

Московский государственный строительный
университет



Кафедра автоматизации и электроснабжения

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. Электрические и магнитные цепи. Электрические измерения

Лекция 2. Отдельные электроприемники в однофазной цепи переменного тока

Электронные лекции

Составитель:

доцент И.Г. Забора

Москва – 2016 г.

Лекцию читает

**Доцент кафедры
«Автоматизация и электроснабжение» МГСУ**

Забора Игорь Георгиевич

E-mail: izabora@yandex.ru

Однофазный переменный ток



Цепи синусоидального тока. Их преимущества и применение

Наибольшее распространение в энергетике получили *электрические цепи синусоидального тока*. По сравнению с постоянным током *синусоидальный ток имеет ряд преимуществ*: производство, передача, распределение и использование электрической энергии наиболее экономичны при синусоидальном токе. В цепях синусоидального тока, в отличие от постоянного, можно относительно просто, с помощью специальных электрических машин – *трансформаторов* преобразовывать напряжения разной величины при сохранении частоты и синусоидальной формы напряжений и токов. Кроме этого, коэффициент полезного действия генераторов, электродвигателей и трансформаторов при синусоидальной форме тока оказывается наиболее высоким.

В силу своих преимуществ, цепи синусоидального тока используются в электроснабжении и в различных электротехнических устройствах в промышленности, строительстве, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве и др.



Однофазный переменный ток

Основные характеристики синусоидального тока

В линейных цепях синусоидального тока напряжение, электродвижущая сила (ЭДС) и ток являются синусоидальными функциями времени:

$$\begin{aligned}u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u) ; \\e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e) ; \\i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i) ,\end{aligned}$$

где u , e , i – соответственно *мгновенные значения* напряжения, ЭДС и тока, то есть значения этих величин в рассматриваемый момент времени $t = t_1$; $\omega t + \psi_u$, $\omega t + \psi_e$, $\omega t + \psi_i$ – *аргументы* синусоидальных функций, которые называются *фазой* или *фазовым углом*.

Фаза отсчитывается по оси абсцисс в радианах или градусах от точки перехода синусоидальной функции через ноль до значения аргумента в рассматриваемый момент времени.

Графики мгновенных значений синусоидальных напряжения u и тока i показаны на рис. 1.

Однофазный переменный ток



Основные характеристики синусоидального тока

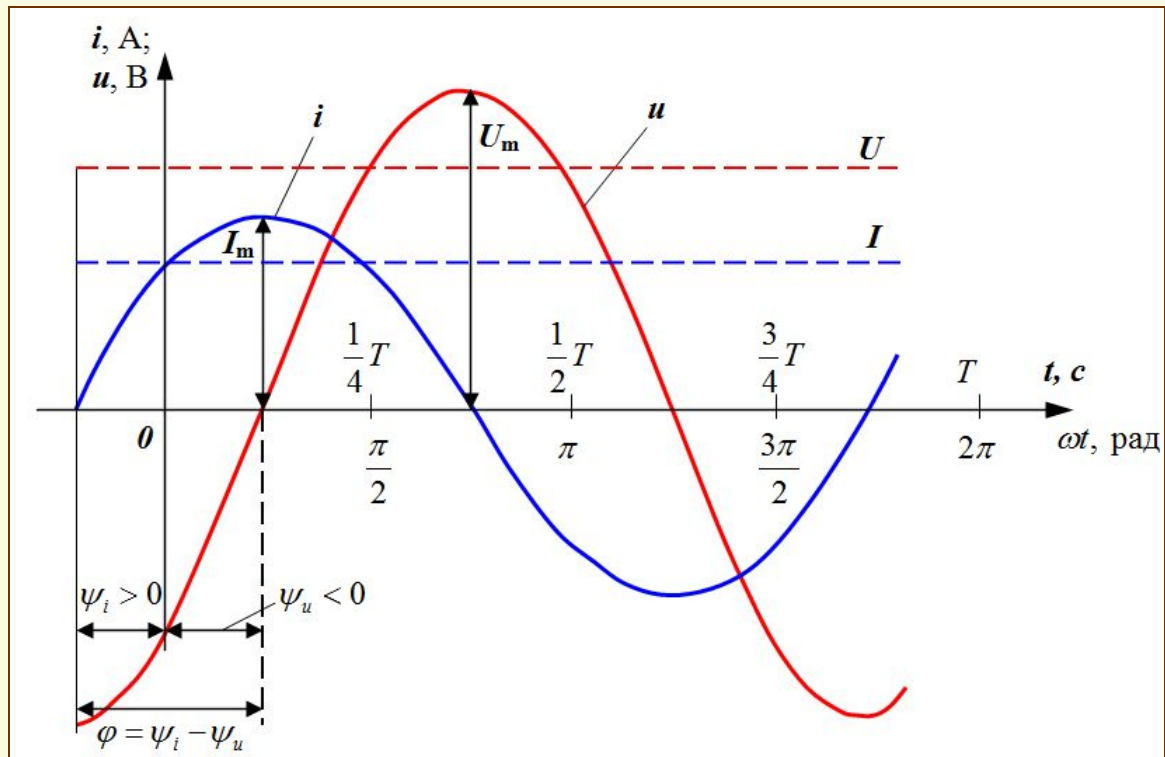


Рис.1. Графики мгновенных значений синусоидальных величин тока i и напряжения u и их действующие значения I и U

Однофазный переменный ток



Основные характеристики синусоидального тока

Синусоидальная функция времени в электрических цепях переменного тока однозначно определяется тремя параметрами:

Амплитуда синусоидального напряжения u , ЭДС e и тока i : U_m, E_m, I_m (амплитуда – максимальное значение синусоидальной функции);

угловая частота ω , рад/сек (угловая частота – скорость изменения аргумента синусоидальной функции);

начальная фаза ψ_u, ψ_e, ψ_i (начальная фаза – значение аргумента синусоидальной функции в момент начала отсчета времени, то есть при $t = 0$ измеряемое в радианах или градусах).

Кроме того, для характеристики синусоидальных функций времени используют следующие величины:

Период $T = 2\pi/\omega$, с – наименьший интервал времени, по истечении которого мгновенные значения периодической величины повторяются.

Частота $f = 1/T$ определяет число периодов в секунду.

Единица частоты – **герц (Гц)**. $1 \text{ Гц} = 1 \text{ сек}^{-1}$.

Однофазный переменный ток



Основные характеристики синусоидального тока

Промышленная частота всех энергетических систем в России и других развитых стран за исключением США, Канады и Японии (где $f = 60$ Гц) равна 50 Гц, то есть 50 периодов в секунду, а длительность одного периода при этом составляет $1/50 = 0,02$ сек = 20 мсек).

Сдвиг фаз между напряжением и током ϕ – алгебраическая величина, определяемая разностью начальных фаз напряжения и тока $\phi = \psi_u - \psi_i$, рад;

Действующее значение напряжения U , ЭДС E , тока I .

Действующее значение – это среднеквадратичное значение синусоидальных величин напряжения u , ЭДС e и тока i за один период времени.

Действующее значение синусоидального напряжения:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_m \sin \omega t)^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,71 U_m$$

То есть действующее значение синусоидального напряжения в $\sqrt{2} \approx 1,41$ меньше амплитуды этого напряжения.

Однофазный переменный ток



Основные характеристики синусоидального тока

Поэтому, если действующее значение переменного напряжения равно 220 В, имея частоту 50 Гц, то амплитудное значение этого напряжения достигает дважды за период или 100 раз в секунду величины $U_m \approx 1,41U = 1,41 \cdot 220 = 310$ В.

Аналогично определяется действующее значение синусоидального тока:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707I_m$$

С физической точки зрения *действующее значение синусоидального тока равно такому значению постоянного тока, который за время равное одному периоду выделяет в том же резисторе такое же количество тепла, как и синусоидальный ток.*

В паспорте электротехнических устройств синусоидального тока указаны действующие значения напряжений и токов.

Большинство электроизмерительных приборов, применяемых для измерения синусоидальных напряжений и токов, градуированы в действующих значениях.

Однофазный переменный ток



Представление синусоидальных величин векторами

Представления синусоидальных функций при помощи векторов (векторных диаграмм), как показано на [рис. 2](#), позволяет наглядно показать количественные и фазовые соотношения между разными напряжениями, токами и широко используется при объяснении процессов в цепях переменного тока.

Синусоидальную функцию времени t или угла поворота ωt ([рис. 2,а](#)) можно представить в виде проекции на вертикальную ось вращающегося с угловой скоростью ω *вектора*, как показано на [рис. 2,б](#).

Легко убедиться, что *векторы* \dot{U}_m и \dot{I}_m , *вращающиеся с одной угловой скоростью* ω , для любого момента времени сохраняют неизменным *сдвиг фаз* ϕ между напряжением и током: $\phi = \psi_u - \psi_i = \text{const}$.

Поэтому все векторы на векторной диаграмме *взаимно неподвижны*.

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные ЭДС, напряжения и токи одной частоты, относящиеся к одной цепи, называют векторной диаграммой.

Однофазный переменный ток



Представление синусоидальных величин векторами

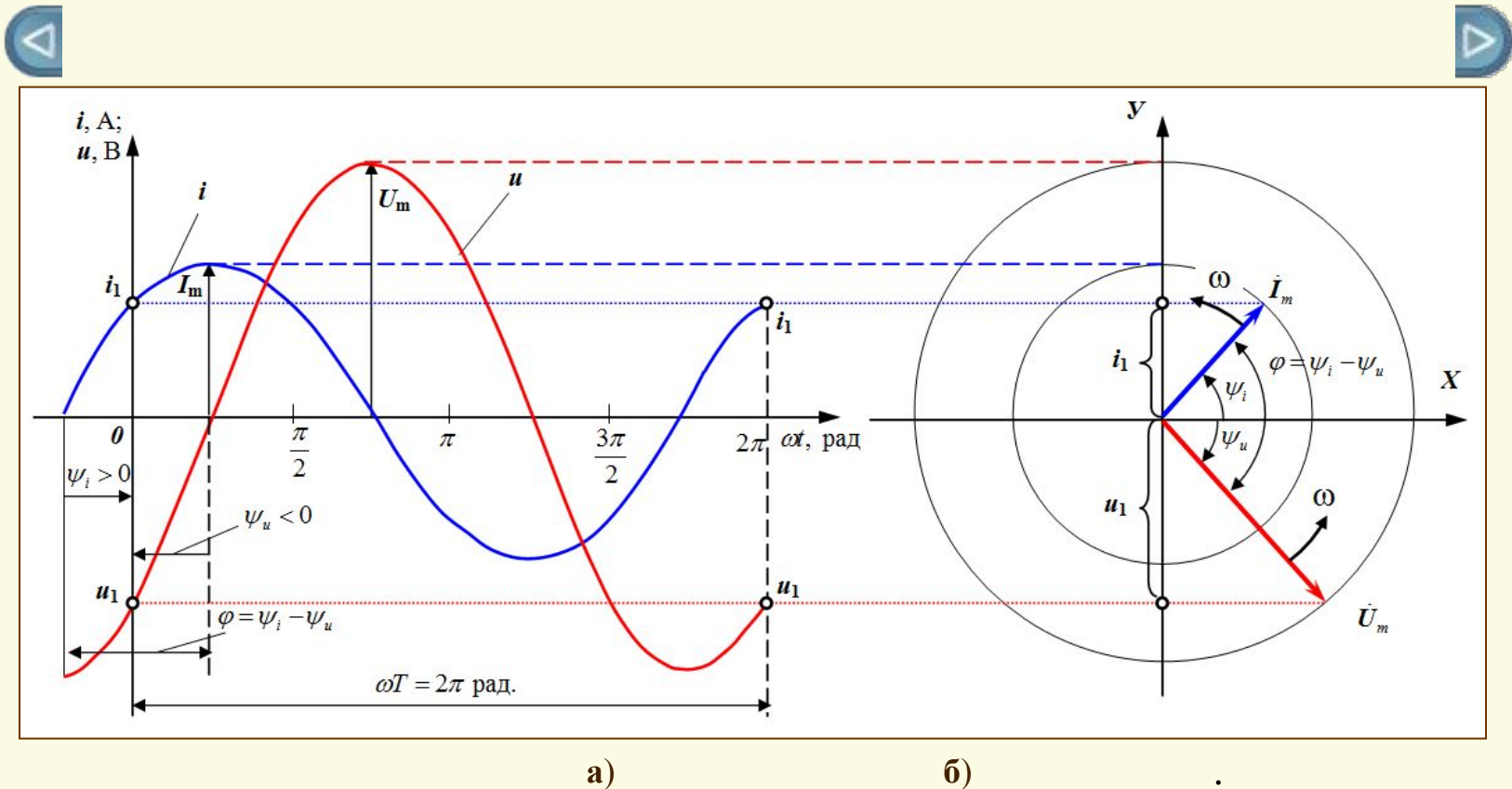


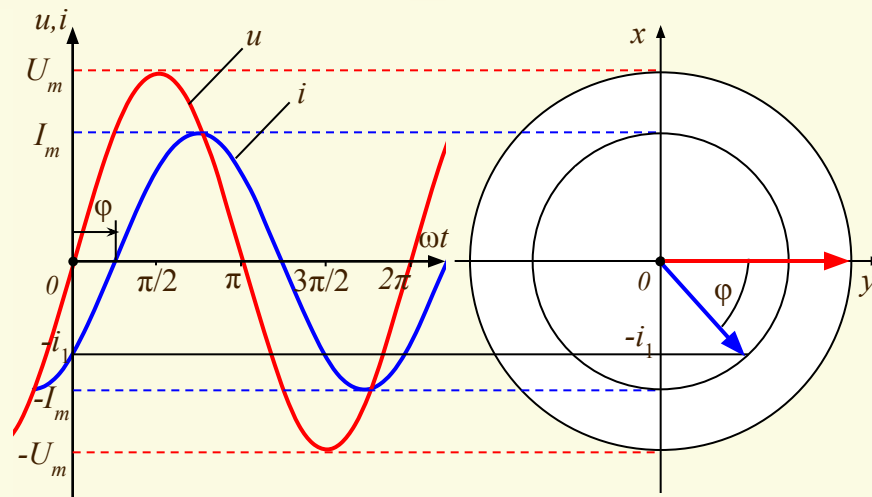
Рис.2. Соответствие синусоидальных функций u , i и вращающихся векторов \dot{U}_m и \dot{I}_m
а) – графики мгновенных значений синусоидальных величин напряжения и тока;
б) – вращающиеся с угловой скоростью ω векторы \dot{U}_m и \dot{I}_m

Однофазный переменный ток



Представление синусоидальных функций вращающимися векторами

Соответствие синусоидальных функций напряжения и тока u, i и вращающихся с угловой скоростью ω векторов U, I



Однофазный переменный ток



Представление синусоидальных величин векторами

В электротехнике принято оперировать *действующими значениями* величин токов I и напряжений U . Поэтому *длины векторов на векторных диаграммах соответствуют не амплитудным, а действующим значениям*, которые приблизительно в 1,41 раз меньше амплитудных значений соответствующих величин.

Углы наклона векторов напряжения и тока к оси абсцисс равны начальным фазам ψ_u и ψ_i (рис. 2,б). Таким образом, *неподвижные векторы определяют два параметра синусоидальной величины: действующее значение и начальную фазу. Третий параметр – угловая частота ω должен быть заранее известен.*

За положительное направление вращения векторов с угловой скоростью ω принято направление вращения против часовой стрелки. *Первый по вращению вектор считается опережающим следующий за ним вектор на угол ϕ* , который, в свою очередь, считается *отстающим* на тот же угол ϕ относительно первого вектора. Например, на рис. 2 вектор тока I_m опережает вектор напряжения U_m на фазовый угол ϕ .

Однофазный переменный ток



Представление синусоидальных величин векторами

Применение векторных диаграмм делает простым и наглядным анализ электрической цепи переменного тока. При этом сложение и вычитание мгновенных значений синусоидальных величин можно заменить геометрическим сложением и вычитанием их векторов.

Представления синусоидальных функций при помощи векторных диаграмм позволяет наглядно показать количественные и фазовые соотношения между разными напряжениями, токами и широко используется при объяснении электротехнических процессов в цепях переменного тока.

Однофазный переменный ток



Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

Резистивный элемент или *резистор* характеризуется *активным сопротивлением* R , которое является его параметром и отражает наличие *электрического сопротивления* *проходящему току* в замкнутой цепи переменного синусоидального тока.

Для участка цепи с резистивным элементом в цепи синусоидального тока справедлив *закон Ома*: *Мгновенное значение синусоидального тока i_R на участке электрической цепи с резистором прямо пропорционально напряжению на резисторе u_R и обратно пропорционально активному сопротивлению R этого участка*:

$$i_R = \frac{u_R}{R}$$

Следует отметить, что *резистор с активным сопротивлением R рассматривается как линейный элемент, не зависящий от величины тока, напряжения и частоты*, то есть $R = \text{const}$.

Наименование элемента – *резистор* часто заменяется наименованием его параметра – *активное сопротивление*.



Однофазный переменный ток

Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

Если на участке цепи к резистору приложено синусоидальное напряжение

$$u_R = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u),$$

то из закона Ома следует, что ток i_R , текущий через резистор также будет синусоидальным:

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{U_{Rm}}{R} \sin(\omega t + \psi_u).$$

Закон Ома справедлив и для действующих значений тока и напряжения:

$$I_R = \frac{U_R}{R}; \quad U_R = I_R R; \quad R = \frac{U_R}{I_R}.$$

Ток и напряжение на участке цепи с резистором совпадают по фазе, а угол сдвига по фазе между синусоидальными током и напряжением φ всегда равен нулю:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

Однофазный переменный ток



Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

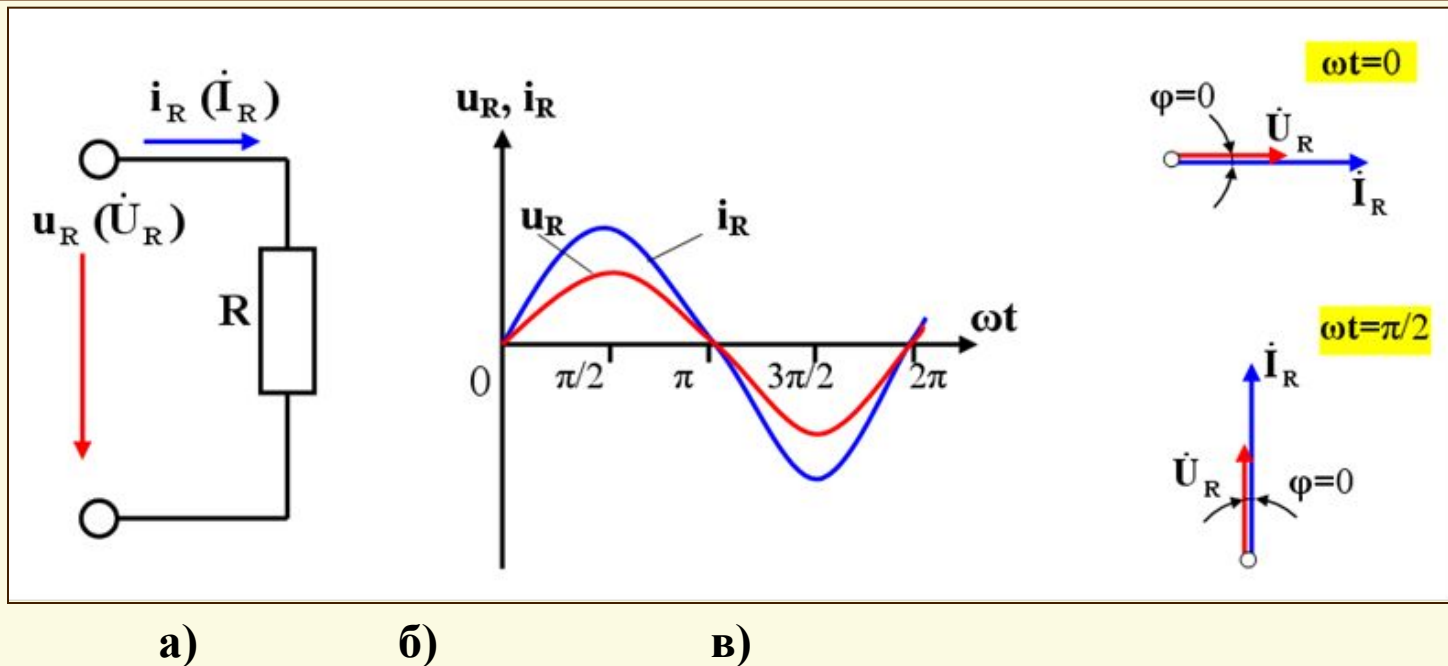


Рис 3. Резистор (R-элемент) в цепи синусоидального тока

а – эквивалентная схема замещения для резистора;

б – графики мгновенных значений напряжения u_R и тока i_R на участке цепи с резистором;

в – векторные диаграммы комплексных действующих значений напряжения и тока

для резистора при фазовых углах $\omega t=0$ и $\omega t=\pi/2$

Однофазный переменный ток



Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

Из рис. 3. видно, что *для резистора векторы тока I и напряжения U при любых фазовых углах ωt всегда совпадают по фазе, то есть, направлены в одну и ту же сторону.*

Мгновенная мощность p_R , выделяемая в резисторе, определяется произведением синусоидальных напряжения $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$ и тока $i_R = I_{Rm} \sin \omega t$:

$$p_R = U_{Rm} I_{Rm} \sin^2 \omega t = \frac{U_{Rm} I_{Rm}}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

Графики мгновенных значений напряжения u_R , тока i_R и мощности p_R для резистора в цепи синусоидального тока представлены на рис. 4. Из графика для активной мощности p_R видно, что *мгновенная мощность в резисторе, изменяющаяся с двойной частотой от 0 до $P_{Rm} = U_{Rm} I_{Rm}$, в любой момент времени положительна.*

Это означает, что в *резистивный элемент поступает электрическая энергия и в нем происходит необратимое преобразование электроэнергии в другие виды энергии*, в частности в виде тепловой энергии, безвозвратно рассеивающейся в окружающем пространстве.

Однофазный переменный ток



Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

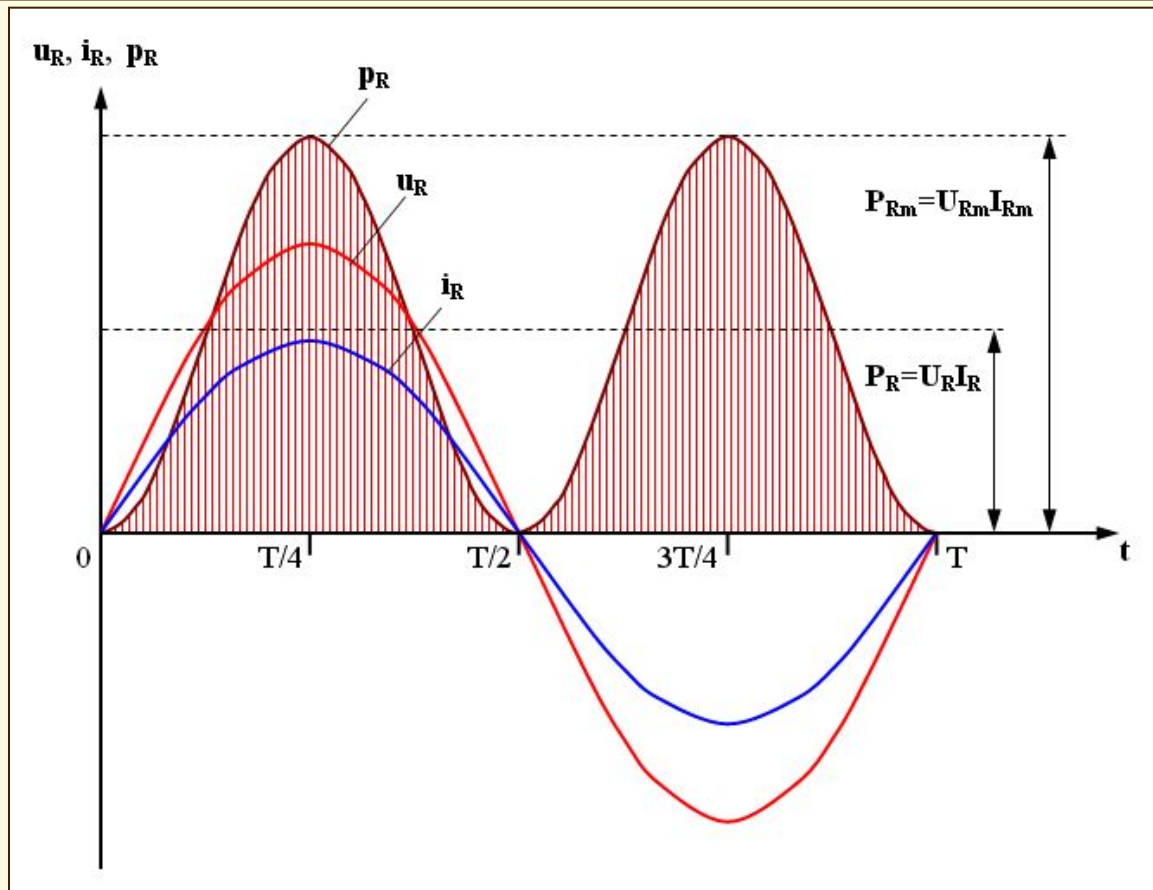


Рис. 4. Графики мгновенных значений напряжения u_R , тока i_R и мощности p_R для резистора в цепи синусоидального тока

Однофазный переменный ток



Резистивный элемент в цепи синусоидального тока

Мощность, выделяемая в резисторе, содержит постоянную составляющую, равную произведению $U_{Rm} I_{Rm} / 2$ или – произведению действующих значений напряжения U_R и тока I_R :

$$P_R = \frac{U_{Rm} I_{Rm}}{2} = U_R I_R$$

Мощность P_R , выделяемая в резисторе, называется *активной*, обозначается буквой **P** и имеет *единицу измерения* – **ватт (Вт)**. Более крупные единицы **кВт** (10^3 Вт) и **МВт** (10^6 Вт).

С учетом формул закона Ома можно вывести еще две равноценные формулы для подсчета действующего значения активной мощности:

$$P_R = \frac{U_R^2}{R};$$

$$P_R = I_R^2 R.$$

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Катушка индуктивности представляет собой многовитковую катушку, намотанную изолированным проводом с числом витков W .

Поскольку вокруг всякого провода с током i существует магнитное поле, то при протекании через катушку электрического тока внутри и вокруг нее также возникает магнитное поле.

Катушки индуктивности, называемые *электрическими обмотками*, входят обязательными составными частями во все электрические машины и трансформаторы, работающие на переменном токе, поскольку для их действия по преобразованию электроэнергии необходимо создавать переменные магнитные поля большой интенсивности (индукции).

На рис. 5а изображена схема замещения участка электрической цепи с идеальной катушкой индуктивности (индуктивным элементом) L .

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Катушка индуктивности накапливает энергию магнитного поля. Ток в витках катушки создает *магнитный поток* Φ , пронизывающий эти витки.

Сумма магнитных потоков Φ , пронизывающих отдельные витки катушки, то есть сцепленных с ее витками, определяется как произведение числа витков W на величину магнитного потока Φ и называется *потокосцеплением катушки* Ψ :

$$\Psi = W\Phi.$$

Единицей измерения магнитного потока и потокосцепления в системе СИ является *вебер* (Вб). $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В}\cdot\text{с}$.

Отношение потокосцепления катушки Ψ к протекающему через нее току i называется индуктивностью L .

Величина индуктивности L прямо пропорциональна потокосцеплению Ψ и обратно пропорциональна току i_L , текущему через индуктивность:

$$L = \frac{\Psi}{i_L}.$$

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

С физической точки зрения *индуктивность L является мерой запаса энергии магнитного поля W_M индуктивного элемента*, что видно из формулы:

$$W_M = \frac{L(i_L)^2}{2}.$$

Единица индуктивности – *генри (Гн)*.

При прохождении по виткам катушки индуктивности синусоидального тока i_L и возникновении связанного с током потокосцепления Ψ , *на основе явления электромагнитной индукции [1]* в индуктивном элементе L возникает *ЭДС самоиндукции e_L* .

Величина ЭДС самоиндукции по закону электромагнитной индукции прямо пропорциональна скорости изменения потокосцепления во времени, что выражается в общем виде следующей формулой:

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt}.$$



Однофазный переменный ток

Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Величину ЭДС самоиндукции для линейного индуктивного элемента электрической цепи можно представить в виде:

$$e_L = -L \frac{di_L}{dt}.$$

Знак минус показывает, что *ЭДС самоиндукции e_L в любой момент времени противодействует изменениям синусоидального тока i_L (принцип Ленца)*. Поэтому, чтобы в замкнутой цепи с индуктивным элементом протекал ток i_L , к индуктивности должно быть приложено напряжение u_L , равное по величине и противоположное по направлению ЭДС самоиндукции e_L :

$$u_L = -e_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}.$$

Если через индуктивный элемент L протекает синусоидальный ток i_L $i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i)$, то магнитный поток Φ и потокосцепление Ψ также будут синусоидальными и совпадать по фазе с током:

$$\Psi = Li_L = LI_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i).$$



Однофазный переменный ток

Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

ЭДС самоиндукции e_L также синусоидальна, но будет отставать по фазе от тока i_L во времени на четверть периода или по фазовому углу на $\pi/2$:

$$e_L = -d\Psi/dt = -Ldi/dt = -L\omega I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i),$$

или $e_L = E_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i - \pi/2)$,

где $E_{Lm} = L\omega I_{Lm}$ – амплитуда ЭДС самоиндукции.

Напряжение u_L приложенное к индуктивному элементу при синусоидальном токе также будет синусоидальным и изменяться с той же угловой частотой ω :

$$u_L = Ldi/dt = L\omega I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u).$$

Начальная фаза напряжения на индуктивности ψ_u *опережает* начальную фазу тока ψ_i на угол $\pi/2$, так как $\psi_u = \psi_i + \pi/2$, то есть *угол сдвига фаз между током и напряжением для индуктивности*

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2.$$

В частном случае, если начальная фаза тока, текущего через индуктивность равна нулю ($\psi_i = 0$), то есть $i_L = I_{Lm} \sin \omega t$, напряжение на индуктивности будет меняться по косинусоиде: $u_L = L\omega I_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \cos \omega t$.

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Графики мгновенных значений напряжения u_L , тока i_L , магнитного потока Φ и ЭДС e_L на участке цепи с индуктивностью представлены на рис. 5б.

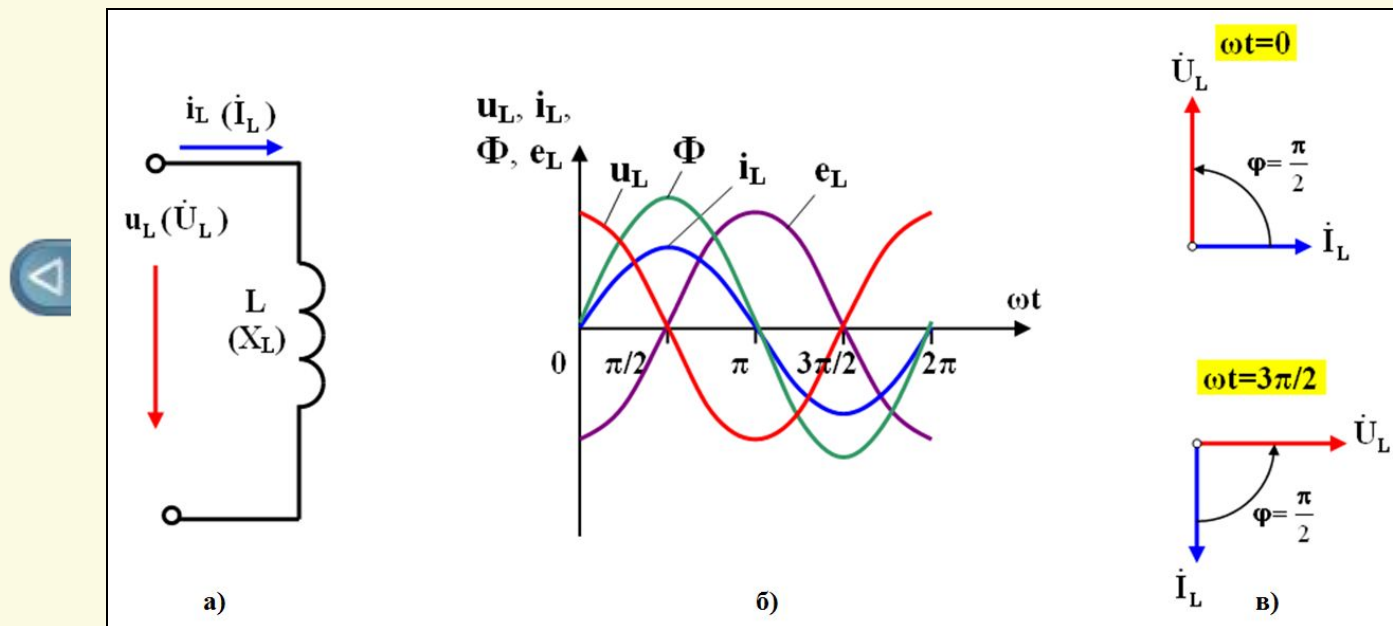


Рис 5. Индуктивность (L -элемент) в цепи синусоидального тока

а – эквивалентная схема замещения для индуктивности;

б – графики мгновенных значений напряжения u_L , тока i_L , магнитного потока Φ и ЭДС e_L ;

в – векторные диаграммы комплексных действующих значений напряжения и тока для индуктивности при фазовых углах $\omega t=0$ и $\omega t=3\pi/2$

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Индуктивное сопротивление X_L катушки прямо пропорционально угловой частоте ω и величине индуктивности L : $X_L = \omega L = 2\pi fL$.

Закон Ома справедлив и для *действующих значений* тока и напряжения участка цепи синусоидального тока с индуктивным элементом L :

$$I_L = \frac{U_L}{\omega L} = \frac{U_L}{X_L}.$$

Из закона Ома напряжение на индуктивности определяется произведением действующего значения тока I_L и индуктивного сопротивления X_L : $U_L = I_L X_L$. Величина индуктивного сопротивления X_L вычисляется как частное от деления напряжения U_L на ток I_L :

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}.$$

Из векторных диаграмм (рис. 5в) видно, что в цепи синусоидального тока с индуктивным L -элементом *ток отстает по фазе от приложенного напряжения на угол $\pi/2$ или 90° , и, наоборот, можно считать, что напряжение на индуктивном элементе опережает проходящий через него ток на тот же угол $\phi = \pi/2$.*

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Мгновенная мощность q_L , связанная с индуктивностью, называется *реактивной индуктивной мощностью* (или просто – *индуктивной мощностью*) и определяется произведением мгновенных значений тока $i_L = I_{Lm} \sin \omega t$ и напряжения $u_L = L \omega I_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \cos \omega t$:

$$q_L = i_L u_L = I_{Lm} U_{Lm} \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{I_{Lm} U_{Lm}}{2} \sin 2\omega t = I_L U_L \sin 2\omega t.$$

Здесь I_{Lm} и U_{Lm} – амплитудные значения, а I_L и U_L – действующие значения, соответственно тока и напряжения.

Графики мгновенных значений напряжения u_L , тока i_L и мощности q_L для индуктивности в цепи синусоидального тока представлены на рис. 6.

Из формулы и графика для мощности q_L , видно, что *мгновенная индуктивная мощность также синусоидальна, изменяется с двойной частотой сети (2ω)*, но в отличие от активной мощности для резистора, индуктивная мощность знакопеременна и не содержит постоянную составляющую, как показано на рис. 6.

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

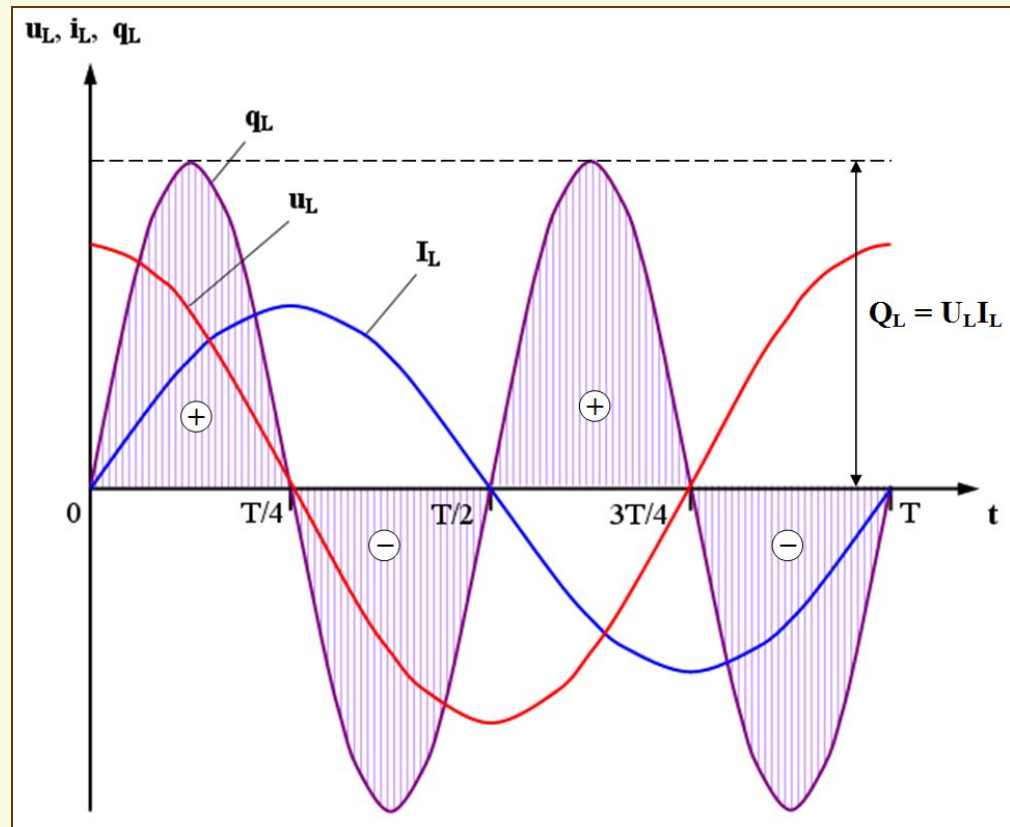


Рис. 6. Графики мгновенных значений напряжения u_L , тока i_L и мощности q_L для индуктивного элемента L в цепи синусоидального тока

Однофазный переменный ток



Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

В периоды времени положительных значений индуктивной мощности (см. рис. 6) эта мощность, поступающая из источника электроэнергии, накапливается в индуктивности в форме энергии магнитного поля (в основном внутри катушки индуктивности). В другие моменты времени (при отрицательных полуциклах индуктивной мощности) энергия магнитного поля преобразуется в электроэнергию источника.

То есть между источником и идеальной индуктивностью происходит периодический, с двойной частотой сети обмен энергии без потерь.

Произведение действующих значений тока I_L и напряжения U_L определяет действующее значение индуктивной мощности: $Q_L = U_L I_L$.

С учетом формул закона можно вывести еще две равноценные формулы для подсчета действующего значения реактивной индуктивной мощности:

$$Q_L = \frac{U_L^2}{X_L}; \quad Q_L = I_L^2 X_L.$$

Единицей измерения реактивной индуктивной мощности является *вольт-ампер реактивный* или сокращенно – **ВАр**.

Однофазный переменный ток



Конденсатор в цепи синусоидального тока

Конденсатор представляет собой электротехническое устройство из двух проводников, заряженных разноименными и равными по абсолютной величине зарядами, разделенными тонким слоем диэлектрика. Проводники, образующие конденсатор и имеющие достаточно большую поверхность и малую толщину, называются его обкладками и, как правило, выполняются из алюминиевой фольги.

Емкостью конденсатора называется физическая величина, равная отношению заряда Q_C , накопленного в конденсаторе, к напряжению или разности потенциалов $U_C = \phi_1 - \phi_2$ между его обкладками:

$$C = \frac{Q_C}{\phi_1 - \phi_2} = \frac{Q_C}{U_C}.$$

Единица емкости называется **фарадой (Ф)**. Фарада – очень крупная единица емкости, поэтому в практических расчетах применяется в миллион раз меньшая единица – **микрофарада (мкФ)**; $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$.



Однофазный переменный ток

Конденсатор в цепи синусоидального тока

С физической точки зрения *емкость конденсатора C является мерой запаса энергии электрического поля $W_э$ в конденсаторе*, что видно из формулы:

$$W_э = \frac{CU_c^2}{2}.$$

Для получения больших электроемкостей конденсаторы соединяют друг с другом параллельно в батарею. Общая емкость батареи из n параллельно соединенных конденсаторов равна:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{k=1}^n C_k,$$

где C_k – емкость k -го конденсатора.

Если конденсатор подключить к источнику постоянного тока, то в цепи появится только кратковременный зарядный ток, спадающий до нуля.

Конденсатор, подключенный к источнику синусоидального напряжения u_c (**см. рис. 7а**) $u_c = U_{cm} \sin(\omega t + \psi_u)$, периодически перезаряжается, с перераспределением заряда между обкладками $Q_c = C \cdot u_c$.



Однофазный переменный ток

Конденсатор в цепи синусоидального тока

Дифференцируя изменение заряда по времени dQ_C/dt получим, что в замкнутой цепи с конденсатором будет протекать переменный синусоидальный ток той же частоты:

$$i_c = \frac{dQ_C}{dt} = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u),$$

или $i_c = \omega C U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i)$.

Здесь $I_{Cm} = C\omega U_{Cm}$ – амплитудное значения синусоидального тока, текущего через конденсатор. Разделив обе части этого равенства на $\sqrt{2}$, получим соотношение в виде действующих величин тока и напряжения для конденсатора: $I_C = \omega C U_C$.

Из сравнения выше приведенных формул видно, что начальная фаза тока ψ_i , текущего через конденсатор опережает начальную фазу напряжения ψ_u на угол $\pi/2$, так как $\psi_i = \psi_u + \pi/2$, то есть угол сдвига фаз между током и напряжением для конденсатора $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$.

Графики мгновенных значений напряжения u_c и тока i_c на участке цепи с конденсатором для случая нулевой начальной фазы $\psi_u = 0$ изображены на рис. 76.

Однофазный переменный ток



Конденсатор в цепи синусоидального тока

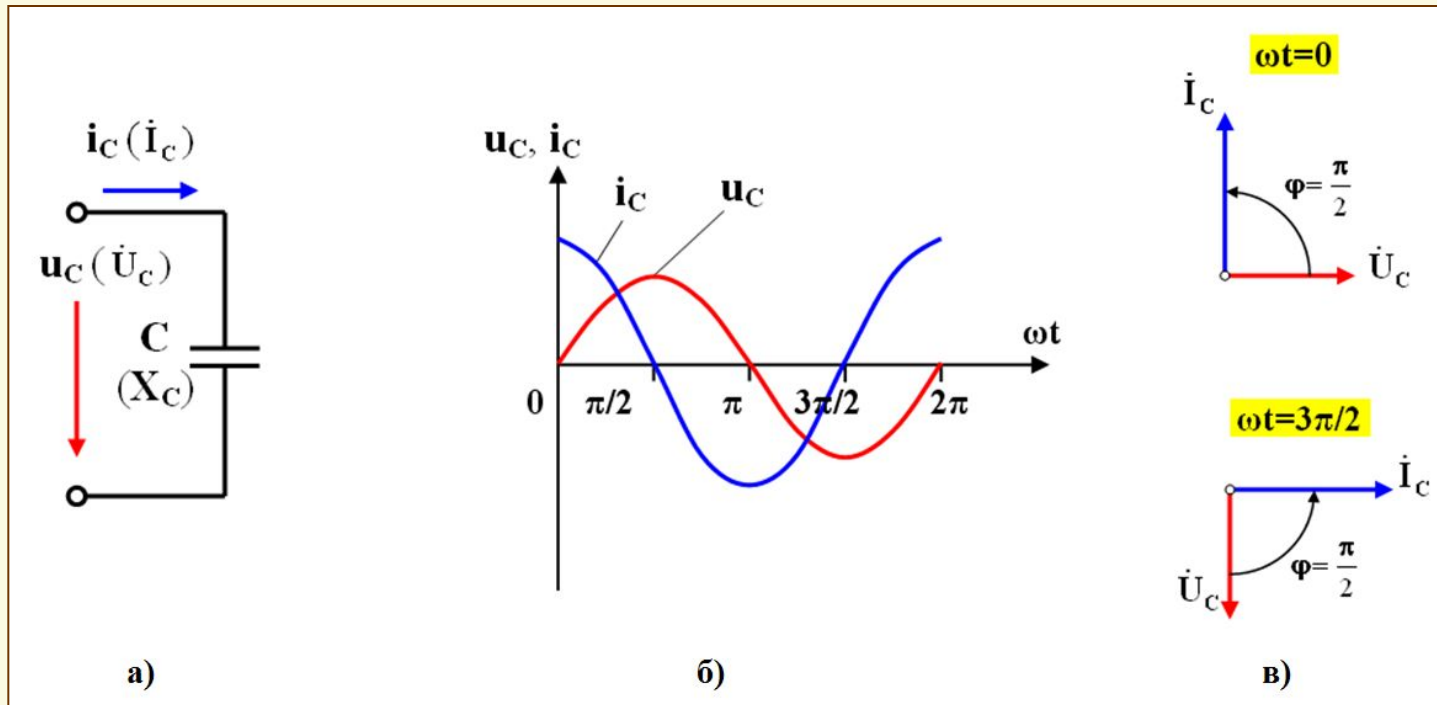


Рис 7. Конденсатор (С-элемент) в цепи синусоидального тока

а – эквивалентная схема замещения для конденсатора;

б – графики мгновенных значений напряжения u_C и тока i_C на участке цепи с конденсатором;

в – векторные диаграммы комплексных действующих значений напряжения и тока для конденсатора при фазовых углах $\omega t=0$ и $\omega t=3\pi/2$

Однофазный переменный ток



Конденсатор в цепи синусоидального тока

Величина $1/\omega C$, связывающая ток I_C и напряжение U_C в цепи синусоидального тока с емкостным элементом обозначается X_C , имеет размерность **Ом** и называется *реактивным емкостным сопротивлением* или просто – *емкостным сопротивлением*:

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

В этой формуле емкость конденсатора определяется в фарадах (**Ф**). Если перейти к практическим единицам емкости в микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$), то емкостное сопротивление запишется, как

$$X_C = \frac{10^6}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi f C},$$

Из этой формулы видно, что емкостное сопротивление X_C обратно пропорционально частоте **f** и емкости **C** конденсатора.

Емкость конденсатора **C** вычисляется в микрофарадах по известным значениям частоты **f** и емкостного сопротивления X_C , как

$$C = \frac{10^6}{2\pi f X_C}.$$



Однофазный переменный ток

Конденсатор в цепи синусоидального тока

Закон Ома для участка цепи с емкостным элементом определяется формулой:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C}.$$

Из этой формулы следует, что напряжение на конденсаторе U_C определяется произведением действующего значения тока I_C и емкостного сопротивления X_C : $U_C = I_C X_C$, а величина емкостного сопротивления X_C вычисляется как частное от деления напряжения U_C на ток I_C :

$$X_C = \frac{U_C}{I_C}.$$

На рис. 7в приведены векторные диаграммы напряжения и тока для конденсатора при фазовых углах $\omega t = 0$ и $\omega t = 3\pi/2$. Из векторных диаграмм видно, что в цепи синусоидального тока с емкостным элементом *ток опережает по фазе приложенное к конденсатору напряжение на $\pi/2$ или 90°* , и, наоборот, можно считать, что *напряжение на емкостном элементе отстает от проходящего через конденсатор ток на тот же угол $\phi = \pi/2$* .



Однофазный переменный ток

Конденсатор в цепи синусоидального тока

Рассмотрим *энергетические процессы в емкостном элементе* цепи синусоидального тока.

Мгновенная мощность q_C , связанная с конденсатором, называется *реактивной емкостной мощностью* (или просто – *емкостной мощностью*) и определяется произведением мгновенных значений тока

$i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \pi/2) = I_{Cm} \cos \omega t$ и напряжения $u_C = U_{Cm} \sin \omega t$:

$$q_C = i_C u_C = I_{Cm} U_{Cm} \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{I_{Cm} U_{Cm}}{2} \sin 2\omega t = I_C U_C \sin 2\omega t.$$

Здесь I_{Cm} и U_{Cm} – амплитудные значения, а I_C и U_C – действующие значения, соответственно тока и напряжения.

Графики мгновенных значений напряжения u_C , тока i_C и мощности q_C для конденсатора в цепи синусоидального тока представлены на рис. 8. Из графика для мощности q_C видно, что *мгновенная емкостная мощность также синусоидальна, изменяется с двойной частотой сети (2ω)*, и также как и индуктивная мощность для индуктивности, емкостная мощность конденсатора знакопеременна и не содержит постоянную составляющую.

Однофазный переменный ток



Конденсатор в цепи синусоидального тока

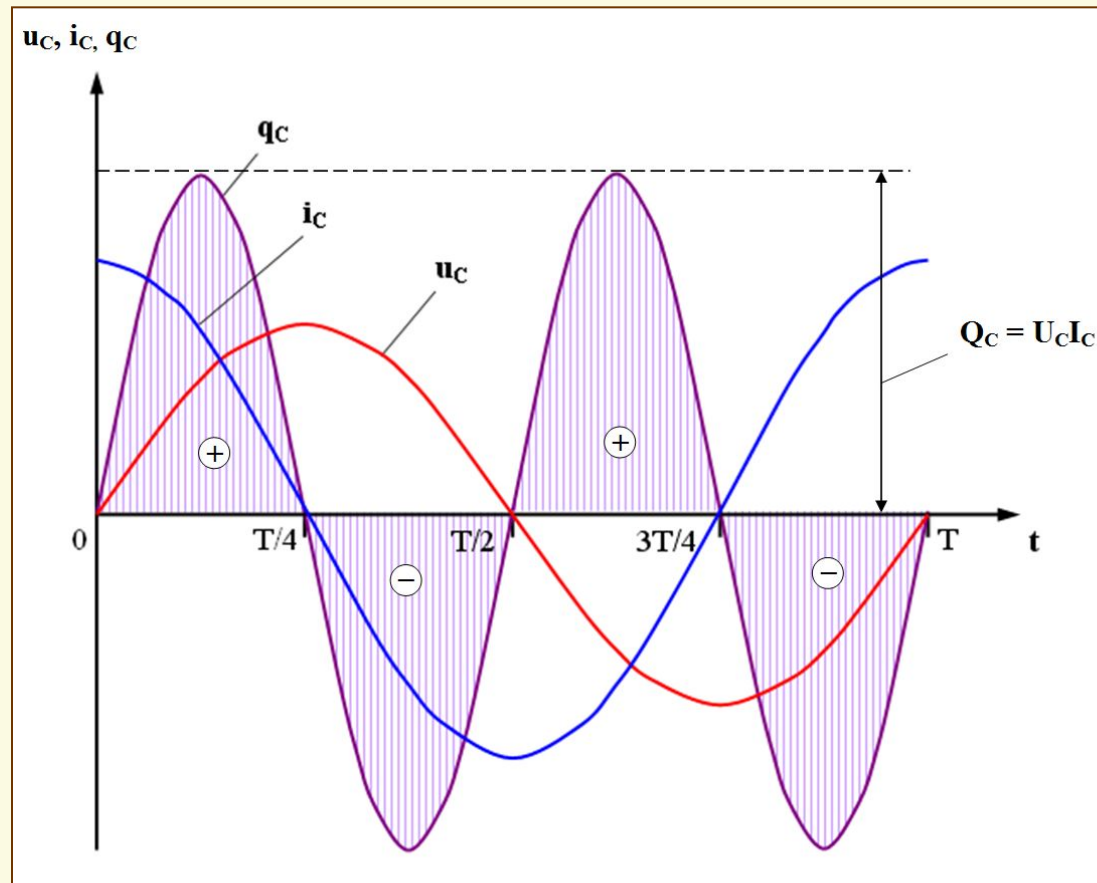


Рис. 8. Графики мгновенных значений напряжения u_C , тока i_C и мощности q_C для емкостного элемента C в цепи синусоидального тока

Однофазный переменный ток



Конденсатор в цепи синусоидального тока

Произведение действующих значений тока I_C и напряжения U_C определяет значение *емкостной мощности* Q_C :

$$Q_C = U_C I_C.$$

С учетом формул закона Ома из этой формулы можно вывести еще две равноценные формулы для подсчета действующего значения реактивной емкостной мощности конденсатора:

$$Q_C = \frac{U_C^2}{X_C}; \quad Q_C = I_C^2 X_C.$$

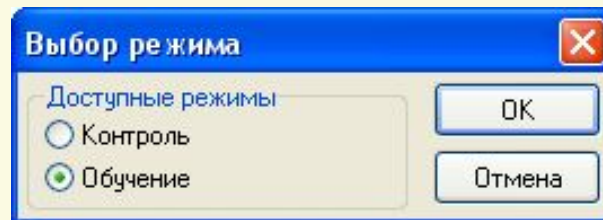
Единицей измерения реактивной емкостной мощности конденсатора (как и для индуктивности) является *вольт-ампер реактивный* или сокращенно – **Вар**, или в производных единицах *киловольт-ампер реактивный (кВАр)* и т.д.

Однофазный переменный ток



ТЕСТ – Отдельные электроприемники в однофазной цепи

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 34 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Однофазный переменный ток



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т. Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2014. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!