ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Лектор:
к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

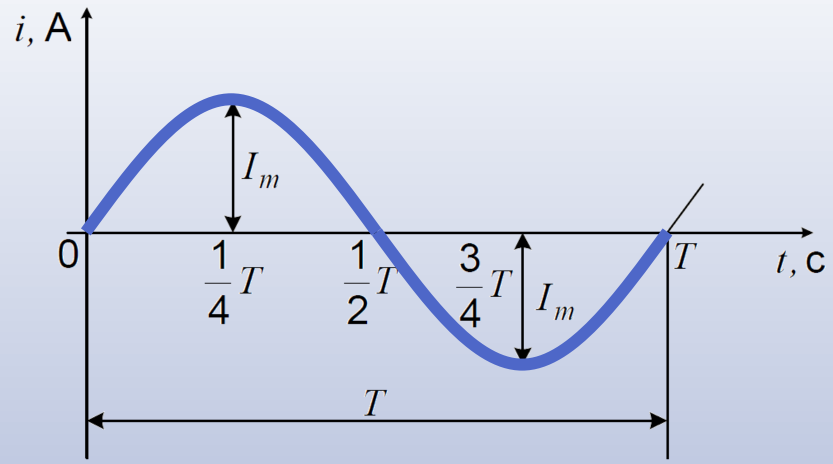
Переменным током называют ток, который **изменяется во времени по величине и направлению**.

Переменный ток может быть *однофазным и трёхфазным.*

Переменный однофазный синусоидальный ток

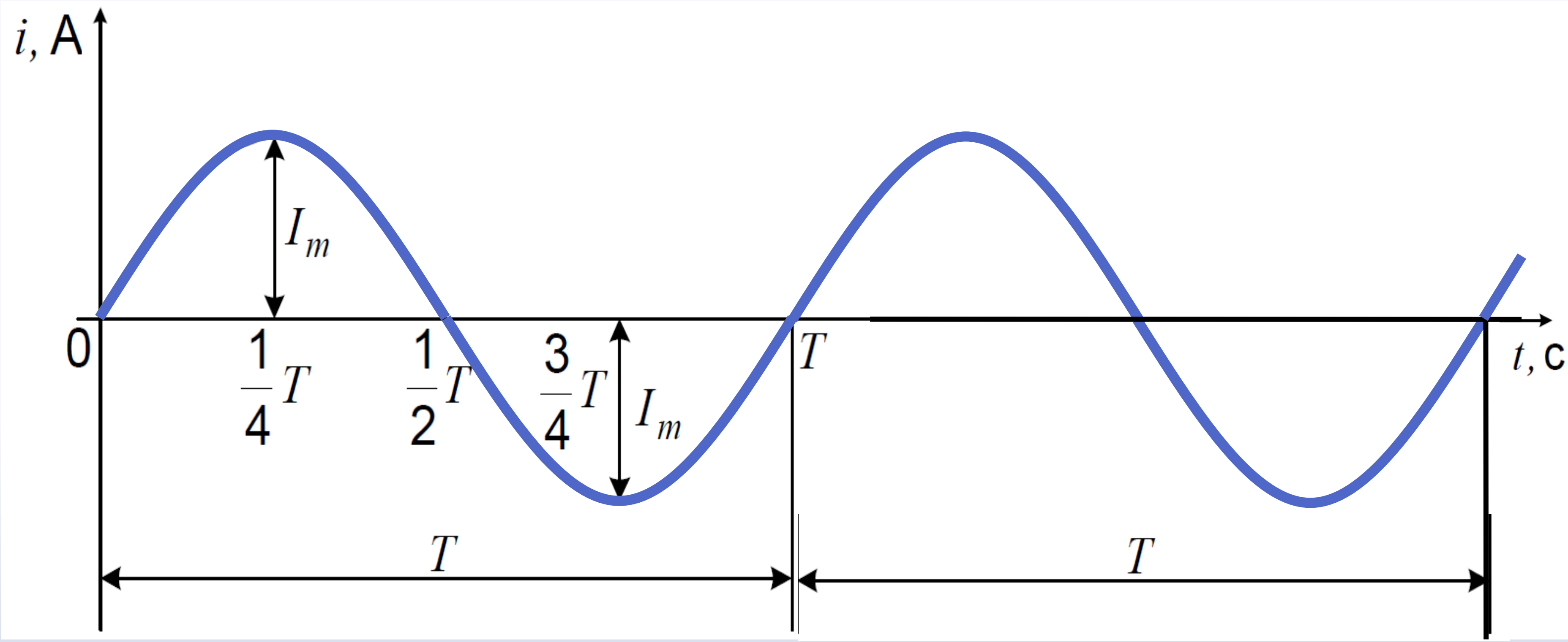
Однофазный синусоидальный ток *представляет собой переменный ток, изменяющийся во времени по периодическому, синусоидальному закону.*

$$\boxed{i = I_m \sin(t + kT),}$$



Волновая диаграмма однофазного синусоидального тока

где i – ***мгновенное значение тока,*** *т. е. значение тока в данный момент времени;* I_m *– максимальное значение тока, называемое* ***амплитудой***;
T **–** период колебания тока, т. е. интервал времени в секундах (с), за которое совершается одно полное колебание; k – любое целое число.



$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Частота *– это число периодов колебаний какого либо процесса (тока, напряжения и др.) за одну секунду.* Измеряется в герцах (Гц), 1 Гц = 1/с.

Круговая (угловая, циклическая) частота *w, рад/с, равна числу периодов колебания тока (напряжения) за 2р секунд*:

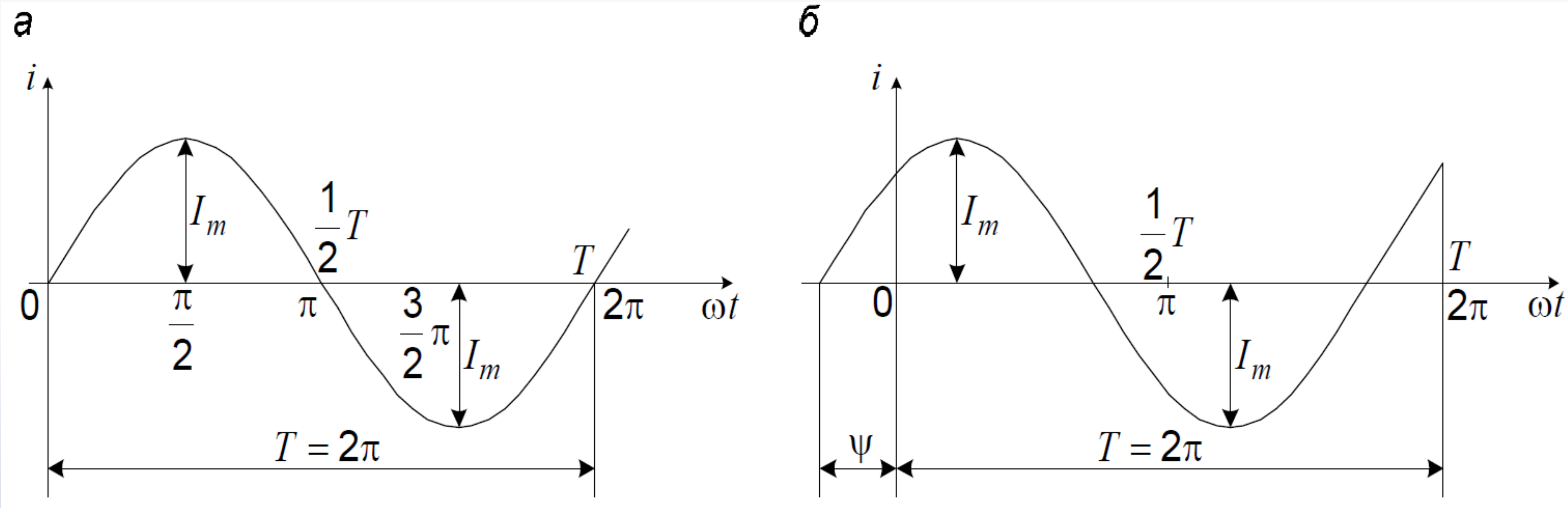
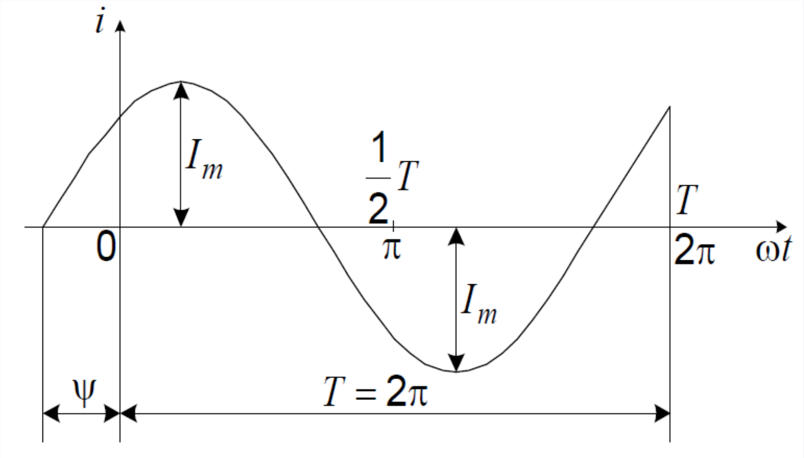


График синусоидального тока в виде волновой диаграммы

$i = I_m \sin\omega t$ – для рис. а $(\psi = 0)$;

$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ – для рис. б $(\psi \neq 0)$.



$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

Анализируя выражения представленных на рисунках выше функций, вводим понятия:

1) ***фаза (аргумент)*** - величина ($\omega t + \psi$). *Фаза характеризует состояние колебания, т. е. она даёт возможность определить численное значение изменяющейся величины в данный момент времени t;*

2) значение фазы при $t = 0$, когда $\omega t + \psi = \omega * 0 + \psi = \psi$, называется ***начальной фазой*** и обозначается ψ.

При радианном измерении аргумента синуса ωt в течение времени T фаза тока увеличивается на 2π.

Круговая частота ω показывает, на сколько радиан изменится фаза тока за 1 секунду.

Любая синусоидально (гармонически) изменяющаяся функция однозначно определяется тремя величинами: амплитудой, угловой частотой (частотой, периодом) и начальной фазой.

Амплитуда

Угловая частота

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

Начальная фаза

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

Действующее значение синусоидально изменяющейся величины переменного тока и напряжения

Действующее значение *I синусоидального тока i = $I_m sin(wt)$ численно равно значению такого постоянного тока, который за время, равное периоду синусоидального тока, выделяет на сопротивлении R такое же количество теплоты, что и синусоидальный ток.*

Действующее значение тока ещё называют эффективным или среднеквадратичным.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t \, d\omega t} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m .$$

$$\boxed{U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, U_m .}$$

Среднее значение синусоидально изменяющейся величины переменного тока и напряжения

Под ***средним значением*** *синусоидального переменного тока понимают его среднее значение за* ***положительный полупериод***:

$$I_{cp} = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}638 I_m \; .$$

$$U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m = 0{,}638 \, U_m .$$

Коэффициенты амплитуды и формы

Коэффициент амплитуды *представляет собой отношение амплитуды периодически изменяющейся функции к её действующему значению*

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

Коэффициент формы *– это отношение действующего значения периодически изменяющейся функции к её среднему значению за полпериода*

$$K_ф = \frac{I}{I_{ср}} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11.$$

СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

математическим уравнением (через тригонометрические функции)

вращающимся вектором

волновой диаграммой

Представление переменного синусоидального тока математическим уравнением

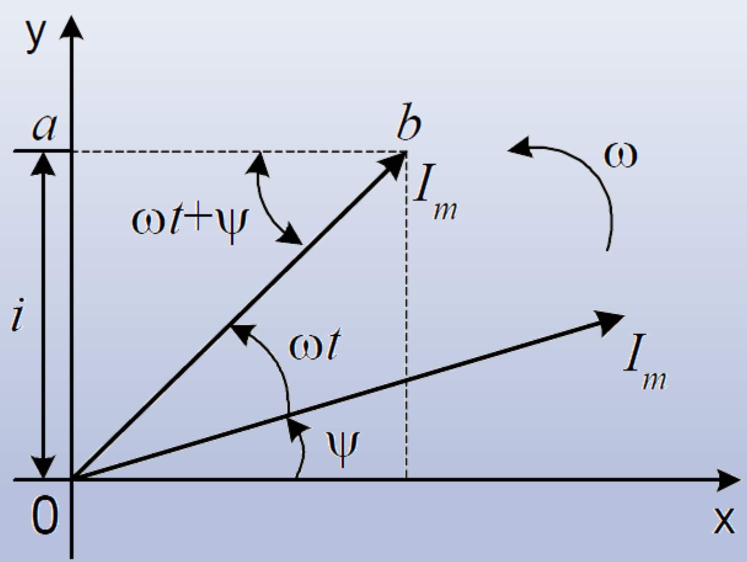
$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

Представление переменного синусоидального тока вращающимся вектором. Векторные диаграммы

Пусть в прямоугольной системе координат x и y имеется вектор длиной I_m, расположенный под углом ψ к горизонтальной оси.

Заставим этот вектор вращаться против часовой стрелки с угловой скоростью ω. Тогда за время t он повернётся на угол ωt .

Проекцию вращающегося вектора на вертикальную ось обозначим через функцию $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$. Функция i представляет собой мгновенное значение тока.



Вращающийся вектор

Изображение тока с помощью вектора называется его ***векторной диаграммой****.*

Длина вектора может быть равна амплитудному значению I_m, либо действительному значению I. Обычно вектор при этом показывается не в произвольный момент времени t , а в начальный, когда $t = 0$, т. е. угол наклона вектора к горизонтальной оси равен начальной фазе.

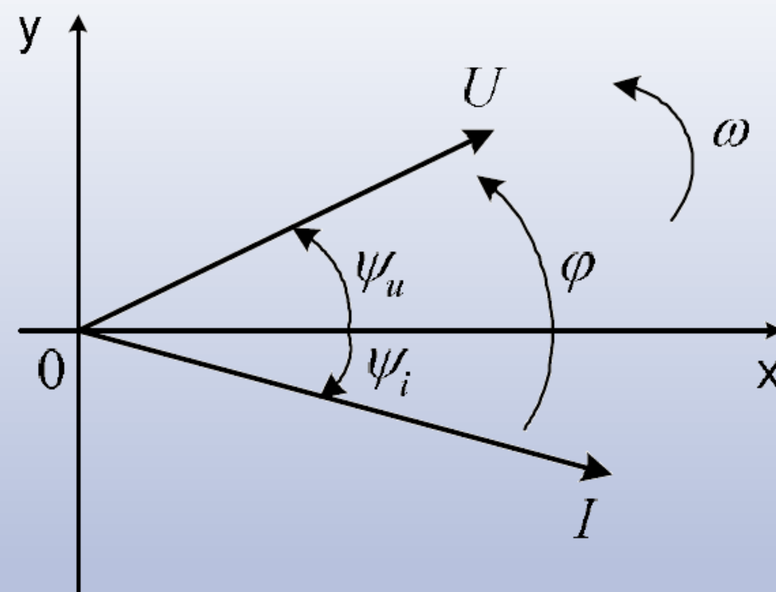
Построим векторную диаграмму двух векторов – тока и напряжения. Длины векторов равны действующим значениям тока и напряжения, углы их наклона к горизонтальной оси – начальным фазам, а угол между векторами, равный разности начальных фаз ψ_u и ψ_i, определяет сдвиг фаз ϕ между напряжением и током:

$$\phi = \psi_u - \psi_i.$$

На диаграмме стрелка, показывающая угол ϕ, всегда изображается в положительном направлении – против часовой стрелки.

Векторная диаграмма даёт наглядное представление об отставании одних величин и опережении других.

Если начальные фазы U и I (ψ_u и ψ_i) равны нулю, то можно изображать векторную диаграмму без осей и располагать её как удобно.

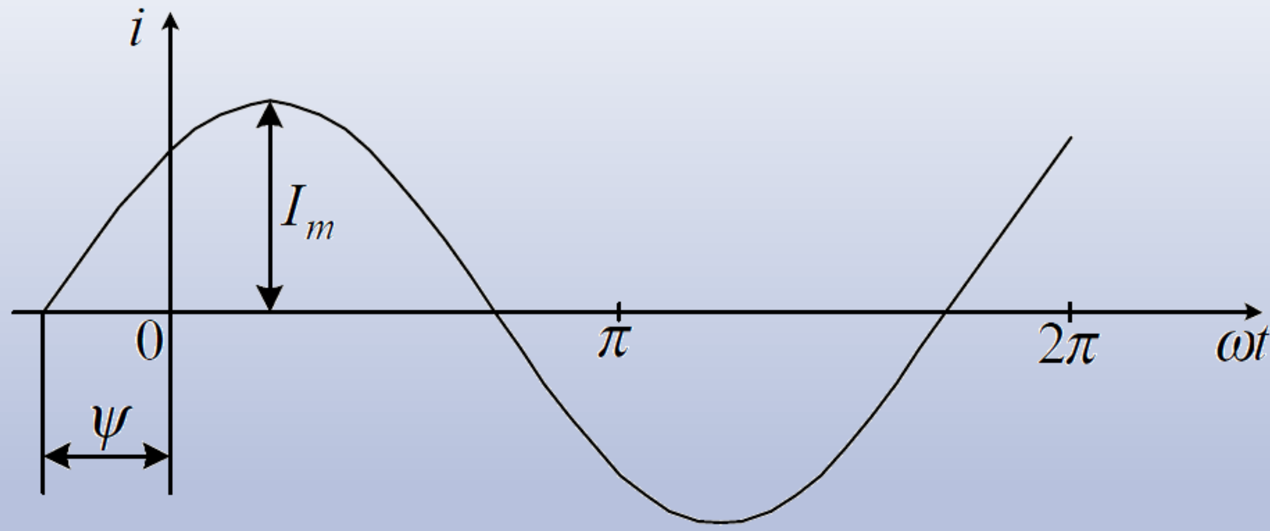


Векторная диаграмма напряжения и тока

Представление переменного синусоидального тока волновой диаграммой

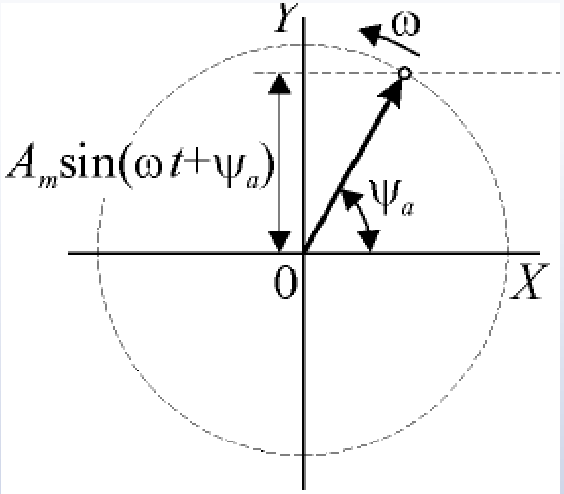
График синусоидального тока можно изобразить в виде волновой диаграммы.

На волновой диаграмме указана начальная фаза, которая определяется углом ψ, измеряемым от ближайшей к началу координат точки перехода синусоиды через ноль до точки начала координат. Начальная фаза ψ положительна в тех случаях, когда начало синусоиды смещено от точки ноль (начало координат) влево и наоборот – отрицательна, когда смещена вправо.

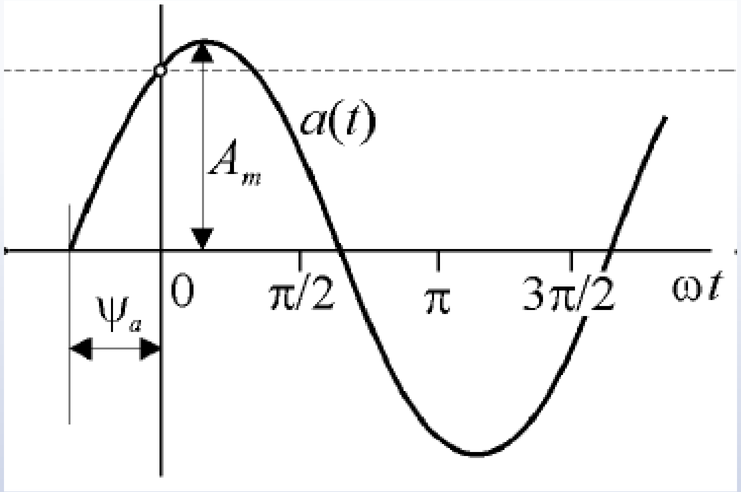


Волновая диаграмма синусоидального тока

Примеры перехода от одной формы задания к другой:



а)



б)

ЗАКОНЫ КИРХГОФА В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И МЕТОДЫ РАСЧЁТА ЭТИХ ЦЕПЕЙ

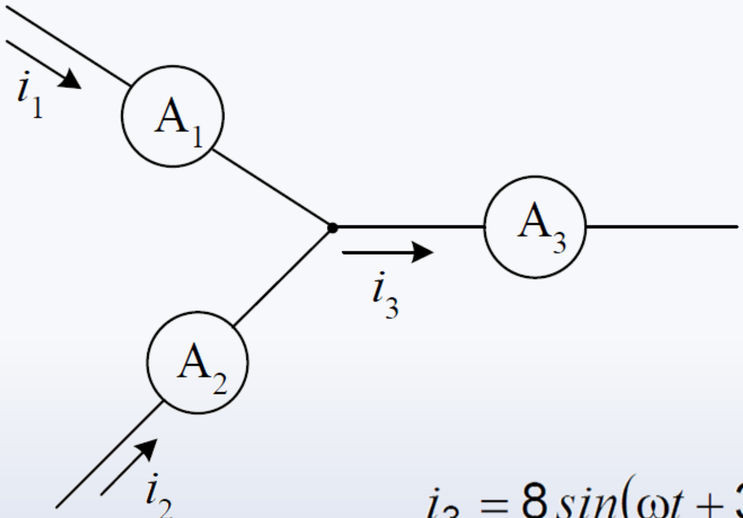
Первый закон Кирхгофа: *в любой момент времени алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю*

$$\sum_{k=1}^{m} i_k(t) = 0$$

Второй закон Кирхгофа: *в любой момент времени в замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех остальных элементах контура*

$$\sum_{k=1}^{n} e_k(t) = \sum_{k=1}^{n} u_k(t)$$

Применение метода расчёта непосредственно над синусоидальными функциями



$$i_1 = 8\,sin(\omega t + 30°),$$
$$i_2 = 6\,sin(\omega t + 120°).$$

1-й закон Кирхгофа $i_1 + i_2 - i_3 = 0$,

$$i_3 = i_1 + i_2$$

$$i_3 = 8\,sin(\omega t + 30°) + 6\,sin(\omega t + 120°) = I_{3m}\,sin(\omega t + \psi_3)$$

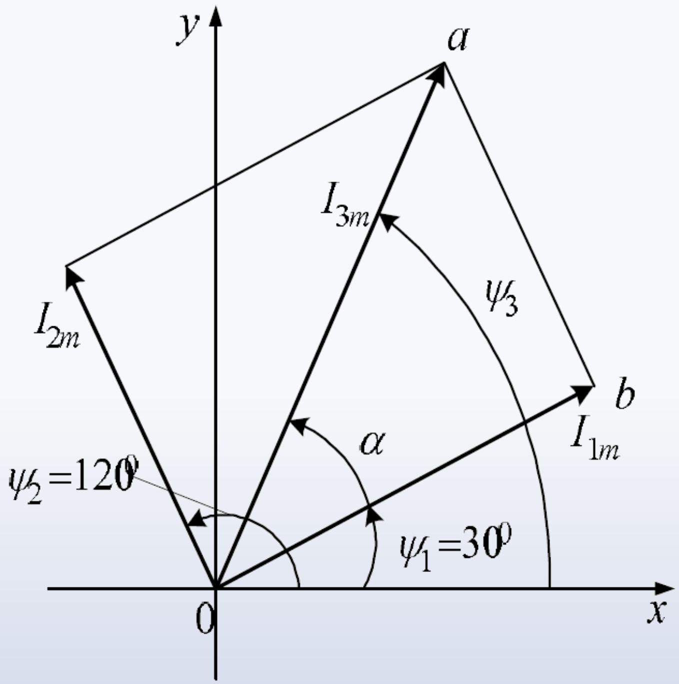
Сумма двух синусоид одинаковой частоты есть тоже синусоида той же частоты. Её амплитуда и начальная фаза находятся по формулам:

$$I_{3m} = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2 \cdot I_{1m} \cdot I_{2m} \cdot cos(\psi_1 - \psi_2)} =$$
$$= \sqrt{8^2 + 6^2 + 2 \cdot 8 \cdot 6 \cdot cos(30° - 120°)} = 10\ \text{А},$$

$$tg\psi_3 = \frac{I_{1m}\,sin\,\psi_1 + I_{2m}\,sin\,\psi_2}{I_{1m}\,cos\,\psi_1 + I_{2m}\,cos\,\psi_2} = \frac{8 \cdot sin\,30° + 6 \cdot sin\,120°}{8 \cdot cos\,30° + 6 \cdot cos\,120°} = 2{,}341,$$

$$\boxed{\psi_3 = arctg\,2{,}341 = 66{,}87°. \qquad i_3 = 10\,sin(\omega t + 66{,}87°).}$$

Применение метода расчёта с помощью векторных диаграмм



Векторная диаграмма токов

На примере, в соответствии с 1-м законом Кирхгофа в векторной форме для цепи, запишем:

$$\bar{I}_{3m} = \bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m}.$$

Построим в прямоугольной системе координат сумму векторов $\bar{I}_{1m}$ и $\bar{I}_{2m}$.

Необходимо определить $\bar{I}_{3m}$.

Так как треугольник oab – прямоугольный, а сторона ab равна длине вектора $\bar{I}_{2m}$, то в этом треугольнике:

$$I_{3m} = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ А}.$$

Начальная фаза ψ_3 тока I_{3m} равна углу наклона вектора $\bar{I}_{3m}$ к горизонтальной оси

$$\psi_3 = \psi_1 + \alpha = \psi_1 + arctg\frac{I_{2m}}{I_{1m}} = 30^\circ + arctg\frac{6}{8} = 30^\circ + 36{,}87^\circ = 66{,}87^\circ.$$

Определяем показания аргументов. Известно, что приборы электромагнитной системы показывают действующие значения токов и напряжений. Поэтому

$$I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{8}{1{,}41} = 5{,}66 \text{ А}, \quad I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{6}{1{,}41} = 4{,}24 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{I_{3m}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{1{,}41} = 7{,}07 \text{ А}.$$

Проанализировав численные значения токов I_1, I_2 и I_3, обращаем внимание на то, что

$$I_1 + I_2 \neq I_3,$$

$$5{,}66 + 4{,}24 \neq 7{,}07.$$

Это не ошибка. Надо знать, что в цепях синусоидального тока для показаний приборов законы Кирхгофа не справедливы.

В итоге можно складывать только мгновенные значения токов (синусоидальные функции времени) и векторы. Однако складывать численные значения токов и напряжений, а также показания приборов нельзя.

КОМПЛЕКСНЫЙ ВИД ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

$$\dot{A} = p + jq$$

$$|A| = \sqrt{p^2 + q^2}, \qquad \psi_a = arctg\left(\frac{q}{p}\right).$$

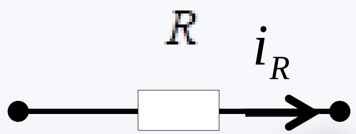
$e^{j\psi} = \cos\psi + j\sin\psi$ называется *оператором поворота*

$$\boxed{\begin{cases} 1 = e^{j0}; \\ j = e^{j\frac{\pi}{2}}; \\ -1 = e^{j\pi}; \\ -j = e^{-j\frac{\pi}{2}}. \end{cases}}$$

ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

Закон Ома

1. $i_R = I_{mR}\sin(\omega t + \psi_{i_R})$



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

$$u_R = \boxed{I_{mR}R}\sin(\omega t + \boxed{\psi_{i_R}}).$$

$$u_R = \boxed{U_{mR}}\sin(\omega t + \boxed{\psi_{u_R}})$$

$$\boxed{U_{mR} = I_{mR}R} \qquad \boxed{\psi_{u_R} = \psi_{i_R}}$$

На участке цепи, содержащем резистивный элемент, при протекании переменного тока, сдвига фаз между током и напряжением не будет.

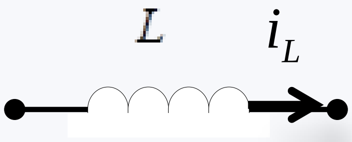
$$\dot{U}_R = U_{mR}e^{j\psi_{u_R}} \qquad \dot{I}_R = I_{mR}e^{j\psi_{i_R}}$$

Закон Ома в комплексном виде

$$\dot{U}_R = \dot{I}_R \cdot R.$$

Падение напряжения на резистивном элементе

2.



$$i_L = I_{mL}\sin(\omega t + \psi_{i_L}).$$

$$u_L = -e_L, \qquad e_L = -L\frac{di_L}{dt} \rightarrow u_L = I_{mL}\omega L\cos(\omega t + \psi_{i_L}).$$

$$u_L = \boxed{I_{mL}\omega L}\sin(\omega t + \boxed{\psi_{i_L} + \frac{\pi}{2}}).$$

$$\boxed{U_{mL} = I_{mL}\omega L,}$$

$$u_L = \boxed{U_{mL}}\sin(\omega t + \boxed{\psi_{u_L}})$$

$$\boxed{\psi_{u_L} = \psi_{i_L} + \frac{\pi}{2}}$$

$$X_L = \omega L$$ - *Индуктивное сопротивление*

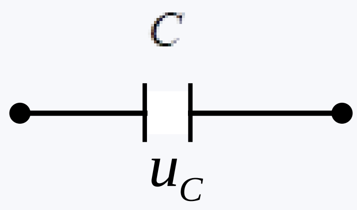
На участке цепи, содержащем емкостной элемент, при протекании переменного тока, между током и напряжением будет сдвиг фаз. Напряжение на емкостном элементе отстает по фазе от тока на угол равный $\frac{\pi}{2}$

$$\dot{U}_L = U_{mL}e^{j\psi_{u_L}}, \qquad \dot{I}_L = I_{mL}e^{j\psi_{i_L}}, \qquad \dot{X}_L = j\omega L = jX_L.$$

Закон Ома в комплексном виде

$$\dot{U}_L = \dot{I}_L \cdot \dot{X}_L = jX_L \cdot \dot{I}_L.$$

Падение напряжения на индуктивном элементе

3. 

$$u_C = U_{mC}\sin(\omega t + \psi_{u_C}).$$

$$i_C = \frac{dq}{dt}, \qquad q = u_C C. \rightarrow \quad i_C = U_{mC}\omega C\cos(\omega t + \psi_{u_C}).$$

$$i_C = U_{mC}\omega C\sin\left(\omega t + \psi_{u_C} + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_{mC} = U_{mC}\omega C,$$

$$i_C = I_{mC}\sin(\omega t + \psi_{i_C})$$

$$\psi_{i_C} = \psi_{u_C} + \frac{\pi}{2}$$

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

На участке цепи, содержащем емкостной элемент, при протекании переменного тока, между током и напряжением будет сдвиг фаз. Напряжение на емкостном элементе опережает по фазе ток на угол равный $\frac{\pi}{2}$

$$\dot{U}_C = U_{mC}e^{j\psi_{u_C}}, \qquad \dot{I}_C = I_{mC}e^{j\psi_{i_C}}, \qquad \dot{X}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C} = -jX_C.$$

Закон Ома в комплексном виде

$$\dot{U}_C = \dot{I}_C \cdot \dot{X}_C = -jX_C \cdot \dot{I}_C$$

Падение напряжения на емкостном элементе

Законы Кирхгофа

I закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма сходящихся в узле всех токов, представленных в комплексном виде, равна нулю:

$$\sum_k \dot{I}_k = 0$$

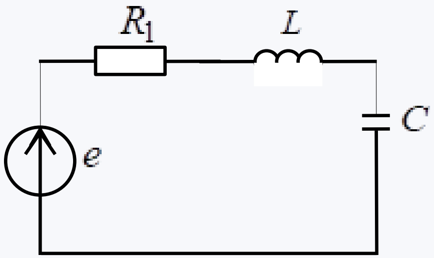
II закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма падений напряжений на всех элементах замкнутого участка цепи (контура), представленных в комплексном виде, равна алгебраической сумме всех комплексных ЭДС данного участка цепи (контура):

$$\sum_k \dot{U}_k = \sum_m \dot{E}_m$$

Полное сопротивление неразветвленной цепи

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$$



$$e = u_R + u_L + u_C$$

$$\dot{E} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_R = \dot{I}_R \cdot R, \quad \dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}_L, \quad \dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}_C$$

$$\boxed{\dot{E} = \dot{I} \cdot (R + j(X_L - X_C))}$$

активное *реактивное*

$$\boxed{\dot{Z} = R + jx} \qquad x = X_L - X_C$$

Полное комплексное сопротивление цепи

*Если составляющие комплексного сопротивления изобразить векторами на комплексной плоскости, то активное, реактивное и полное сопротивления образуют прямоугольный треугольник, называемый **треугольником сопротивлений.***

$$\dot{Z} = \sqrt{R^2 + x^2} \qquad \varphi = arctg\frac{x}{R}$$

Сдвиг фаз между током и напряжением на участке цепи определяется соотношением реактивного и активного сопротивлений.

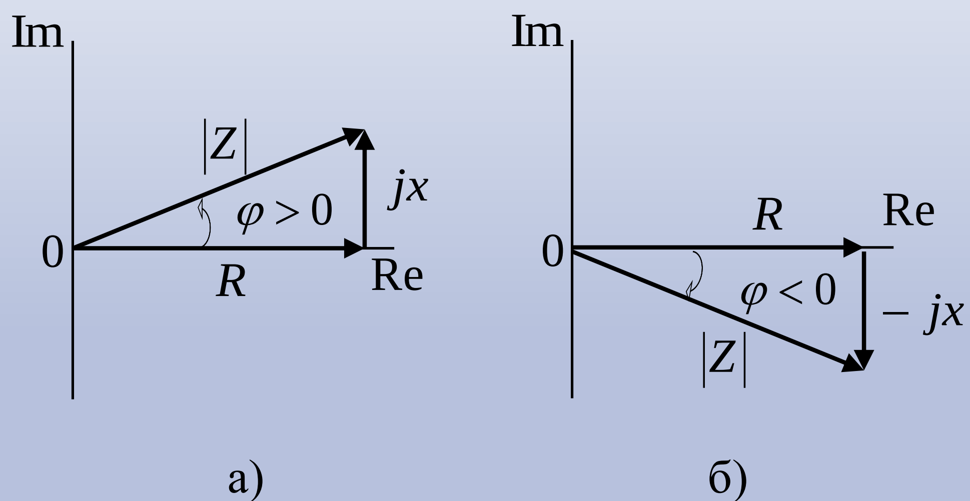
При отсутствии активной составляющей фазовый сдвиг составляет:

- ✓ $+90^0$ - *при индуктивном характере;*
- ✓ -90^0 - *при емкостном характере реактивного сопротивления.*

Наличие активной составляющей определяет для фазового смещения сектора:

- ✓ $0 < \varphi < 90^0$ - *при активно-индуктивном характере комплексного сопротивления (рисунок 7.2, а);*
- ✓ $0 > \varphi > 90^0$ - *при активно-емкостном характере (рисунок 7.2, б);.*

При отсутствии реактивной составляющей комплексного сопротивления сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует, т.е. $\varphi = 0$.



Треугольник сопротивлений

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}}$$

$$\dot{E} = E_m e^{j\psi_e}$$

$$\dot{Z} = Z_m e^{j\varphi}$$

$$\boxed{\dot{I} = \frac{E_m e^{j\psi_e}}{Z_m e^{j\varphi}} = \frac{E_m}{Z_m} e^{j(\psi_e - \varphi)}}$$

$$\dot{I} = I_m e^{j\psi_i}$$

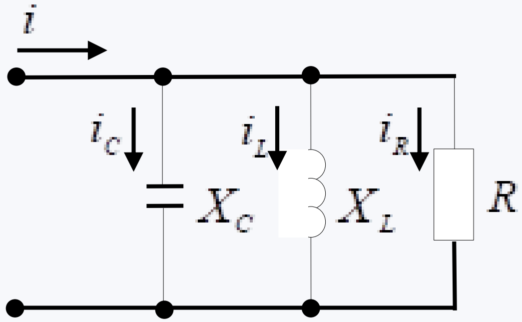
$$\boxed{I_m = \frac{E_m}{Z_m}}$$

$$\boxed{\psi_i = \psi_e - \varphi}$$

Начальная фаза сопротивления *численно равна сдвигу фаз между напряжением и током* в цепи

$$\boxed{\varphi = \psi_e - \psi_i}$$

Полная комплексная проводимость цепи



$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}}.$$

Полная комплексная проводимость цепи

активная

реактивная

$$\dot{Y} = g + jb.$$

Вектора комплексной проводимости и её составляющих образуют на комплексной плоскости прямоугольный треугольник, называемый ***треугольником проводимостей***

$$\boxed{\dot{Y} = \sqrt{g^2 + b^2}}$$

$$\boxed{\varphi = arctg\,\frac{b}{g}}$$

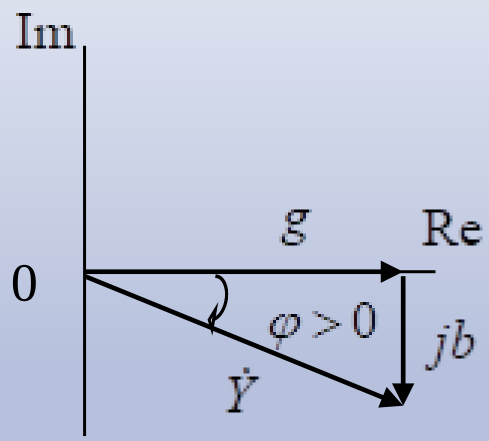
Если цепь активно-индуктивная

$$\dot{Z} = R + jX_L,$$

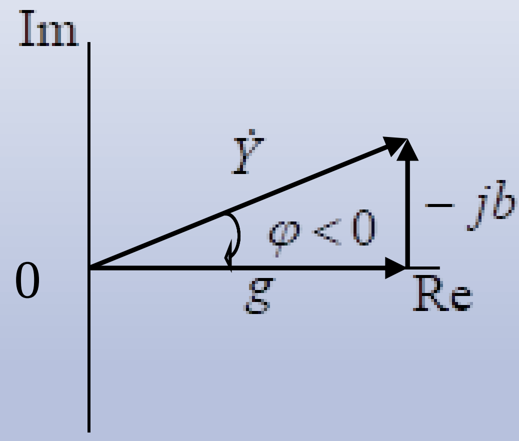
$$\boxed{\dot{Y} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{|Z|^2} - j\frac{X_L}{|Z|^2} = g - jb_L,}$$

Активная проводимость $g = \dfrac{R}{|Z|^2}$

Реактивная индуктивная проводимость $b_L = -\dfrac{X_L}{|Z|^2}$



а)



б)

Если цепь активно-емкостная $\dot{Z} = R - jX_C,$

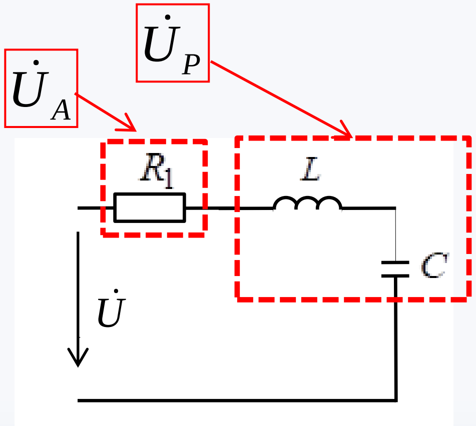
$$\dot{Y} = \frac{1}{R - jX_C} = \frac{R + jX_C}{R^2 + X_C^2} = \frac{R}{|Z|^2} + j\frac{X_C}{|Z|^2} = g + jb_C,$$

Активная проводимость $g = \dfrac{R}{|Z|^2}$

Реактивная емкостная проводимость $b_C = \dfrac{X_C}{|Z|^2}$

Мнимая часть полной комплексной проводимости положительная для емкостной цепи и отрицательна для индуктивной цепи

АКТИВНЫЕ И РЕАКТИВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ



$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \dot{Z} = \dot{I} \cdot (R + jx) = \dot{I} \cdot R + \dot{I} \cdot jx = \dot{U}_A + \dot{U}_P$$

Комплексное активное напряжение $\dot{U}_A = \dot{I}R$

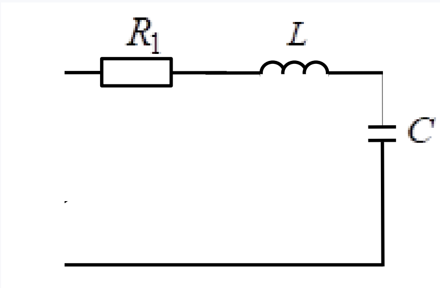
Комплексное реактивное напряжение $\dot{U}_P = \dot{I} \cdot jx$

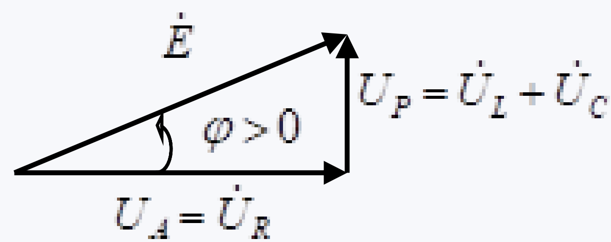
Активное напряжение *соответствует напряжению на активном сопротивлении, а* ***реактивное*** *– на реактивном сопротивлении.*

$$\dot{U} = U_A + jU_P; \qquad U_A = U\cos\varphi; \;\; U_P = U\sin\varphi;$$

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_P^2}; \;\; \varphi = arctg\frac{U_P}{U_A}$$

Активное напряжение может быть только положительным, а знак реактивного напряжения определяется знаком фазового сдвига .





$$\dot{U}_R = \dot{I}R, \dot{U}_L = j\omega L\dot{I}, \dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I}$$

Вектор напряжения вместе с активной и реактивной составляющими на комплексной плоскости образуют прямоугольный треугольник, называемый ***треугольником напряжений***

ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Энергии магнитного и электрического полей

$$W_М = \frac{LI_m^2}{2};$$

$$W_Э = \frac{CU_m^2}{2},$$

Активная мощность *характеризует среднюю за период скорость поступления энергии в двухполюсник :*

$$P = UI\cos(\varphi).$$

Если $P > 0$ - *двухполюсник, потребляет энергию;* $P < 0$ - *двухполюсник, отдает энергию остальной части цепи.* Единица измерения [Вт].

Реактивная мощность *цепи характеризует процессы обмена энергией между цепью и источником, и численно равна максимальной скорости запасения энергии в цепи*

$$Q = UI\sin(\varphi).$$

Если $Q > 0$ - *энергия запасается в магнитном поле цепи;* $Q < 0$ - *энергия запасается в электрическом поле цепи;* $Q = 0$ - *в цепи отсутствует обмен энергией с источником.* Единица измерения [ВАр].

Реактивные мощности на индуктивном и емкостном элементах

$$Q_L = I^2 X_L = I^2 \cdot \omega L$$

$$Q_C = I^2 X_C = I^2 \cdot \frac{1}{\omega C}$$

$$\boxed{Q = Q_L - Q_C = I^2 (X_L - X_C) = I^2 \cdot x}$$

Полная мощность *есть максимально возможное значение активной мощность при* $\varphi = 0$

$$S = UI.$$

Полной мощностью *S называется величина, равная произведению действующих значений тока и напряжения на зажимах цепи.* Единица измерения [ВА].

$$\boxed{S = \sqrt{P^2 + Q^2}.} \qquad \boxed{\dot{S} = P + jQ.}$$

Прямоугольный треугольник образуемый вектором полной мощности вместе с активной и реактивной составляющими на комплексной плоскости называется ***треугольником мощностей****.*

Коэффициент мощности

$$\boxed{\cos(\varphi) = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S}}$$

Для анализа количественных и фазовых соотношений величин на переменном токе на комплексной плоскости строят векторы, соответствующие режиму работы электрической цепи. Такая совокупность векторов называется векторной диаграммой.

Символический метод

Этапы применения символического метода:

1. *Определяем топологические параметры цепи: количество узлов, ветвей, контуров.*
2. *Представляем все величины и параметры цепи комплексными числами.*
3. *Составляем комплексную схему замещения электрической цепи, на которой все данные указаны в комплексной форме. Указываем положительное направление токов в ветвях цепи.*
4. *Определяем искомые величин любым методом расчета, известным из теории цепей постоянного тока.*
5. *Преобразовываем полученные комплексные величины в форму представления их синусоидальными функциями времени.*