

Физика. Занятие №7, 21.10.2024

Рудяк А.С., СГУ им. Чернышевского
2 курс, «Программная инженерия»

Саратов, 2024

Содержание

Экстратоки размыкания и замыкания	2
Взаимная индукция	3
Скин-Эффект	5
Энергия магнитного поля	6
Переменный тока	7
Закон Ома для цепи переменного тока	9

Экстратоки размыкания и замыкания

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС ε возникает ЭДС самоиндукции ε_s

$I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_s}{R} = \left(\varepsilon - L \frac{dI}{dt} \right) = I_0 - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{I - I_0} = -\frac{R}{L} dt$ Заменяем переменную: $I - I_0 = a \Rightarrow dI = da$

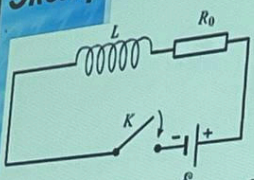
$$\int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \int_0^t -\frac{1}{\tau} dt$$

В момент замыкания $t = 0$ сила тока $I = 0$, переменная $a_0 = -I_0$, в момент времени t сила тока I , переменная $a = I - I_0$

15

Экстратоки размыкания и замыкания

При замыкании цепи помимо внешней ЭДС ε возникает ЭДС самоиндукции ε_s .



$$I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_s}{R} = \frac{\varepsilon - L \frac{dI}{dt}}{R} = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{L}{R} \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{I - I_0} = -\frac{R}{L} dt$$

Замена переменных: $I - \underbrace{I_0}_{const} = \underbrace{a}_{переменная} \Rightarrow dI = da$

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{a} = \int_0^t -\frac{1}{\tau} dt \Rightarrow$$

В момент замыкания $t = 0$ сила тока $I = 0$, переменная $a_0 = -I_0$,
в момент времени t сила тока I ,
переменная $a = I - I_0$

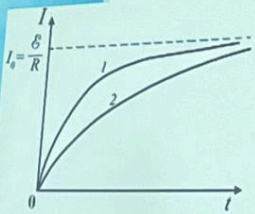
Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Установление тока происходит тем быстрее, чем меньше L цепи и больше её сопротивление R

16

Экстратоки размыкания и замыкания

$$\ln a \Big|_{a_0}^a = -\frac{t}{\tau} \Big|_0^t \Rightarrow \ln(I - I_0) \Big|_0^I = -\frac{t}{\tau} \Rightarrow$$

$$I - I_0 = -I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; I = I_0 - I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$


Установление тока происходит тем быстрее, чем меньше L цепи и больше её сопротивление R

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Взаимная индукция

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1$$

Если I_1 изменяется, то в контуре 2 индуцируется ЭДС:

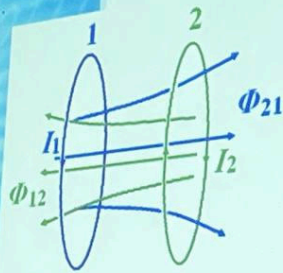
$$\varepsilon_{\text{ин}2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Если в контуре 2 изменяется I_2 , то в контуре 1 изменение магнитного потока индуцирует ЭДС

$$\varepsilon_{\text{ин}1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

Явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется **взаимной индукцией**

Взаимная индукция



$$\Phi_{21} = L_{21} I_1,$$

Если I_1 изменяется, то в контуре 2 индуцируется ЭДС

$$\varepsilon_{ин2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

Если в контуре 2 изменяется I_2 , то в контуре 1 изменение магнитного потока индуцирует ЭДС

$$\varepsilon_{ин1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$

Явление возникновения ЭДС в одном из контуров при изменении силы тока в другом называется **взаимной индукцией**.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Коэффициенты $L_{12} = L_{21}$ — **взаимная индуктивность** контуров зависят от:

1. Геометрической формы
2. Размеров
3. Взаимного расположения
4. Магнитной проницаемости среды μ

$$L_{12} = L_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l}$$

Трансформатор — служат для повышения или понижения напряжения переменного тока:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = K$$

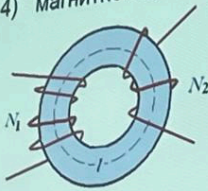
$K > 1$ — повышающий трансформатор, $K < 1$ — понижающий

18

Взаимная индукция

Коэффициенты $L_{12} = L_{21}$ — взаимная индуктивность контуров зависят от

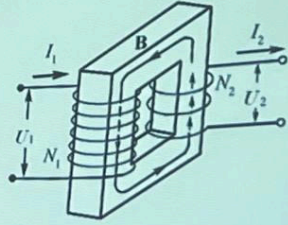
- 1) геометрической формы,
- 2) размеров,
- 3) взаимного расположения,
- 4) магнитной проницаемости среды μ .



$$L_{12} = L_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l},$$

Трансформатор — служат для повышения или понижения напряжения переменного тока:

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = K$$

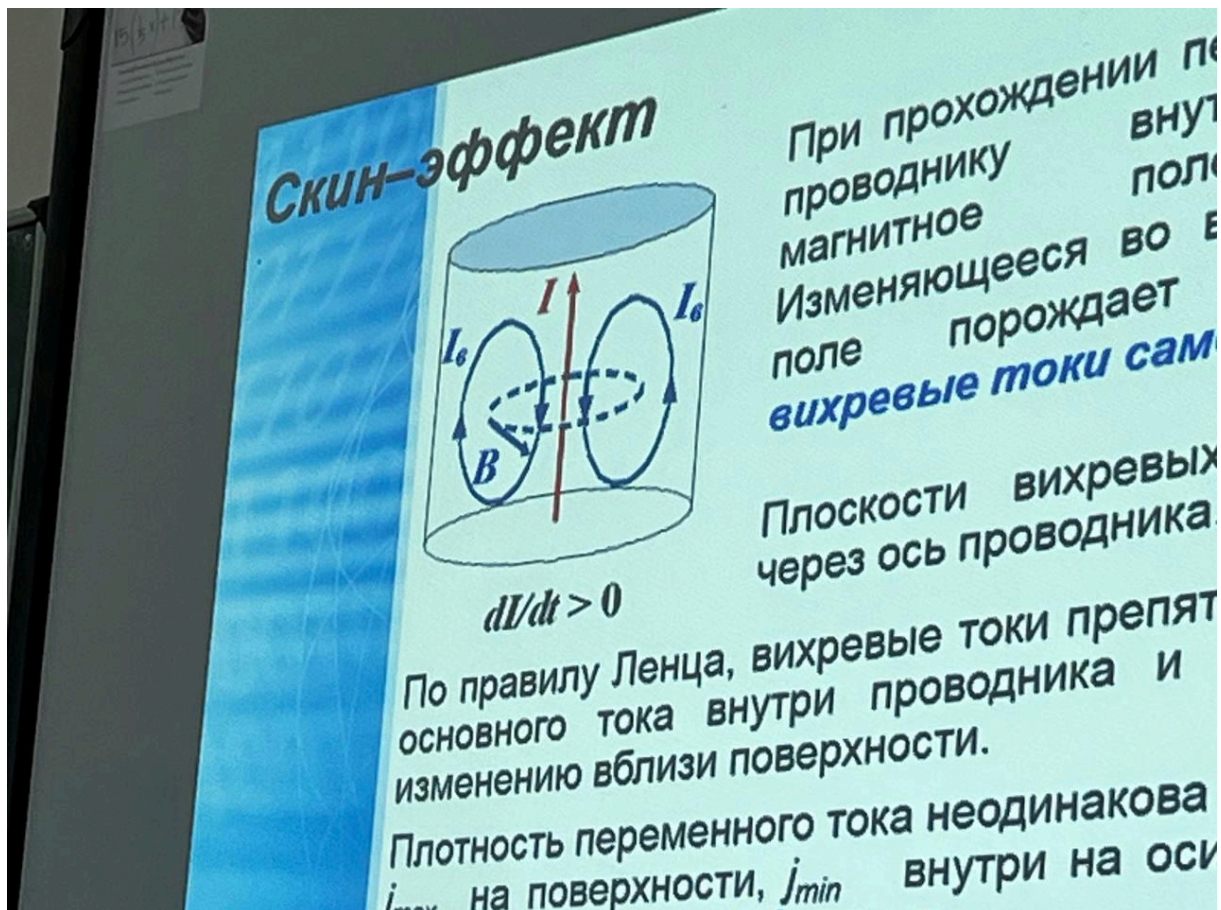


$K > 1$ — повышающий трансформатор
 $K < 1$ — понижающий трансформатор

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Скин-Эффект

При вхождении переменного тока по проводнику внутри проводника магнитное поле изменяется. Изменяющееся во времени магнитное поле порождает в проводнике вихревые токи самоиндукции. Плоскости вихревых токов проходят через ось проводника. По правилу Ленца, вихревые токи препятствуют изменению основного тока внутри проводника и способствуют его изменению вблизи поверхности. Плотности переменного тока неодинакова по сечению: j_{\max} на поверхности, j_{\min} внутри на оси — такое явление называется **скин-эффектом**. ВЧ токи текут по тонкому поверхностному слою, поэтому проводники для них делают полыми, а часть внешней поверхности покрывают серебром.



Энергия магнитного поля

$$dA = \varepsilon_s I dt = -L \frac{dI}{dt} I dt = -LI dI$$

$$A = W = \int dA = \int_0^1 LI dI = \frac{LI^2}{2}$$

$\omega = \frac{W}{V}$ — объёмная плотность энергии магнитного поля.

1. $L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$
2. $B = \frac{\mu\mu_0 NI}{l} \Rightarrow I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$
3. $B = \mu\mu_0 H$

Из 1, 2 и 3 следует:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \cdot V = \frac{BH}{2} \cdot V$$

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{BH}{2}$$

Магнитное поле соленоида однородное и сосредоточено внутри него.

Переменный ток

ФС:

1. Электромагнитное поле в динамическом режиме работает от источника гармонического типа
2. Поле взаимодействует со свободными электронами
3. Электроны совершают гармонические колебания
4. ЭДС для витка, вращающегося в постоянном магнитном поле с угловой скоростью ω (Значение равно 314 в России)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t)$$

5. Из з-на Ома $I(t) = I_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$
6. Электромагнитная волна поля имеет период $T = \frac{2\pi}{\omega}$
7. Напряжение на источнике $U(t) = U_0 \cos(\omega t)$
8. Воспользуемся классическим приближением (R, C, L)

Синусоидальный переменный ток имеет целый ряд преимуществ:

1. От генератора постоянного тока получить высокие напряжения практически невозможно
2. Генератор и двигатель переменного тока значительно проще по конструкции, надежнее и дешевле генератора и двигателя постоянного тока
3. При необходимости переменный ток можно преобразовать в постоянный ток
4. Переменный ток можно трансформировать, то есть повышать или понижать его напряжение с помощью трансформаторов.

В быту используется **квазистационарный** переменный ток — ток, который во всех сечениях неразветвленной электрической цепи имеет одинаковую силу тока. К мгновенным значениям квазистационарных токов можно применять законы Ома и правила Кирхгофа.

Основные характеристики переменного синусоидального тока

1. Эффективным (или действующим) значением переменного тока $I_{\text{эфф}}$ называется такая величина силы постоянного тока, который оказывал бы в цепи такое же тепловое воздействие

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\text{эфф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

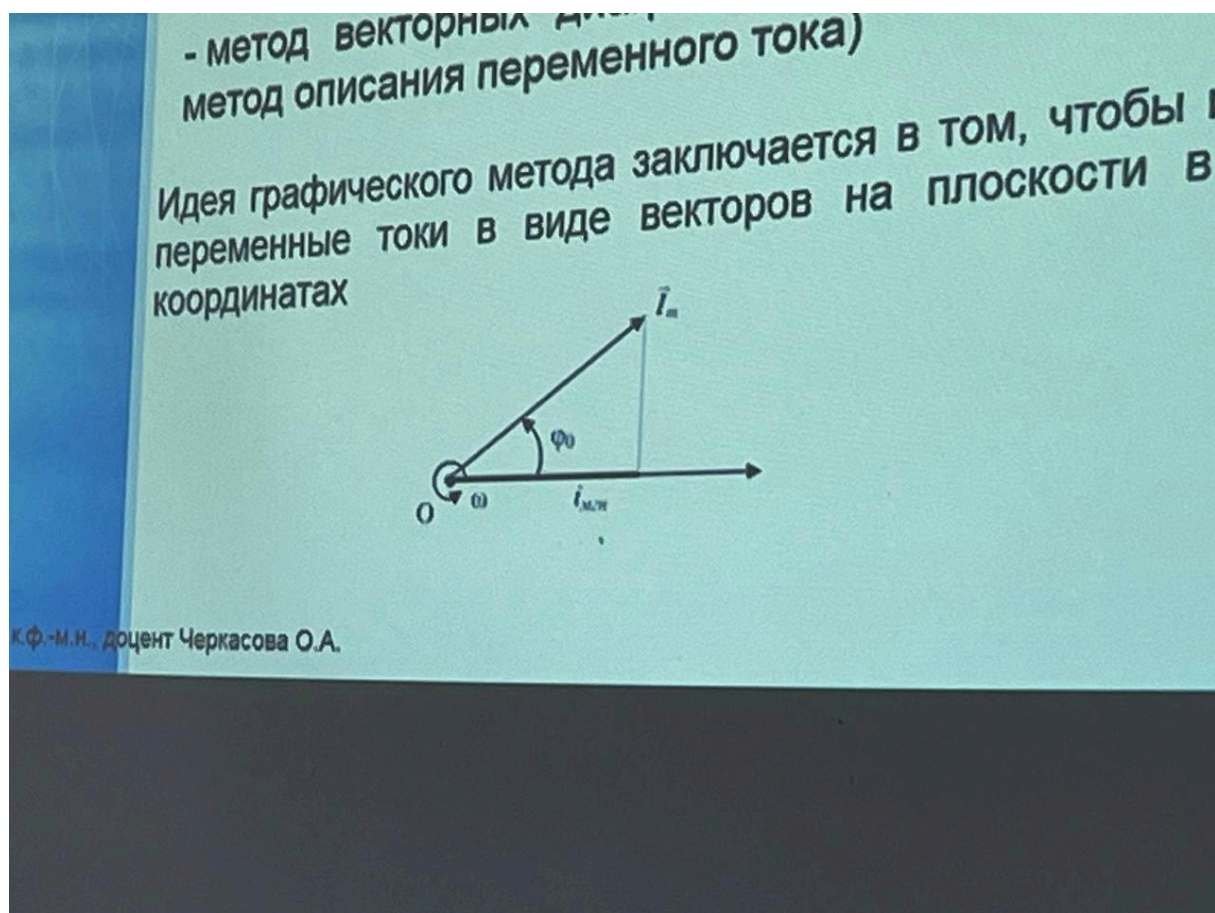
2. Если при прохождении тока через элемент цепи происходит **только необратимое превращение электрической энергии в теплоту**, то сопротивление такого участка цепи называют **активным**. Если такого превращения не происходит, то сопротивление называют **реактивным**

$$R = \frac{U_m}{I_m}$$

Математическое описание переменного тока:

- Аналитический метод (с помощью тригонометрических функций)
- Символический метод (с помощью комплексных чисел)
- Метод векторных диаграмм (используется графический метод описания переменного тока)

Идея графического метода заключается в том, что изображать переменные токи в виде векторов на плоскости в полярных координатах



Закон Ома для цепи переменного тока

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

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

закон Ома для цепи переменного тока только с активным сопротивлением

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

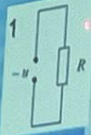
$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t), \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}, R_L = 0$$

По правилу Кирхгофа:

$$\varepsilon = -\varepsilon_s \Rightarrow \varepsilon = L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin(\omega t)$$

25

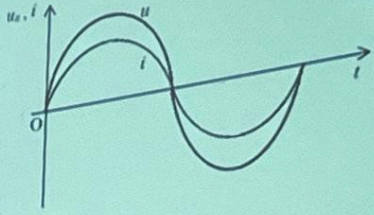
Закон Ома для цепи переменного тока

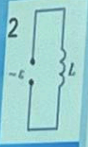


1

$$U = U_m \sin \omega t \quad I = I_m \sin \omega t$$

закон Ома для цепи переменного тока
только с активным сопротивлением

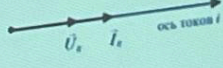




2

$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

Векторная диаграмма



ось токов i

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t \quad \varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt} \quad R_L = 0$$

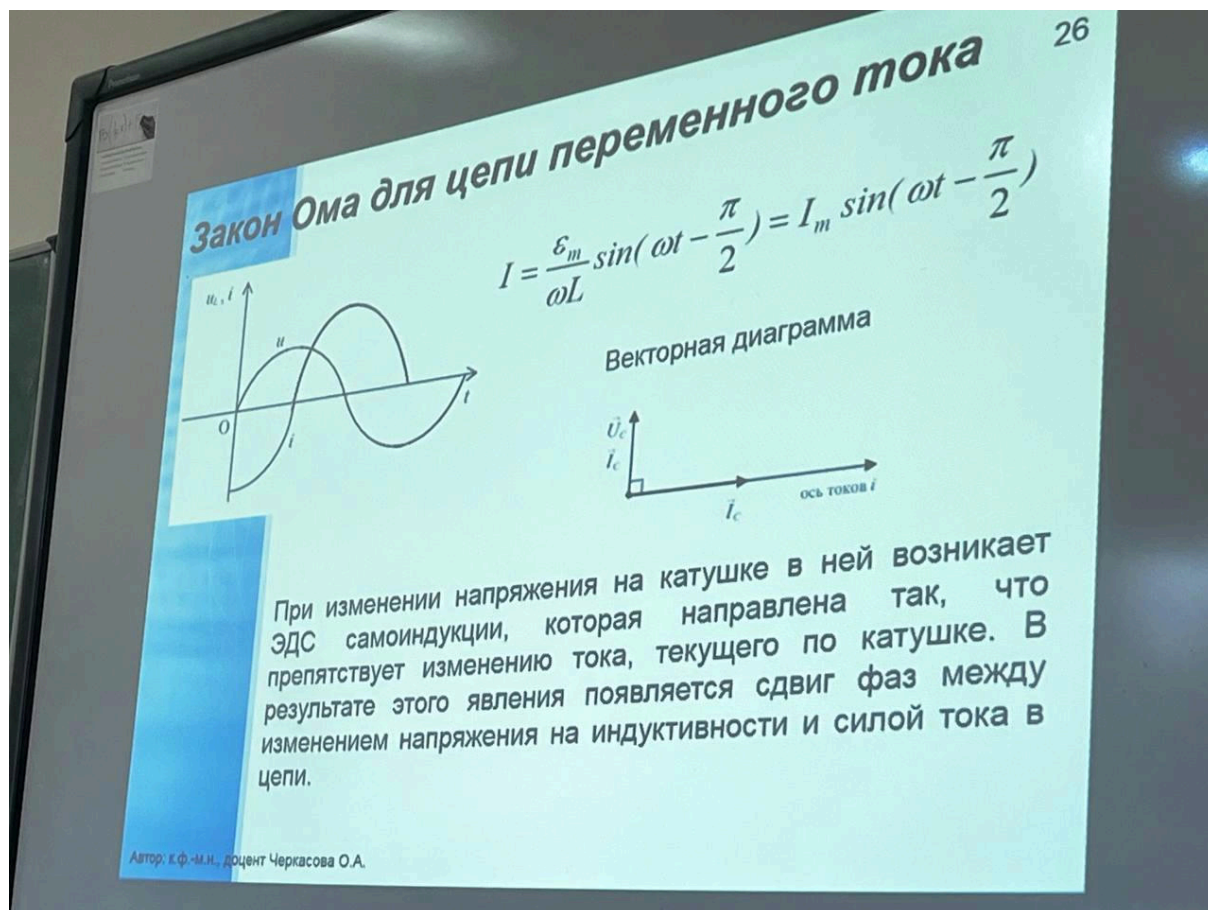
По правилу Кирхгофа

$$\varepsilon = -\varepsilon_S \Rightarrow \varepsilon = L \frac{dI}{dt} \Rightarrow \frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon}{L} = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

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

При изменении напряжения на катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая направлена так, что препятствует изменению тока, текущего по катушке. В результате этого явления появляется сдвиг фаз между изменением напряжения на индуктивности и силой тока в цепи.

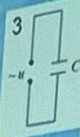


$$U = U_m \sin(\omega t)$$

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{dCU}{dt} = C\omega U_m \cos(\omega t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

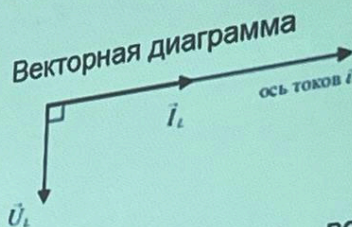
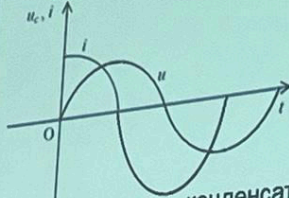
При накоплении конденсатором электрического заряда, во внешней цепи возникает электрическое поле, создаваемое зарядом конденсатора и направленное навстречу полю источника тока. Таким образом, возникает разность фаз между напряжением на конденсаторе и силой тока в цепи. Напряжение на конденсаторе достигает максимального значения, когда величина внешнего поля источника ЭДС сравнима с полем заряда конденсатора, направленного навстречу ему. В этот момент ток в цепи становится равным нулю.

Закон Ома для цепи переменного тока



$$U = U_m \sin \omega t$$

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{dCU}{dt} = C\omega U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

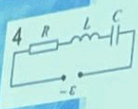


При накоплении конденсатором электрического заряда, во внешней цепи возникает электрическое поле, создаваемое зарядом конденсатора и направленное навстречу полю источника тока. Таким образом, возникает разность фаз между напряжением на конденсаторе и силой тока в цепи. Напряжение на конденсаторе достигает максимального значения, когда величина внешнего поля источника ЭДС сравнима с полем заряда конденсатора, направленного навстречу ему. В этот момент ток в цепи становится равным нулю

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Для преобразования переменного тока в постоянный требуется, чтобы $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. Если будет преобладать индукционное сопротивление ωL , то сила тока в цепи будет уменьшаться и увеличиваться напряжение.

Закон Ома для цепи переменного тока



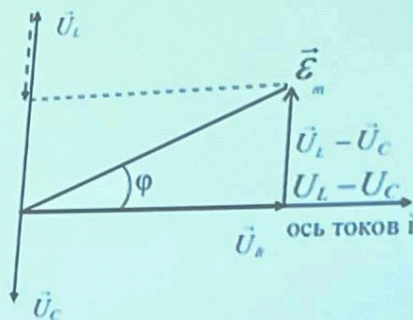
$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t \quad I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$$

По 2 правилу Кирхгофа $U_R + U_C = \varepsilon + \varepsilon_S$

$$IR + \frac{1}{C} \int I dt = \varepsilon - L \frac{dI}{dt} \Rightarrow IR + \frac{1}{C} \int I dt + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon$$

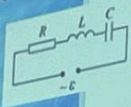
$$U_R \cos(\omega t - \varphi) + U_C \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) + U_L \cos(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) = \varepsilon_m \cos \omega t$$

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$



Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Мощность в цепи переменного тока



$$U = U_0 \sin \omega t$$

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$P(t) = I(t)U(t) = \underbrace{\frac{1}{2} I_0 U_0 \cos \varphi}_{P_a} + \underbrace{\frac{1}{2} I_0 U_0 \cos(2\omega t + \varphi)}_{P_r(t)}$$

$$P_{cp} = P_a$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

В случае, если $\cos \varphi = 1$, то все подключенные элементы к цепи будут потреблять ток. Если же косинус близок к нулю, то скорость разрядки конденсатора будет быстрее зарядки.