

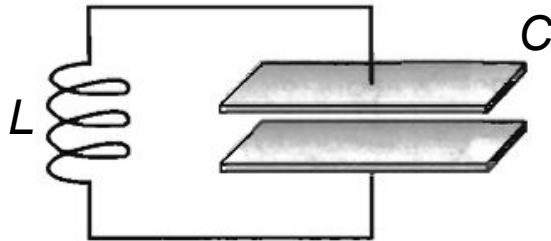


СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

- В электромагнитной теории рассматриваются **колебания электрического и магнитного полей**
- Так как главной силовой характеристикой электрического поля является **напряженность E** , а магнитного поля — **магнитная индукция B** , то фактически рассматриваются колебания E и B
- **Важно:** на практике также приходится рассматривать колебания величин, являющихся следствиями существования электрического и магнитного полей: **силы тока I , напряжения U , электрического заряда q , энергии W** и т.д.
- Общее название колебаний электрического и магнитного полей — **электромагнитные колебания**



- Простейшая электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки, в которой могут происходить **электромагнитные колебания**, называется **колебательным контуром**



- **Важно:** для того, чтобы в колебательном контуре начались электромагнитные колебания, конденсатор **надо зарядить** (т.е. сообщить контуру энергию в электрическом поле конденсатора)
- Если сопротивление проводов в колебательном контуре незначительно, то после зарядки конденсатора электромагнитные колебания продолжают неограниченно долго

Колебательный контур, в котором отсутствует электрическое сопротивление проводов, называется идеальным колебательным контуром

- В реальных колебательных контурах происходят **затухающие колебания**, т. к. энергия выделяется в проводах в виде тепла (по закону Джоуля–Ленца)



РАБОТА ИДЕАЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

1. Зарядка конденсатора

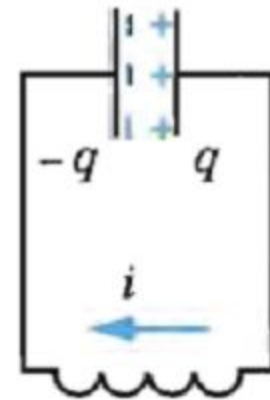
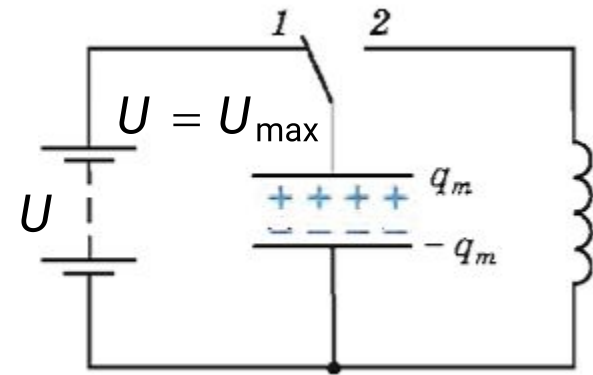
- При этом конденсатор получает энергию

$$W_e = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C} \quad C = \frac{q}{U}$$

2. Разрядка конденсатора

- В контуре появляется ток, который пытается увеличиться
- Но ЭДС самоиндукции в катушке препятствует мгновенному изменению тока (по правилу Ленца), поэтому ток в цепи растет медленно
- По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля в конденсаторе уменьшается, но за счет увеличения тока растет энергия магнитного поля в катушке

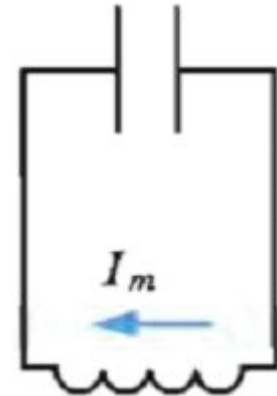
$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$



3. Конденсатор полностью разряжен

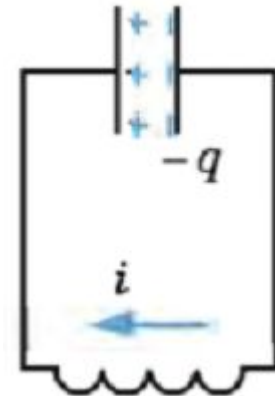
- Электрическое поле исчезает и энергия конденсатора становится равной нулю
- Но энергия магнитного поля катушки максимальна (согласно закону сохранения энергии)
- Значит, сила тока в контуре достигает максимального значения I_{\max}

$$W_m = \frac{LI_{\max}^2}{2}$$



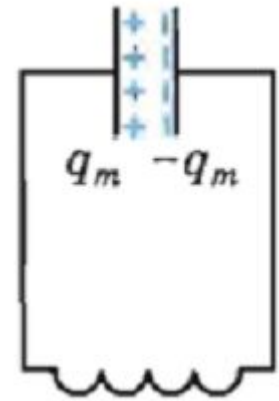
4. Обратная зарядка конденсатора

- Хотя конденсатор полностью разряжен и ток должен прекратиться, но ЭДС самоиндукции катушки сопротивляется уменьшению тока, поэтому ток уменьшается медленно
- Ток начинает заряжать конденсатор в противоположной полярности



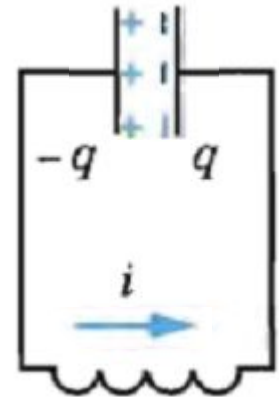
5. Полная обратная зарядка конденсатора

- Конденсатор заряжается до тех пор, пока сила тока в цепи не станет равной нулю
- При этом энергия магнитного поля катушки обратится в нуль, а энергия электрического поля конденсатора станет максимальной (и равной первоначально полученной от источника энергии)



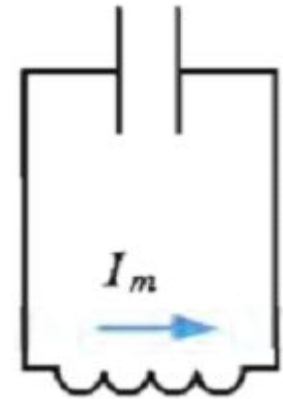
6. Обратная разрядка конденсатора

- В контуре появляется ток, который пытается увеличиться
- Но ЭДС самоиндукции в катушке препятствует мгновенному изменению тока, поэтому ток в цепи растет медленно
- По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля в конденсаторе уменьшается, но за счет увеличения тока растет энергия магнитного поля в катушке



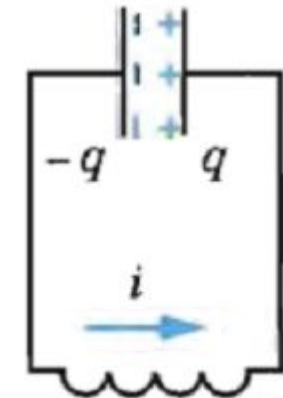
7. Конденсатор полностью разряжен

- Электрическое поле исчезает и энергия конденсатора становится равной нулю
- Но энергия магнитного поля катушки максимальна (согласно закону сохранения энергии)
- Значит, сила тока в контуре достигает максимального значения



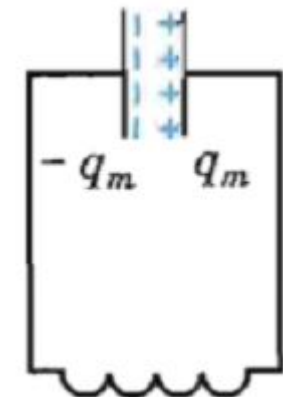
8. Прямая зарядка конденсатора

- Хотя конденсатор полностью разряжен и ток должен прекратиться, но ЭДС самоиндукции катушки сопротивляется уменьшению тока, поэтому ток уменьшается медленно
- Ток начинает заряжать конденсатор в первоначальной полярности



9. Полная зарядка конденсатора до исходного состояния

- Конденсатор заряжается до тех пор, пока сила тока в цепи не станет равной нулю
- При этом энергия магнитного поля катушки обратится в нуль, а энергия электрического поля конденсатора станет максимальной (и равной первоначально полученной от источника энергии)
- Колебательный контур возвращается в исходное состояние — произошло **одно полное электромагнитное колебание**



- **Важно:** так как идеальный колебательный контур — изолированная система, то полная энергия системы остается постоянной
- **Вывод:** в любой момент сумма энергий электрического поля в конденсаторе и магнитного поля в катушке равна начальной сообщенной контуру энергии:

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C}$$

- При электромагнитных колебаниях происходят колебания:
 - заряда на обкладках конденсатора
 - напряжения между обкладками конденсатора
 - энергии электрического поля в конденсаторе
 - силы тока в контуре
 - энергии магнитного поля в катушке
- **Важно:** электромагнитные колебания — это гармонические колебания, происходящие по закону синуса или косинуса

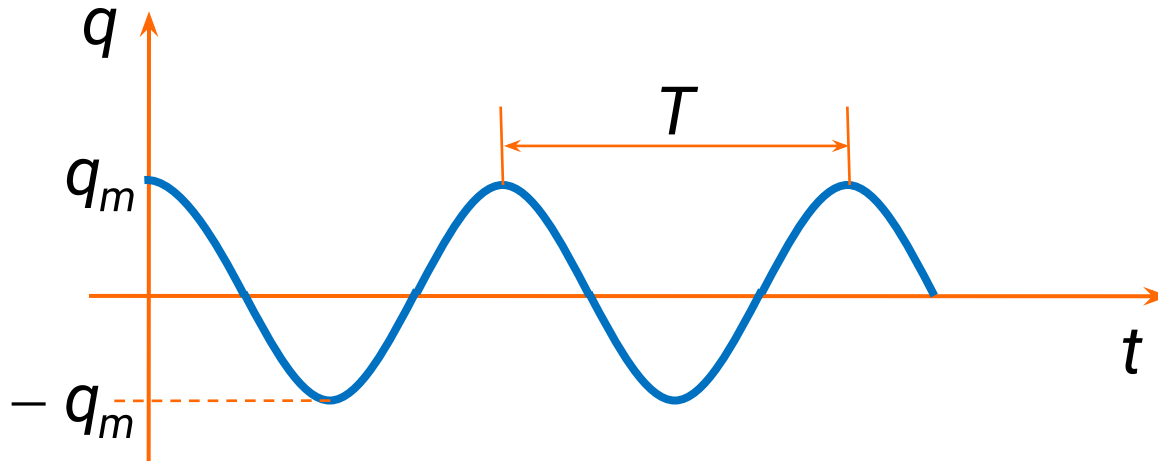




УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

- По аналогии с механическими колебаниями можно записать **уравнение гармонических колебаний заряда конденсатора**:

$$q = q_m \cos(2\pi\nu t) = q_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) = q_m \cos(\omega t); \quad q = q_m \cos(\omega t)$$



- Период T (или частота ν) колебаний зависит от параметров колебательного контура и подчиняется **формуле Томсона**:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad \nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



- Из уравнения колебаний заряда можно получить уравнение колебаний напряжения на конденсаторе:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t)$$

$$U_m = \frac{q_m}{C}$$

$$U = U_m \cos(\omega t)$$

- Также можно получить уравнение колебаний силы тока в цепи и, соответственно, в катушке:

$$I = \frac{dq}{dt} = q' = (q_m \cos \omega t)' = -q_m \sin \omega t \cdot \omega = -\omega q_m \sin \omega t$$

$$I_m = \omega q_m$$

$$I = -I_m \sin(\omega t)$$

$$I = -I_m \sin(\omega t) = I_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

- Важно:** колебания тока в контуре опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на $\pi/2$:

