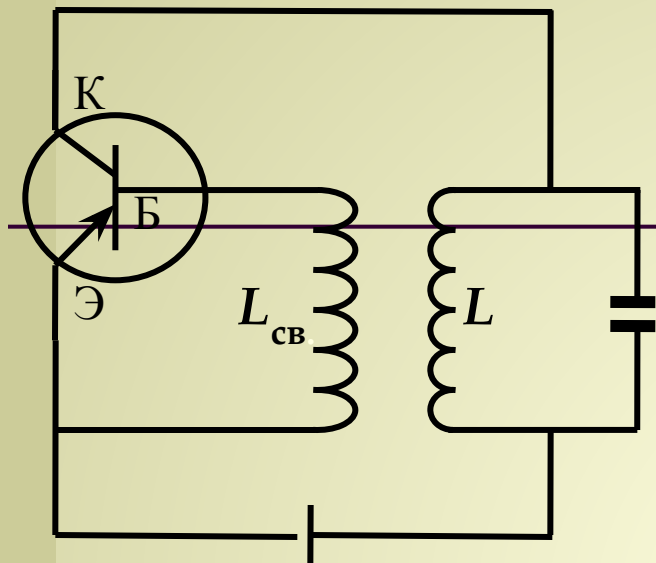


Очевидно, что обязательным условием получения незатухающих колебаний в контуре является восполнение потерь энергии именно в моменты совпадения полярности конденсатора и источника и отключение конденсатора от источника в другое время.

~~В качестве устройства, способного осуществить такую функцию можно использовать транзистор, через который конденсатор колебательного контура будет соединен с источником тока.~~



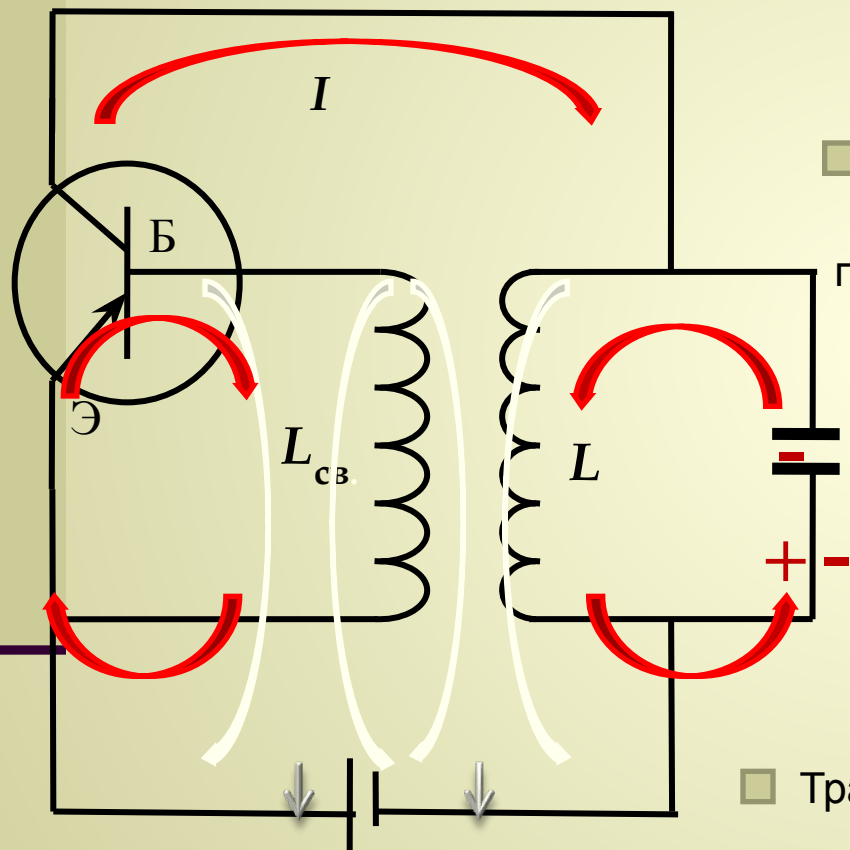
- быстродействующий прибор
- пока на базу не подан сигнал – ток через транзистор не идет, конденсатор отключен от источника
- при подаче сигнала – ток через транзистор идет и конденсатор заряжается от источника



В качестве устройства, способного «подать сигнал» в нужный момент, используют катушку обратной связи, один конец которой соединен с базой, а другой с эмиттером (связь индуктивная)

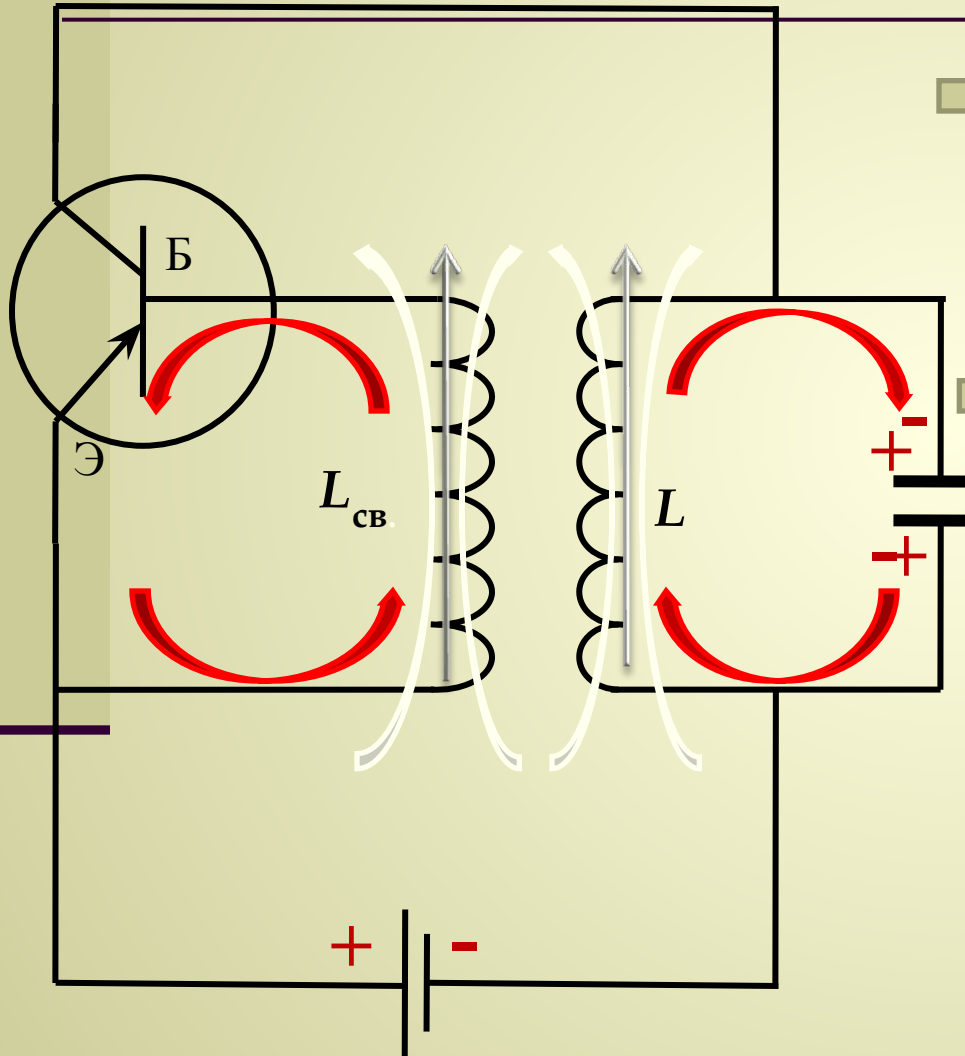
Мы получили систему, в которой могут вырабатываться незатухающие колебания за счет восполнения потерь энергии от источника внутри самой системы.

Процесс в автоколебательной системе:



- После зарядки конденсатора его верхняя обкладка заряжена положительно, нижняя - отрицательно
- Конденсатор начинает разряжаться через катушку. Ток в первой четверти периода постепенно нарастает, затем убывает, порождая переменное магнитное поле, пронизывающее витки катушки L .
- В катушке $L_{св}$, которая индуктивно связана с катушкой контура, возникает магнитное поле, имеющее такое же направление и появляется индукционный ток, направленный от эмиттера к базе.
- Транзистор пропускает ток к конденсатору, в котором в это время протекает еще индукционный ток, совпадающий по направлению с первоначальным. Все потери энергии восполняются, знаки зарядов пластин меняются на противоположные

- Ток через конденсатор теперь течет в противоположном направлении, нарастая в первой четверти и убывая во второй



- Порождаемое током магнитное поле, пронизывает витки катушки контура, а, следовательно, и индуктивно связанной с ней катушки $L_{св}$.

- В катушке обратной связи возникает индукционный ток, направленный от базы к эмиттеру, в результате чего потенциал базы оказывается выше и ток к конденсатору не идет.

- В конденсаторе протекает только индукционный ток, совпадающий по направлению с током в начале полупериода.

Конденсатор перезаряжается, знаки пластин меняются на противоположные.