

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Иркутский государственный университет путей сообщения
Сибирский колледж транспорта и строительства

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ
по учебной дисциплине ОПЦ.03. Основы электротехники
по специальности

02 02 .01 Строительство и эксплуатация зданий и сооружений
базовая подготовка среднего профессионального образования

Иркутск 2023

РАССМОТРЕНО:
Цикловой методической
комиссией общетехнических и
электротехнических дисциплин
Председатель ЦМК: Игнатенко Ж.С.
Протокол № 9
«25» мая 2023 г.

Разработчик: Д.Б. Попов преподаватель ФГБОУ ВО ИрГУПС СКТиС

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

Контрольная работа состоит из четырех задач. Каждая задача относится к определенной теме. Задача №1 Расчет цепей постоянного тока относится к теме 1.2 Электрические цепи постоянного тока.

Задача №2 Расчет параметров переменного тока и задача №3 Расчет неразветвленных электрических цепей переменного тока относятся к теме 1.4. Переменный электрический ток. Электрические цепи однофазного переменного тока.

Задача №4, 5 Практическое занятие 4 Расчет трехфазных электрических цепей переменного тока, соединенных «треугольником» ; практическое занятие 5 Расчет трехфазных электрических цепей переменного тока, соединенных «звездой» относятся к теме 1.5. Электрические цепи трехфазного переменного тока

Методические указания к решению задачи 1

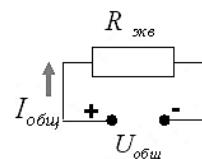
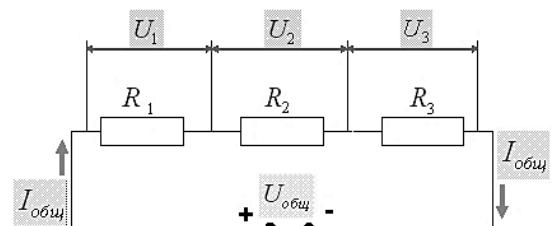
РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Решение этой задачи требует знания закона Ома для всей цепи и ее участков, первого закона Кирхгофа и методики определения эквивалентного сопротивления цепи смешанного соединения резисторов.

Теоретические сведения:

Взаимосвязь между основными параметрами цепи устанавливаются по закону Ома: $I = \frac{U}{R}$
Последовательным соединением приемников электроэнергии (рис.1) называется соединение, при котором конец первого приемника соединен с началом второго, конец второго с началом третьего и т. д.

При размыкании цепи у одного из последовательно соединенных потребителей ток исчезает во всей цепи.



Законы последовательного соединения приемников:

рис.1

$I_{общ} = I_1 = I_2 = I_3$ сила тока на всех участках цепи одинакова

$U_{общ} = U_1 + U_2 + U_3$ напряжение на зажимах источника напряжения равна сумме напряжений на всех её участках

$R_{экв} = R_1 + R_2 + R_3$ эквивалентное (общее) сопротивление цепи равно сумме сопротивлений, составляющих цепь

Параллельным соединением приемников (рис.2) электрической энергии называется соединение, при котором начала всех ветвей электрической цепи присоединяются к первому узлу, концы этих же ветвей присоединяются ко второму узлу.

Узел – точка, в котором сходится более двух проводников.

Ветвь – каждый из проводников, расположенный между двумя узлами.

Разветвление – все вместе параллельно соединенные проводники.

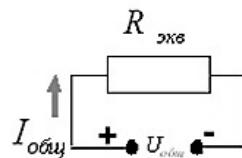
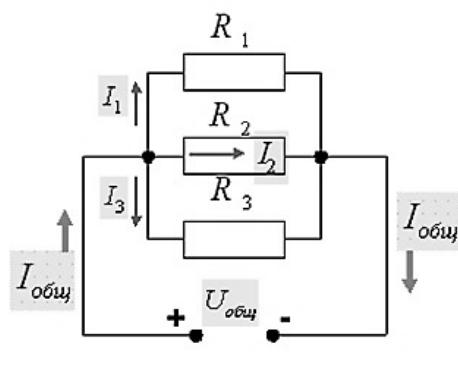


рис.

Законы параллельного соединения приемников.

$U_{общ} = U_1 = U_2 = U_3$ напряжение на зажимах источника напряжения и на отдельных участках одинаковы

$I_{общ} = I_1 + I_2 + I_3$ сила тока в неразветвленной части цепи равен сумме токов в разветвлении

$G_{экв} = G_1 + G_2 + G_3$ эквивалентная (общая) проводимость разветвления цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей, составляющих цепь

$$\frac{1}{R_{общ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{123} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

Так как напряжение между узлами постоянно, то токи в ветвях не зависят друг от друга. Поэтому при отключении одной из ветвей все остальные ветви будут продолжать работать.

- Чем больше ветвей в параллельном соединении, тем меньше общее сопротивление всей цепи.
- При параллельном соединении резисторов их общее сопротивление будет меньше наименьшего из сопротивлений.

Схемы для расчета и данные смотреть в Приложении 1.

Пример 1:

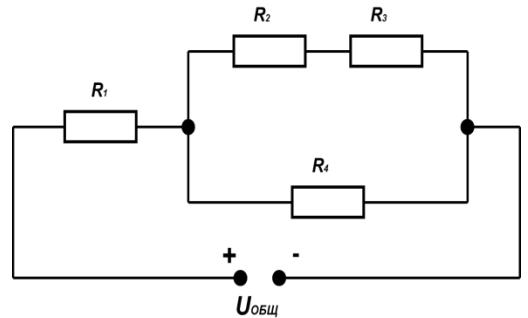
Методические указания к решению задачи 1

Расчетно - графическая работа №1

Расчет электрических цепей постоянного тока

Дано: $R_1, R_2, R_3, R_4, U_{общ}$

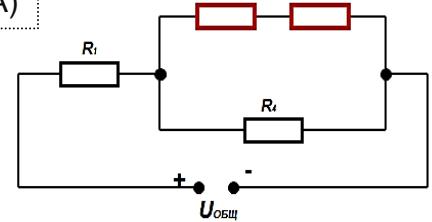
Определить: все токи и напряжения электрической цепи



Преобразуем схему, разбив ее на части. В этих частях должны присутствовать простейшие, чисто последовательные или чисто параллельные соединения.

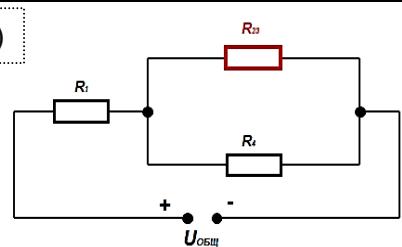
В схеме имеется чисто последовательное соединение резисторов R_2 и R_3 .

Схема А)



- По законам последовательного соединения можно найти эквивалентное им сопротивление $R_{23} = R_2 + R_3$
- В схеме (Б) имеется чисто параллельное соединение резисторов R_{23} и R_4 .

Схема Б)

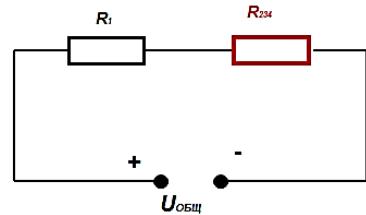


- По законам параллельного соединения можно найти эквивалентное им сопротивление:

$$R_{234} = \frac{R_{23} \cdot R_4}{R_{23} + R_4}$$

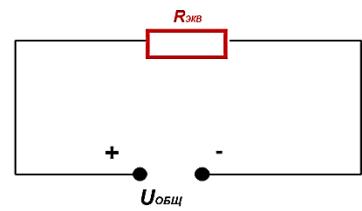
- В схеме (В) имеется чисто последовательное соединение резисторов R_1 и R_{234} .

Схема В)



По законам последовательного соединения можно найти эквивалентное сопротивление всей схемы
 $R_{экв} = R_1 + R_{234}$

Схема С)



Рассчитаем все токи и все напряжения, которые можно определить в данной цепи.

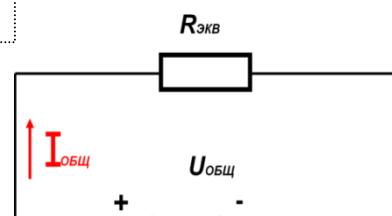
Определение и расчет цепи начинаем с самого простейшего варианта (С).

Дано: $R_{экв}$, $U_{общ}$

$$I_{общ} = \frac{U_{общ}}{R_{экв}}$$

Определяем: $I_{общ}$ по закону Ома:

Схема С)



Дано: R_1 , R_{234} , $I_{общ}$, $U_{общ}$

Определяем падение напряжения на каждом резисторе.

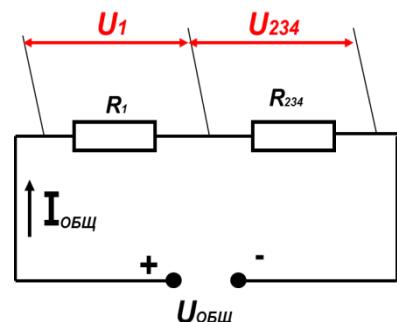
По законам последовательного соединения

$$U_{общ} = U_1 + U_{234}$$

По закону Ома:

$$U_1 = I_{общ} \cdot R_1 \quad U_{234} = I_{общ} \cdot R_{234}$$

Схема В)



Дано: R_1 , R_{23} , R_4 , $I_{общ}$, $U_{общ}$, U_1 , U_{234}

Определяем токи разветвлений I_{23} и I_4

По закону параллельного соединения:

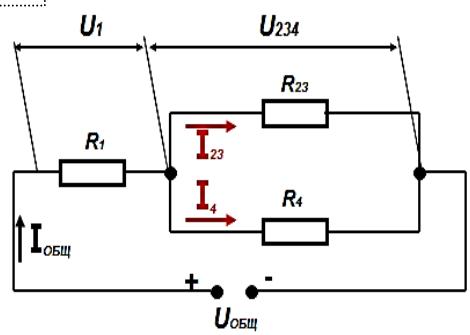
$$I_{общ} = I_{23} + I_4$$

$$I_{23} = \frac{U_{234}}{R_{23}}$$

$$I_4 = \frac{U_{234}}{R_4}$$

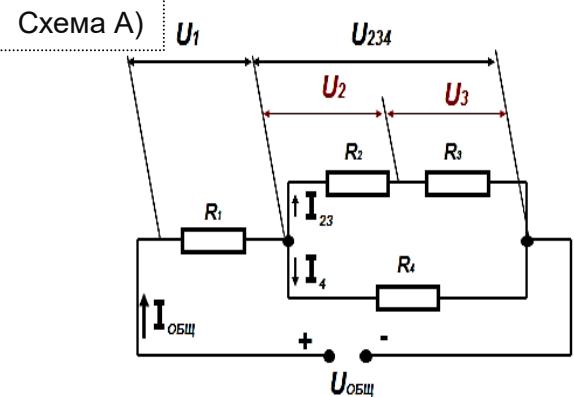
по закону Ома:

Схема Б)



Дано: R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , $U_{общ}$, $I_{общ}$, U_1 , U_{234} , I_{23} , I_4

Определяем падение напряжения на резисторах R_2 и R_3
по закону Ома: $U_2 = I_{23} \cdot R_2$ $U_3 = I_{23} \cdot R_3$



РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Теоретические сведения:

Параметры переменного электрического тока:

1. *Период T* (рис.3) – время, в течение которого происходит весь цикл изменения переменных ЭДС, тока или напряжения; измеряется в секундах (с).
2. *Частота f* – величина, обратная периоду, показывающая, сколько периодов содержится в 1 секунде (или число оборотов ротора в секунду); единица измерения Герц (Гц):

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{стандартная частота в России } f_{cm} = 50 \text{ Гц}$$

3. *Угловая частота ω* - скорость изменения угла α в течение времени t , единица измерения радиан в секунду (рад/с):

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \Rightarrow \alpha = \omega t \Rightarrow t = \frac{\alpha}{\omega}$$

На практике для России $\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$

4. *Амплитудные значения тока I_m , напряжения U_m , эдс E_m* (рис.3) – максимальные значения мгновенных величин тока, напряжения и ЭДС.
5. *Мгновенные значения тока i , напряжения u , эдс e* (рис.4) – значения этих величин в любой момент времени. Изменяются по синусоидальному закону:

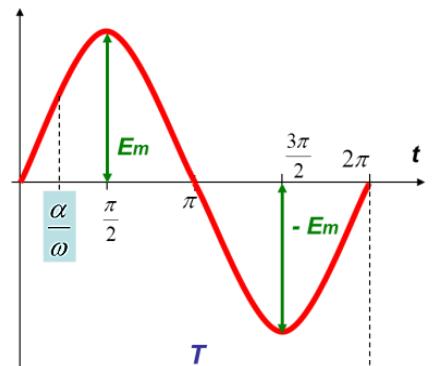


рис.3

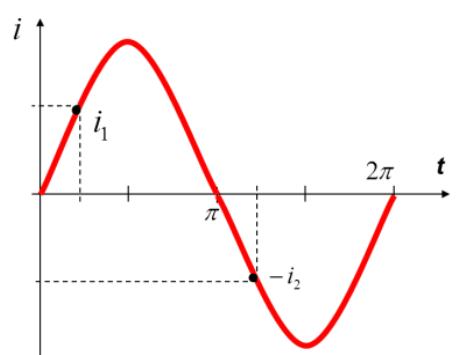


рис.4

$i = I_m \sin \omega t$
$u = U_m \sin \omega t$
$e = E_m \sin \omega t$

6. Действующие значения тока I , напряжения U и эдс E - вводятся для измерения синусоидальных величин тока, напряжения и ЭДС. Действующие значения синусоидальных величин наносятся на шкалы электроизмерительных приборов, измеряющих переменные значения

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m$$

Действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который за время, равное одному периоду, выделяет на резисторе одинаковое количество теплоты с переменным током

Не всегда начальный момент отсчета времени $t_1 = 0$ совпадает с прохождением через ноль синусоидальной величины, и в связи с этим на графике вектор I_m в начальный момент времени образует с горизонтальной осью некоторый угол α .

При этом в момент начала отсчета времени синусоидальная величина имеет значение: Угол α (рис.5) называется *начальным фазовым углом* или *начальной фазой*:

$$i_1 = I_m \sin(\omega t_1 + \alpha) = I_m \sin \alpha$$

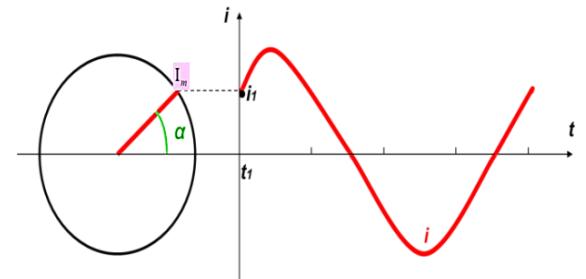


рис.5

Сдвиг фаз синусоидальных величин.

При вращении ротора с двумя укрепленными на нем витками e_1 и e_2 , в них будет индуцироваться ЭДС одинаковой частоты и с одинаковыми амплитудами (рис.6)

В следствие сдвига витков относительно друг друга в пространстве ЭДС достигают амплитудных значений не одновременно:

где α_1 и α_2 начальные фазы, определяют величину смещения синусоид e_1 и e_2 относительно начала координат графика.

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \alpha_1)$$

$$e_2 = E_m \sin(\omega t + \alpha_2)$$

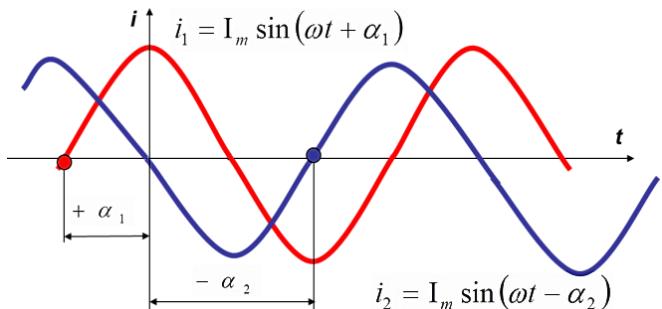


рис.6

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин называется *сдвигом фаз* (рис.7):

$$\varphi = \alpha_1 - \alpha_2$$

Началом периода называется момент времени, в котором синусоидальная величина

проходит через нулевое значение, после которого начинается её положительное значение.

Начальная фаза α отсчитывается по оси t от начала

периода синусоиды до начала координат.

При $\alpha > 0$ – начало синусоиды сдвигается влево от начала координат

При $\alpha < 0$ – начало синусоиды сдвигается вправо от начала координат.

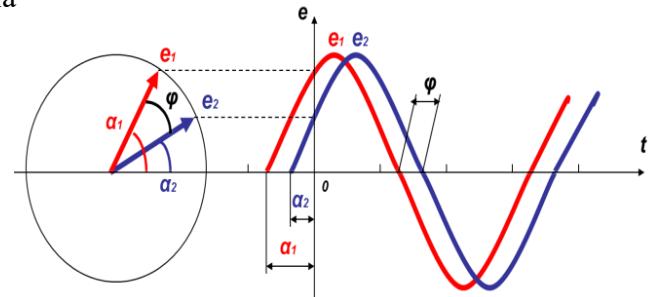


рис.7

Синусоида, у которой начало периода возникает слева на графике раньше, чем у другой – считается *опережающей по фазе*; а та, у которой позже – *отстающей по фазе*.

Методические указания к решению задачи 3

Расчет неразветвленных электрических цепей переменного тока

Теоретические сведения: Однофазные электрические цепи переменного тока.

Участки цепи, где происходит в основном преобразование электромагнитной энергии в тепловую, обладают сопротивлением, которое называется *активным сопротивлением* и обозначается – R_a

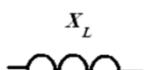
R_a – величина, характеризующая сопротивление цепи переменному току:

На таком участке включены резисторы, лампы накаливания, электронагревательные устройства, а также ферромагнитные сердечники различных электротехнических устройств

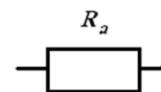
Участки цепи, где выражены в основном магнитные поля, обладают индуктивностью, которое называется *реактивным индуктивным сопротивлением* и обозначается – χ_L

$$\chi_L = \omega \cdot L \quad \text{единица измерения} \quad (\Omega)$$

На таком участке цепи включены индуктивные катушки различных электротехнических устройств (например обмотки полюсов электрических машин, обмотки трансформаторов).



Обозначение на схеме



Обозначение на схеме

$$R_a = \frac{U}{I}$$

единица измерения (Ом)

Участки цепи, где выражены в основном электрические поля, обладают емкостью, которое называется *реактивным емкостным сопротивлением* и обозначается – χ_c

$$\chi_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \text{единица измерения} \quad (\Omega)$$



Обозначение на схеме

На таком участке цепи включены конденсаторы, электрические кабели.

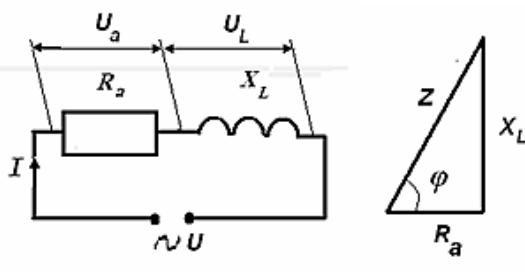
Однофазные электрические цепи, включающие вышеперечисленные параметры, называются цепями с сосредоточенными параметрами и позволяют изучить свойства отдельных участков цепи, обладающих *смешанными соединениями*:

Закон Ома для цепей переменного тока

$$I = \frac{U}{Z}$$

Для цепей переменного тока для *смешанных соединений* в закон Ома вводится понятие *полного сопротивления цепи* Z , в котором учитываются все виды сопротивлений. Z определяется из *треугольника сопротивлений*:

для активно - индуктивной цепи



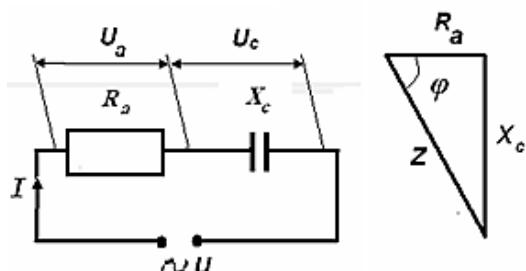
$$Z = \sqrt{R_a^2 + \chi_L^2}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_a^2 + \chi_L^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R_a}{Z}$$

$$\sin \varphi = \frac{U_L}{U} = \frac{\chi_L}{Z}$$

для активно - емкостной цепи



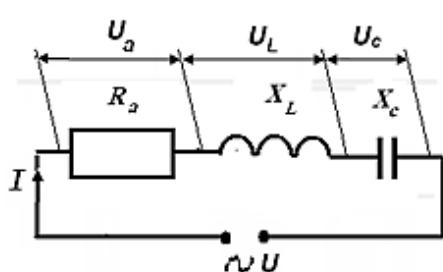
$$Z = \sqrt{R_a^2 + \chi_c^2}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_a^2 + \chi_c^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R_a}{Z}$$

$$\sin \varphi = \frac{U_c}{U} = \frac{\chi_c}{Z}$$

для активно - индуктивно - емкостной цепи

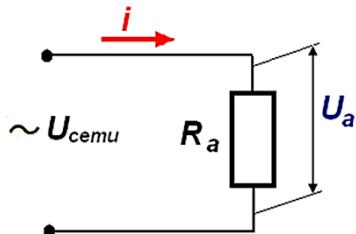


$$Z = \sqrt{R_a^2 + (\chi_L - \chi_c)^2} \quad \text{для } \chi_L > \chi_c$$

$$Z = \sqrt{R_a^2 + (\chi_c - \chi_L)^2} \quad \text{для } \chi_c > \chi_L$$

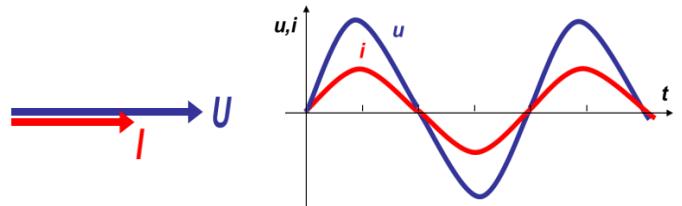
$$I = \frac{U}{Z}$$

Цепи с активным сопротивлением

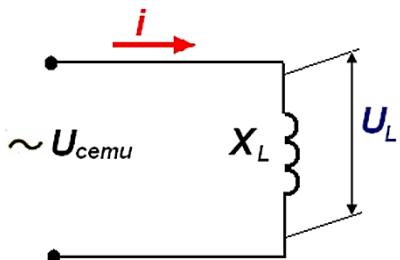


В проводнике с активным сопротивлением колебания тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения, м.е. $\angle \varphi = 0$

На векторной диаграмме показывается совпадение I и U в виде параллельных векторов.

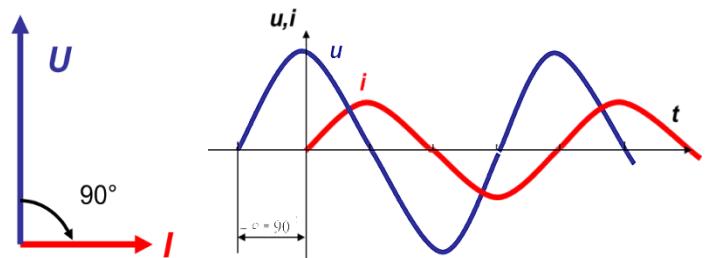


Цепи с индуктивным сопротивлением

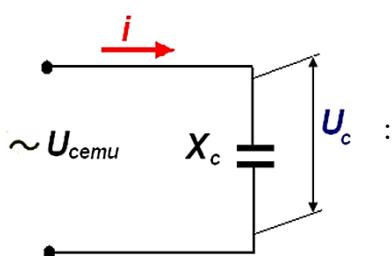


Ток в цепи с индуктивностью отстает от напряжения этой цепи $1/4$ периода, или $\angle \varphi = 90^\circ$

На векторной диаграмме отставание тока от напряжения показывается по часовой стрелке:

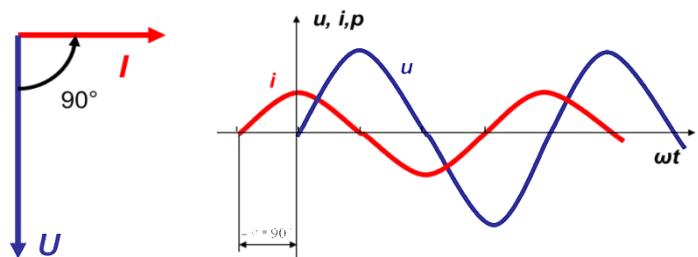


Цепи переменного тока с емкостным сопротивлением



Ток в цепи с емкостью в своих изменениях опережает по фазе напряжение конденсатора на $1/4$ периода, или $\angle \varphi = 90^\circ$

На векторной диаграмме опережение I относительно U показывается против часовой стрелки.



Схемы для расчета и данные смотреть Приложении 3.

Пример 2:

Расчетно - графическая работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

- дано:
- $$i_1 = 15 \sin\left(314t + \frac{\pi}{2}\right)$$
- $$i_2 = 25 \sin\left(314t - \frac{\pi}{6}\right)$$
- Определить:
1. Амплитуду тока
 2. Действующее значение тока
 3. Начальную фазу тока
 4. Угловую частоту
 5. Частоту
 6. Период
 7. Мгновенное значение тока в начальный момент времени
 8. Сдвиг по фазе между заданными токами
 9. Построить график токов и круговую диаграмму

Амплитудные значения тока I_m

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$

$$I_{m1} = 15 \text{ A} \quad I_{m2} = 25 \text{ A}$$

2. Действующие значения тока $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot I_m$

$$I_1 = \frac{15}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot 15 = 10,6 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{25}{\sqrt{2}} = 0.707 \cdot 25 = 17,7 \text{ A}$$

3. Угол α (начальная фаза) $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad \alpha_2 = -\frac{\pi}{6} = -30^\circ$

1. Угловая частота ω (рад/с) $\omega = 314 \text{ rad/s}$

5. Частота f (Гц)

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \cdot 3,14} = 50 \text{ Гц}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}$$

6. Период Т (с)

7. Мгновенное значение тока в начальный момент времени

$$i_1 = 15 \sin \left(314 \cdot 0 + \frac{\pi}{2} \right) = 15 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = 15 \cdot 1 = 15 \text{ A}$$

$$i_2 = 25 \sin \left(314 \cdot 0 - \frac{\pi}{6} \right) = 25 \cdot \sin \left(-\frac{\pi}{6} \right) = 25 \cdot \sin \frac{11\pi}{6} = 25 \cdot (-0,5) = -12,5 \text{ A}$$

8. Сдвиг по фазе между заданными токами

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{6} \right) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{6} = \frac{2\pi}{3} = 120^0$$

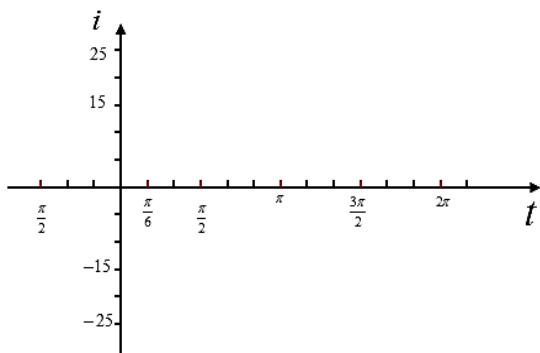
Построение графика токов

1. Для построения графиков токов подготовим координатную сетку

а) Отложить на оси t фазные углы, измеряемые в радианах



в) Отложить по оси i амплитудные значения токов

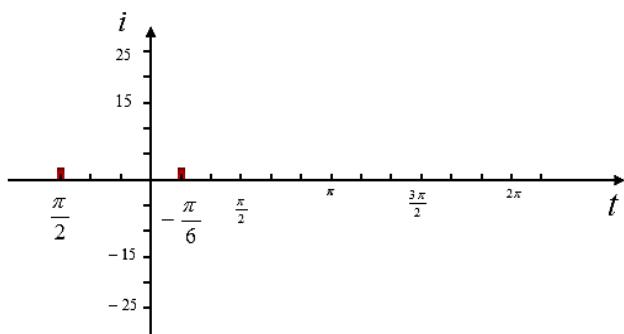


2. На начальном этапе построения графиков откладываются начальные фазы, которые будут являться началом периода синусоид

Начальная фаза α отсчитывается по оси t от начала синусоиды до начала координат:

При $\alpha > 0$ - начало синусоиды сдвигается влево от начала координат

При $\alpha < 0$ - начало синусоиды сдвигается вправо от начала координат.

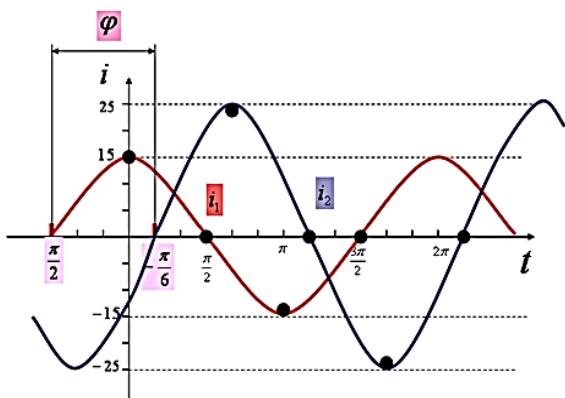


$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} = 90^\circ > 0$$

$$\alpha_2 = -\frac{\pi}{6} = -30^\circ < 0$$

5. Определяем угол сдвига фаз между токами i_1 и i_2

По расчетам и на графике $\varphi = 120^\circ$

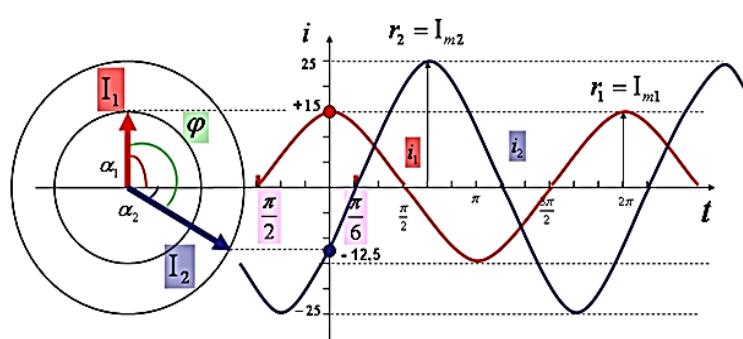


6. Построим круговую диаграмму в начальный момент времени $t = 0$.

По расчетам значения токов в этот момент времени $i_1 = 15 A$ $i_2 = -12,5 A$.

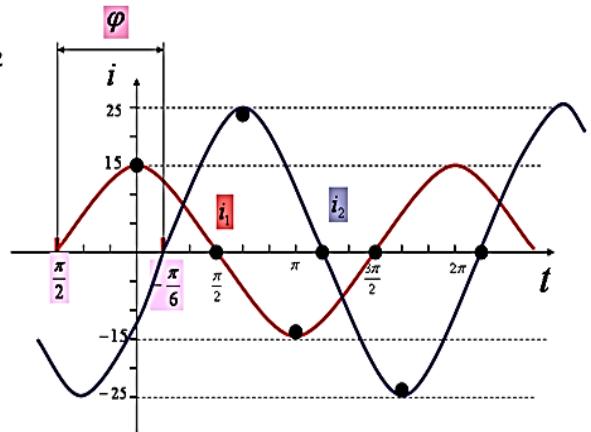
Строим по этим значениям вспомогательные окружности. Переносим значения токов в соответствии с их начальными фазами $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ $\alpha_2 = -\frac{\pi}{6}$ на эти окружности. Строим вектора токов.

Угол сдвига фаз на векторной диаграмме также должен быть равен $\varphi = 120^\circ$



5. Определяем угол сдвига фаз между токами i_1 и i_2

По расчетам и на графике $\varphi = 120^\circ$

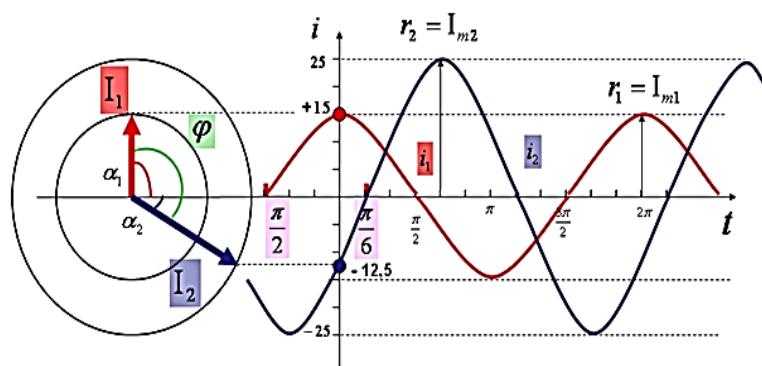


6. Построим круговую диаграмму в начальный момент времени $t=0$.

По расчетам значения токов в этот момент времени $i_1 = 15 \text{ A}$ $i_2 = -12.5 \text{ A}$.

Строим по этим значениям вспомогательные окружности. Переносим значения токов в соответствии с их начальными фазами $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ $\alpha_2 = -\frac{\pi}{6}$ на эти окружности. Строим вектора токов.

Угол сдвига фаз на векторной диаграмме также должен быть равен $\varphi = 120^\circ$

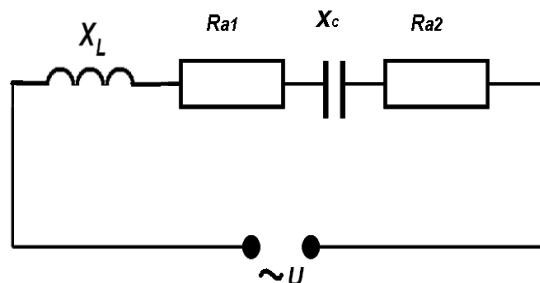


Данные для расчета смотреть в Приложении 3.

Пример 3:

Расчетно - графическая работа №3

Расчет неразветвленных цепей переменного тока



Дано:

$$X_L = 9 \text{ Ом}$$

$$R_{a1} = 5 \text{ Ом}$$

$$X_C = 15 \text{ Ом}$$

$$R_{a2} = 3 \text{ Ом}$$

$$U = 200 \text{ В}$$

Определить:

1. \tilde{Z} - общее сопротивление цепи
2. I - общий ток цепи
3. $\cos \varphi$ - коэффициент мощности
4. Падения напряжения на каждом сопротивлении
5. Построить в масштабе векторную диаграмму
6. Активную P , реактивную Q , полную S мощности цепи

1. ОПРЕДЕЛЯЕМ общее сопротивление цепи Z

$$Z = \sqrt{(R_{a1} + R_{a2})^2 + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{(5+3)^2 + (15-9)^2} = 10 \text{ } \Omega$$

2. ОПРЕДЕЛЯЕМ общий ток цепи I

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{200}{10} = 20 \text{ A}$$

3. ОПРЕДЕЛЯЕМ коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R_{a1} + R_{a2}}{Z} = \frac{5+3}{10} = 0,8 \quad \text{По таблице Брадиса определяем угол } \varphi = 36^\circ$$

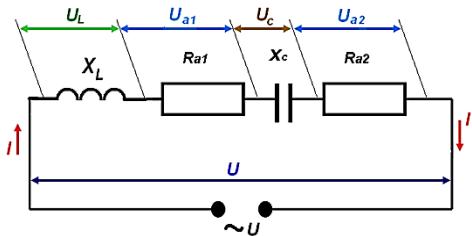
4. ОПРЕДЕЛЯЕМ падения напряжения на сопротивлениях

$$U_{a1} = I \cdot R_{a1} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ B}$$

$$U_{a2} = I \cdot R_{a2} = 20 \cdot 3 = 60 \text{ B}$$

$$U_L = I \cdot X_L = 20 \cdot 9 = 180 \text{ B}$$

$$U_C = I \cdot X_C = 20 \cdot 15 = 300 \text{ B}$$



5. ПОСТРОИМ векторную диаграмму тока и напряжений и докажем правильность произведенных расчетов

Построим векторную диаграмму с помощью векторного сложения найденных значений падений напряжений: $\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_{a1} + \vec{U}_C + \vec{U}_{a2}$

Выбираем масштаб

для тока и напряжений

$$U_{a1} = 100 \text{ B} \quad U_{a2} = 60 \text{ B}$$

$$M_1 = 5 \text{ A/cm} \Rightarrow I = 4 \text{ см}$$

$$U_L = 180 \text{ B} \quad U_C = 300 \text{ B}$$

$$M_U = 50 \text{ B/cm} \Rightarrow U_{a1} = 2 \text{ см}$$

$$U = 200 \text{ B} \quad I = 20 \text{ A}$$

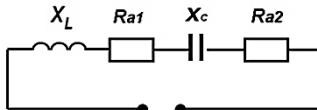
$$U_{a2} = 1,2 \text{ см}$$

$$U_L = 3,6 \text{ см}$$

$$U_C = 6 \text{ см}$$

$$U = 4 \text{ см}$$

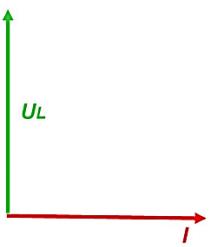
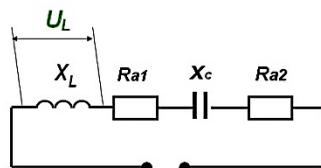
1. Откладываем горизонтально вектор $I = 4 \text{ см}$



2. В электрической схеме первым по счету стоит реактивное индуктивное сопротивление X_L

- Падение напряжения на нем U_L

- На векторной диаграмме вектор U_L откладывается относительно вектора тока вверх (против часовой стрелки)

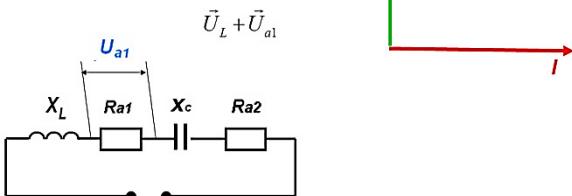


3. В электрической схеме вторым по счету стоит активное сопротивление R_{a1}

- Падение напряжения на нем U_{a1}

- На векторной диаграмме вектор U_{a1} откладывается относительно вектора тока параллельно

- При этом производится векторное сложение

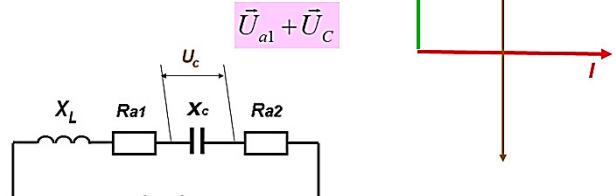


4. В электрической схеме третьим по счету стоит реактивное емкостное сопротивление X_c

- Падение напряжения на нем U_c

- На векторной диаграмме вектор U_c откладывается относительно вектора тока вниз (по часовой стрелке)

- При этом производится векторное сложение



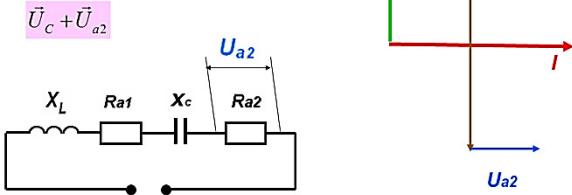
5. В электрической схеме четвертым по счету стоит активное сопротивление R_{a2}

- Падение напряжения на нем U_{a2}

- На векторной диаграмме вектор U_{a2}

откладывается относительно вектора тока параллельно

- При этом производится векторное сложение



6. После геометрического сложения всех четырех векторов напряжений определяем полное напряжение схемы:

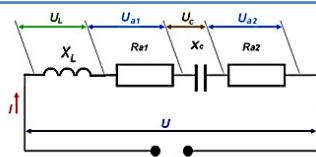
$$\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_{a1} + \vec{U}_c + \vec{U}_{a2}$$

- Для этого соединяем начало самого первого сопротивления U_L

с концом самого последнего вектора U_{a2}



Из векторной диаграммы определяем, что:
 $U = 4 \text{ см}$ или $U = 200 \text{ В}$ $\varphi = 36^\circ$

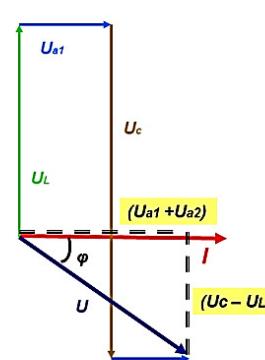


Вектор U является гипотенузой прямоугольного треугольника, катеты которого:

$$(U_{a1} + U_{a2}) \quad (U_c - U_L)$$

по теореме Пифагора :

$$U^2 = (U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_c - U_L)^2$$



ОПРЕДЕЛЯЕМ активную мощность электрической цепи:

$$P = I^2 \cdot (R_{a1} + R_{a2}) = 20^2 \cdot (5 + 3) = 3200 \text{ Вт}$$

или

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 200 \cdot 20 \cdot 0,8 = 3200 \text{ Вт}$$

ОПРЕДЕЛЯЕМ реактивную мощность электрической цепи:

$$Q = I^2 \cdot (X_c - X_L) = 20^2 \cdot (15 - 9) = 2400 \text{ ВАр}$$

или

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 200 \cdot 20 \cdot 0,6 = 2400 \text{ ВАр}$$

ОПРЕДЕЛЯЕМ полную мощность электрической цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3200^2 + 2400^2} = 4000 \text{ ВА}$$

или

$$S = U \cdot I = 200 \cdot 20 = 4000 \text{ ВА}$$

Данные для расчета смотреть в Приложении 3.

Методические указания к решению задачи 4

Расчет трехфазных электрических цепей переменного тока

Теоретические сведения:

В трехфазной системе переменного тока действуют три эдс одинаковой частоты, взаимно смещенные по фазе на одну треть ($\frac{1}{3}T$) периода.

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

$$e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_C = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

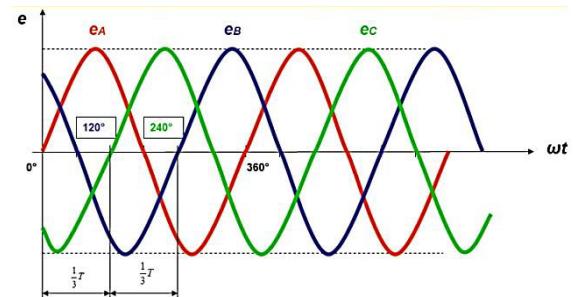


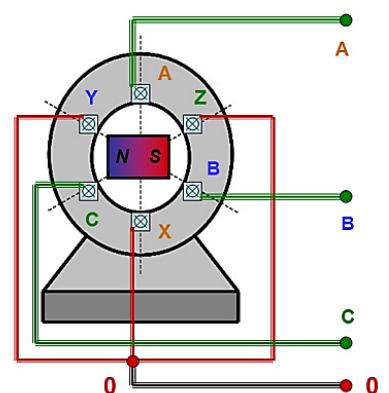
рис.8

Обмотки генератора можно соединить двумя способами: «звездой» и «треугольником».

Соединение обмоток генератора «звездой».

При соединении обмоток звездой концы обмоток X, Y, Z соединяются в одну точку N, называемую *нулевой точкой или нейтралью генератора*.

В четырехпроводной системе к нейтрали присоединяется нейтральный, или нулевой провод. К



Четырехпроводная

рис.9

началам обмоток генератора присоединяются три линейных провода.

Напряжения между началами и концами фаз, или, что то же, напряжения между каждым из линейных проводов и нулевым, называются *фазными напряжениями* и обозначаются U_A , U_B , U_c или в общем виде U_ϕ

Напряжения между началами обмоток, или, что то же, между линейными проводами, называются *линейными напряжениями* и обозначаются U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} или в общем виде U_L .

Обычно все фазы обмотки генератора выполняются одинаковыми, так что действующие значения эдс в фазах равны, т. е. $E_A=E_B=E_C$, но сдвинуты относительно друг друга на $\angle\phi = 120^\circ$. На векторной диаграмме это показывается следующим образом.

Такую же диаграмму имеют фазные напряжения генератора U_A , U_B , U_c .

Соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении обмоток генератора «звездой».

Вектор линейного напряжения равен разности векторов соответствующих фазных напряжений.

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B = \vec{U}_A + (-\vec{U}_B)$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C = \vec{U}_B + (-\vec{U}_C)$$

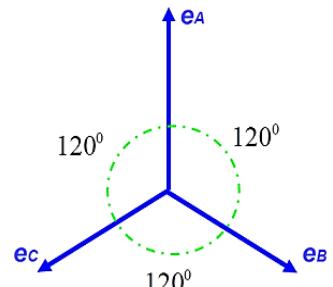
$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A = \vec{U}_C + (-\vec{U}_A)$$

Из векторной диаграммы видно, что вектор линейного напряжения при соединении обмоток генератора «звездой» большие вектора фазного напряжения $a\sqrt{3}$:

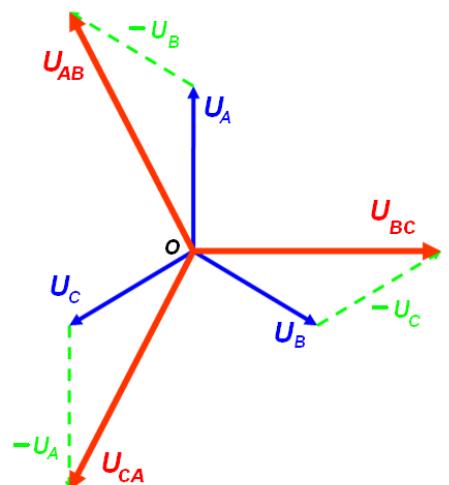
$$U_\pi = \sqrt{3} U_\phi$$

Соединение обмоток генератора «треугольником».

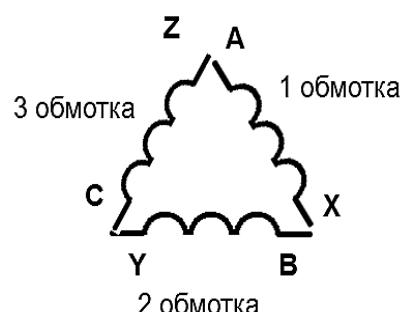
При соединении обмоток трехфазного генератора треугольником конец первой обмотки X соединяется с началом второй обмотки B , конец второй обмотки Y соединяется с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z с началом первой A . Три линейных провода, идущих к приемникам энергии, присоединяются к началам фаз A, B и C .



Векторная диаграмма трехфазных ЭДС



Векторная диаграмма напряжений



При таком соединении обмоток *фазные напряжения равны линейным*:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A \\ U_{BC} &= U_B \\ U_{CA} &= U_C \end{aligned}$$

$$U_\varphi = U_\text{L}$$

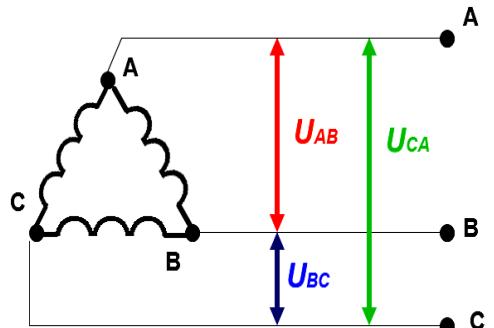


Схема соединения обмоток трехфазного генератора треугольником

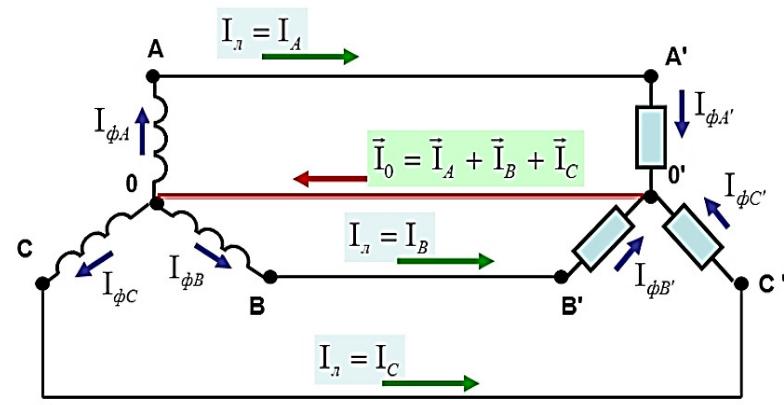
Соединение генератора и приемника энергии «звездой».
при таком соединении система может быть

1. Четырехпроводной – используется при осветительной нагрузке
2. Трехпроводной – используется при силовой нагрузке (т.е. при подключении электродвигателей)

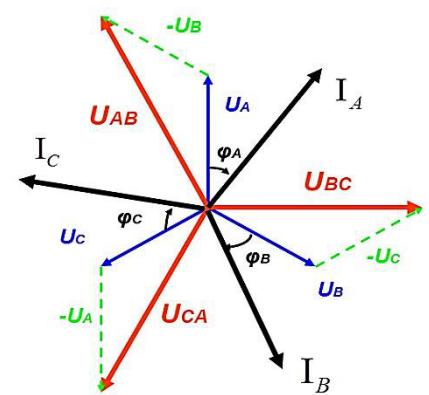
Четырехпроводная система трехфазного тока.

Если фазные обмотки генератора или потребителя соединить так, чтобы концы обмоток были соединены в одну общую точку, а начала обмоток присоединены к линейным проводам, то такое соединение называется соединением звездой и обозначается условным знаком Y. На рисунке обмотки генератора и потребителя соединены звездой. Точки, в которых соединены концы фазных обмоток генератора или потребителя, называются соответственно нулевыми точками генератора (0) и потребителя (0').

Обе точки 0 и 0' соединены проводом, который называется *нулевым, или нейтральным проводом*. Остальные три провода трехфазной системы, идущие от генератора к потребителю, называются *линейными проводами*. Таким образом, генератор соединен с потребителем четырьмя проводами. Поэтому эта система называется *четырехпроводной системой трехфазного тока*.



Трехфазная четырехпроводная система переменного тока



Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений, линейных токов для соединения «звездой»

Ток, протекающий по фазной обмотке генератора или потребителя, называется *фазным током* и обозначается в общем виде I_ϕ . Ток, протекающий по линейному проводу, называется *линейным током* и обозначается в общем виде I_π . По нулевому проводу протекает ток, равный геометрической сумме трех токов: $\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$.

При соединении звездой линейный ток равен фазному току $I_\pi = I_\phi$

Напряжения, измеренные между началами фаз генератора (или потребителя) и нулевой точкой (или нулевым проводом), называются фазными напряжениями и обозначаются U_A , U_B , U_C или в общем виде U_ϕ .

Напряжения, измеренные между началами двух фаз: A и B , B и C , C и A — генератора или потребителя, называются линейными напряжениями и обозначаются U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} или в общем виде U_π . При этом $U_\pi = \sqrt{3} U_\phi$.

Определение фазных токов приемников, производится так же, как и в однофазных цепях переменного тока:

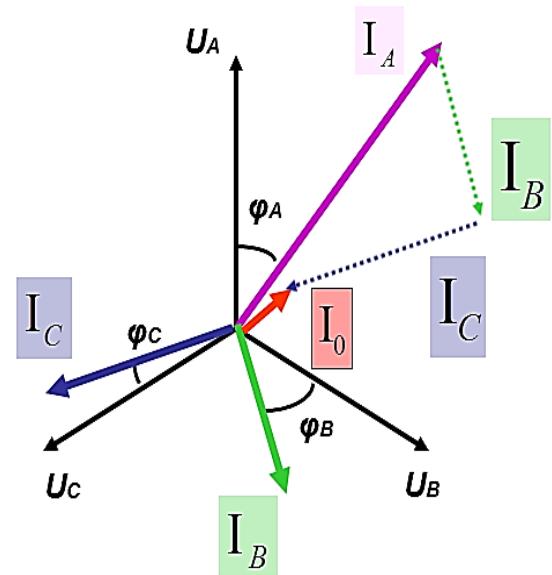
$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B} \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}$$

Углы сдвига токов относительно фазных напряжений определяются из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A} \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B} \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}$$

Действующее значение тока в нейтральном проводе можно определить только с помощью векторной диаграммы при геометрическом сложении векторов линейных (фазных) токов:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$$



Соединение генератора и приемника энергии «треугольником».

Кроме соединения звездой, генераторы, трансформаторы, двигатели и другие потребители трехфазного тока могут включаться «треугольником».

Соединение «треугольником» выполняется таким образом, чтобы конец фазы A был соединен с началом фазы B , конец фазы B соединен с началом фазы C и конец фазы C соединен с началом фазы A .

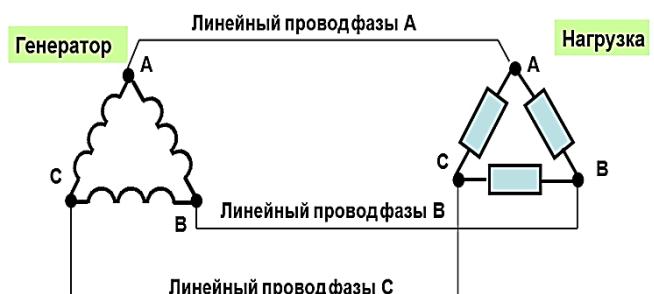


Схема включения генератора и нагрузки «треугольником»

К местам соединения фаз присоединяют линейные провода.

Если обмотки генератора соединены треугольником, то линейное напряжение создает каждая фазная обмотка.

У потребителя, соединенного треугольником, линейное напряжение подключается к зажимам фазного сопротивления. Следовательно, при соединении треугольником фазное напряжение равно линейному напряжению: $U_L = U_\phi$. И по схеме идут линейные и фазные токи.

Зависимость между фазными и линейными токами при соединении треугольником:

$$\begin{aligned}\vec{I}_A &= \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA} \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB} \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}\end{aligned}$$

Линейные токи равны геометрической разности фазных токов.

При симметричной нагрузке фазные токи одинаковы по величине и сдвинуты один относительно другого на 120° . Производя вычитание векторов фазных токов согласно полученным уравнениям, получаем линейные токи.

Из векторной диаграммы видно, что при соединении «треугольником» линейный ток больше фазного тока в $\sqrt{3}$ раз: $I_L = \sqrt{3} I_\phi$

Мощности трехфазного переменного тока

При равномерной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной сети, независимо от способа включения нагрузки, выражается следующей формулой:

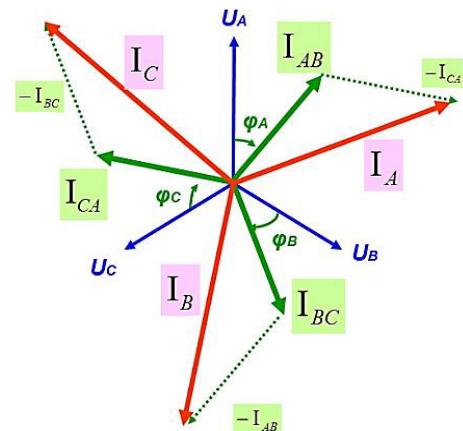
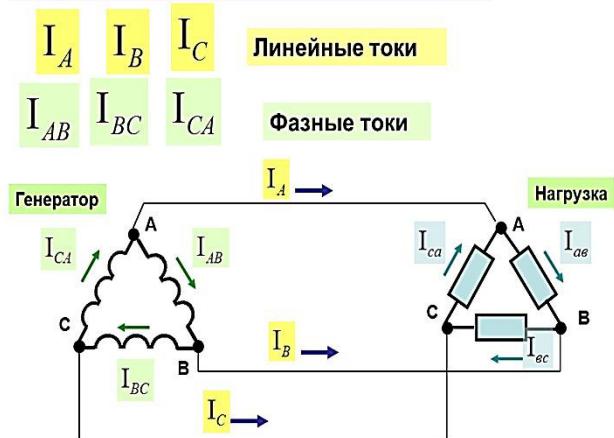
$P = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi$ активная мощность трехфазного тока при соединении звездой и треугольником

$P = \sqrt{3} I_L U_L \sin \varphi$ реактивная мощность трехфазного тока при соединении звездой и треугольником

$S = \sqrt{3} I_L U_L$ полная мощность при соединении звездой и треугольником Для измерения мощности применяют специальные измерительные приборы, называемые ваттметрами.

При соединении «треугольником»
фазное напряжение равно линейному
напряжению:

$$U_L = U_\phi$$

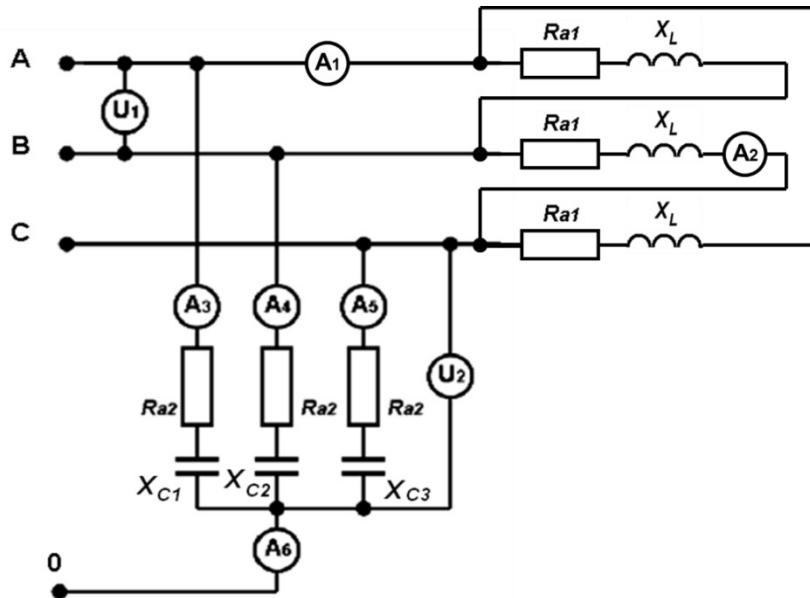


Векторная диаграмма
линейных и фазных токов
для соединения "треугольником"

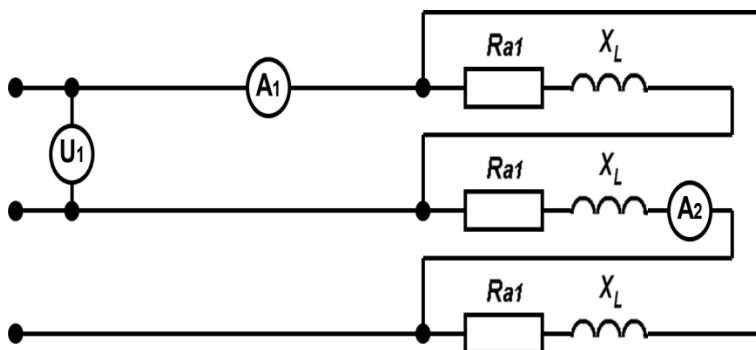
Пример 4:

Расчетно - графическая работа №4

Расчет трехфазных электрических цепей переменного тока



1. Расчет трехфазных электрических цепей, соединенных «треугольником»:



Дано: В трехфазную систему включена:

$$R_1 = R_A = R_B = R_C = 10 \text{ Ом}$$

а) симметричная активно-индуктивная нагрузка – $X_L = X_A = X_B = X_C = 8 \text{ Ом}$

Определить : показания всех приборов, включенных в схему и построить векторные диаграммы нагрузок если $U_1=220 \text{ В}$

Решение:

1) Определяем схему соединения нагрузок: Симметричная нагрузка $Ra1 - XL$ соединена в «треугольник»

– вольтметр U_1 - общий для всей цепи, включен между линейными проводами А и В:

$$U_1 = U_{\text{л}} = 220 \text{ B}$$

- амперметр A_1 измеряет линейный ток для нагрузки, соединенной в «треугольник»:

$$A_1 = I_{\text{л}1}$$

- амперметр A_2 измеряет фазный ток для нагрузки, соединенной в «треугольник»:

$$A_2 = I_{\phi 2}$$

При соединении генератора и нагрузки «треугольником»: $U_{\text{л}} = U_{\phi}$

Расчет линейного и фазного напряжений цепи: $U_{\text{л}} = U_{\phi} = 220 \text{ B}$

Расчет линейных и фазных токов цепи: $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}$

Ток каждой фазы определяется по закону Ома: $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}$

$$\underline{\text{Ток фазы } A} \quad I_{\phi A} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi A}} = \frac{220}{12,8} = 17 \text{ A}$$

$$Z_{\phi A} = \sqrt{R_{a1}^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 8^2} = \sqrt{164} = 12,8 \text{ Om}$$

$$\underline{\text{Ток фазы } B} \quad I_{\phi B} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi B}} = \frac{220}{12,8} = 17 \text{ A}$$

$$Z_{\phi B} = \sqrt{R_{a1}^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 8^2} = \sqrt{164} = 12,8 \text{ Om}$$

$$\underline{\text{Ток фазы } C} \quad I_{\phi C} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi C}} = \frac{220}{12,8} = 17 \text{ A}$$

$$Z_{\phi C} = \sqrt{R_{a1}^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 8^2} = \sqrt{164} = 12,8 \text{ Om}$$

Определяем линейный ток для каждой фазы:

$$I_{\text{л}A} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi A} = \sqrt{3} \cdot 17 = 29,4 \text{ A}$$

$$I_{\text{л}B} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi B} = \sqrt{3} \cdot 17 = 29,4 \text{ A}$$

$$I_{\text{л}C} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi C} = \sqrt{3} \cdot 17 = 29,4 \text{ A}$$

Начертим в масштабе векторную диаграмму

$$M_U = \frac{40 B}{1 \text{ см}} \Rightarrow U_\phi = U_\lambda = 5,5 \text{ см}$$

$$M_I = \frac{5 A}{1 \text{ см}} \Rightarrow I_\lambda = 5,9 \text{ см}, \quad I_\phi = 3,4 \text{ см}$$

Построение начинаем с векторов напряжений, располагая их под углом 120 градусов друг относительно друга.

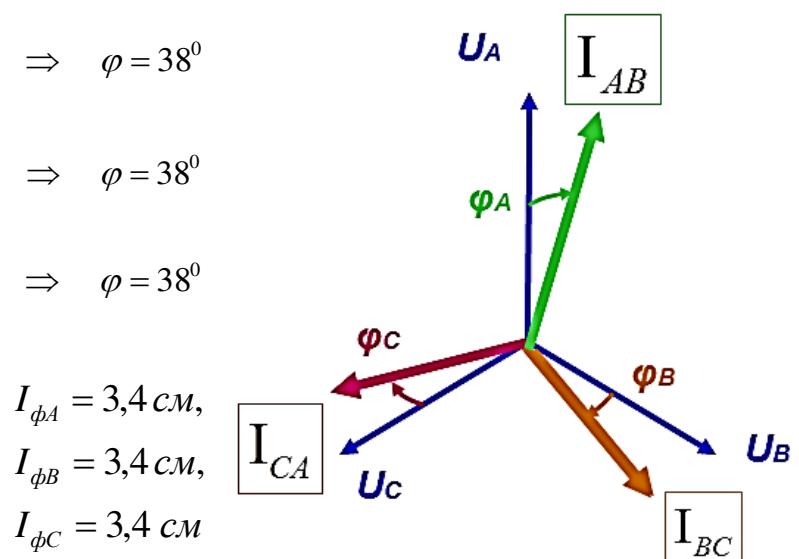
Откладываем фазные токи. Для этого определяем углы сдвигов фазных токов относительно фазных напряжений:

фаза A $\cos \varphi_A = \frac{R_{a1}}{Z_A} = \frac{10}{12,8} = 0,78 \Rightarrow \varphi = 38^\circ$

фаза B $\cos \varphi_B = \frac{R_{a1}}{Z_B} = \frac{10}{12,8} = 0,78 \Rightarrow \varphi = 38^\circ$

фаза C $\cos \varphi_C = \frac{R_{a1}}{Z_C} = \frac{10}{12,8} = 0,78 \Rightarrow \varphi = 38^\circ$

т.к. нагрузка в «треугольнике» активно – индуктивная, то откладываем фазные токи под углами, соответствующими каждой фазе в сторону отставания от фазных напряжений (по часовой стрелке)



Определяем линейные токи:

Линейные токи равны геометрической разности фазных токов.

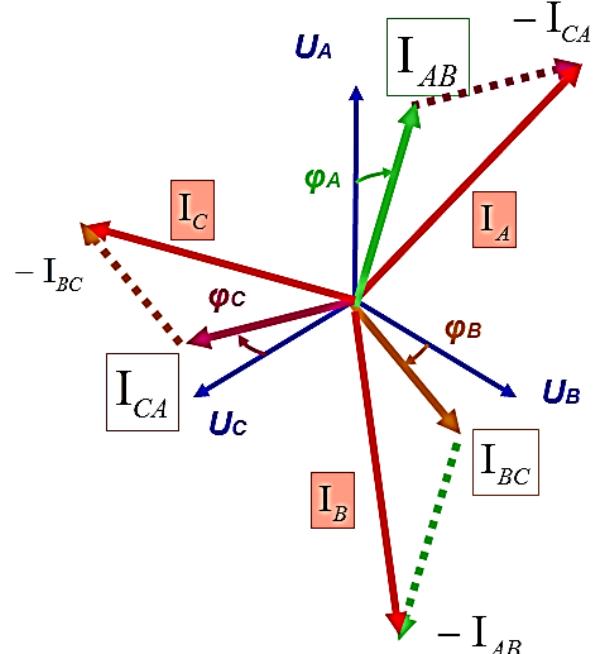
$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA} = \vec{I}_{AB} + (-\vec{I}_{CA})$$

$$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB} = \vec{I}_{BC} + (-\vec{I}_{AB})$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC} = \vec{I}_{CA} + (-\vec{I}_{BC})$$

Определяем линейные токи по векторной диаграмме с помощью линейки:

$$I_\lambda = I_A = I_B = I_C = 5,9 \text{ см} \cdot 5 \text{ A} \approx 29,4 \text{ A}$$



2. Расчет трехфазных электрических цепей, соединенных «звездой»:

Дано: В трехфазную систему включена:

а) несимметричная активно - емкостная нагрузка:

$$R_{a2} = 10 \text{ Ом}$$

$$X_{C1} = 2 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = 4 \text{ Ом}$$

$$X_{C3} = 6 \text{ Ом}$$

Определить : показания всех приборов, включенных в схему и построить векторные диаграммы нагрузок если $U_1=220 \text{ В}$

Решение:

1) Определяем схему соединения нагрузок:

Несимметричная нагрузка R_{a2} - X_C соединена в «звездой» с нулевым проводом

2) Определяем электрические параметры, измеряемые включенными в цепь приборами.

- вольтметр U_1 - общий для всей цепи, включен между линейными проводами А и В:

$$U_1 = U_\alpha = 220 \text{ В}$$

- вольтметр U_2 включен между линейным проводом С и нулевым проводом 0, нагрузки соединенной «звездой»: $U_2 = U_{\phi 2}$

- Амперметры A_3, A_4, A_5 , измеряют фазные токи фаз А, В, С нагрузки, соединенной «звездой»:

$$\left. \begin{array}{l} A_3 = I_{\phi A} \\ A_4 = I_{\phi B} \\ A_5 = I_{\phi C} \end{array} \right\}$$

- Амперметр A_6 измеряет нулевой ток нагрузки, соединенной «звездой»: $A_6 = I_0$

Расчет цепи соединенной «звездой»:

$$U_\alpha = \sqrt{3} U_\phi$$

При соединении генератора и нагрузки «звездой»:

Расчет линейного и фазного напряжений цепи:

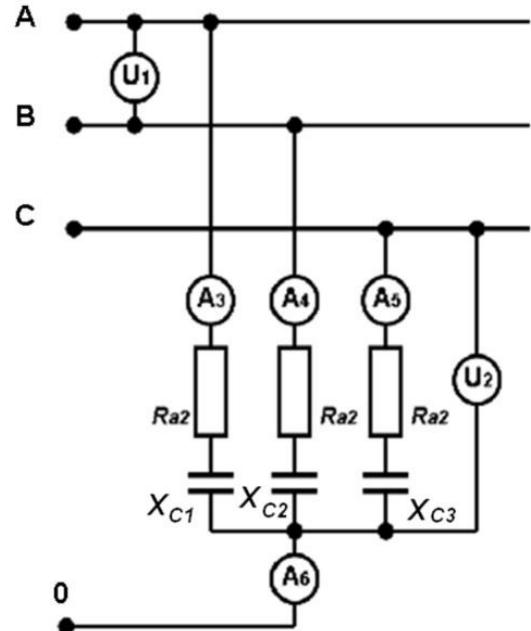
- Общее линейное напряжение цепи $U_\alpha = 220 \text{ В}$

- Фазное напряжение:

$$U_\phi = \frac{U_\alpha}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}$$

Расчет линейных и фазных токов цепи

$$I_\alpha = I_\phi$$



При соединении генератора и нагрузки «звездой» линейный ток равен фазному току:

Ток каждой фазы определяется по закону Ома: $I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}$

$$\text{Ток фазы } A \quad I_{\phi A} = I_{\phi A} = \frac{U_\phi}{Z_{\phi A}} = \frac{127}{10,2} = 12,5 \text{ A} \quad Z_{\phi A} = \sqrt{R_{a2}^2 + Xc_1^2} = \sqrt{10^2 + 2^2} = \sqrt{104} = 10,2 \text{ Ом}$$

$$\text{Ток фазы } B \quad I_{\phi B} = I_{\phi B} = \frac{U_\phi}{Z_{\phi B}} = \frac{127}{10,8} = 11,8 \text{ A} \quad Z_{\phi B} = \sqrt{R_{a2}^2 + Xc_2^2} = \sqrt{10^2 + 4^2} = \sqrt{116} = 10,8 \text{ Ом}$$

Ток фазы C

$$I_{\phi C} = I_{\phi C} = \frac{U_\phi}{Z_{\phi C}} = \frac{127}{11,7} = 10,85 \text{ A} \quad Z_{\phi C} = \sqrt{R_{a2}^2 + Xc_3^2} = \sqrt{10^2 + 6^2} = \sqrt{136} = 11,7 \text{ Ом}$$

Ток в нулевом проводе равен: $\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$

Для определения тока I_0 в нулевом проводе начертим в масштабе векторную диаграмму:

$$M_U = \frac{40 \text{ В}}{1 \text{ см}} \Rightarrow U_\phi = 3,2 \text{ см}; \quad U_\lambda = 5,5 \text{ см}$$

$$M_I = \frac{3 \text{ А}}{1 \text{ см}} \Rightarrow I_{\phi A} = 4,2 \text{ см},$$

$$I_{\phi B} = 4 \text{ см}, \quad I_{\phi C} = 3,6 \text{ см}$$

- Построение начинаем с векторов фазных напряжений U_ϕ , располагая их под углом 120° друг относительно друга: $U_\phi = 3,2 \text{ см} = 127 \text{ В}$

Находим линейные напряжения U_λ как разность 2х соответствующих фазных напряжений:

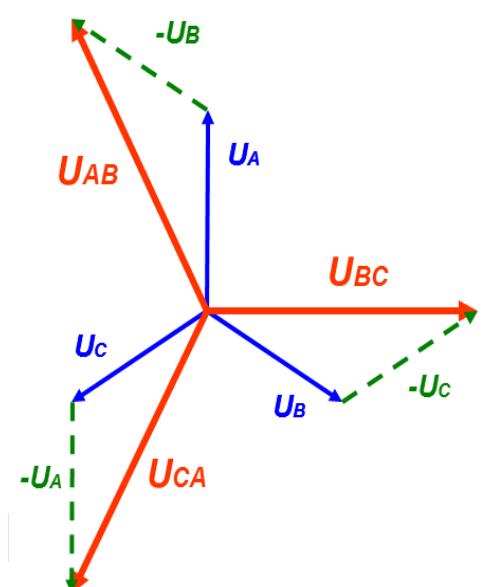
$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B = \vec{U}_A + (-\vec{U}_B)$$

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C = \vec{U}_B + (-\vec{U}_C)$$

$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A = \vec{U}_C + (-\vec{U}_A)$$

По векторной диаграмме получается:

$$U_\lambda = 5,5 \text{ см} = 220 \text{ В}$$

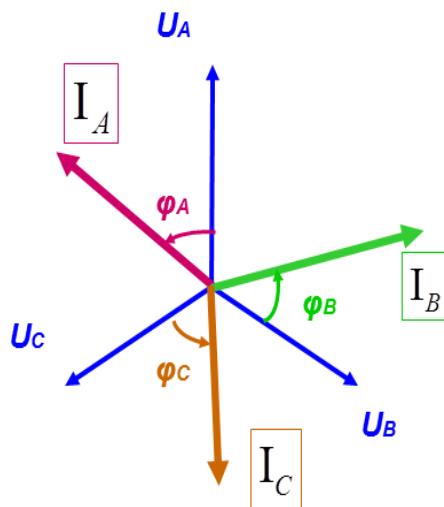


Откладываем фазные токи.

Для этого определяем углы сдвигов фазных токов относительно фазных напряжений:

$$\begin{array}{ll}
 \text{фаза } A & \cos \varphi_A = \frac{R_{a2}}{Z_A} = \frac{6}{10,2} = 0,59 \Rightarrow \varphi = 53^0 \\
 & I_{\varphi A} = 4,2 \text{ см}, \\
 \text{фаза } B & \cos \varphi_B = \frac{R_{a2}}{Z_B} = \frac{6}{10,8} = 0,55 \Rightarrow \varphi = 56^0 \\
 & I_{\varphi B} = 4 \text{ см}, \\
 \text{фаза } C & \cos \varphi_C = \frac{R_{a2}}{Z_C} = \frac{6}{11,7} = 0,51 \Rightarrow \varphi = 59^0 \\
 & I_{\varphi C} = 3,6 \text{ см}
 \end{array}$$

т.к. нагрузка в «звезды» активно – емкостная, то откладываем фазные токи под углами, соответствующими каждой фазе в сторону опережения фазных напряжений (против часовой стрелки)



Ток в нулевом проводе равен геометрической сумме трех фазных токов:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$$

По диаграмме с помощью линейки определяем:

$$I_0 = 0,8 \text{ см}$$

$$I_0 = 0,8 \text{ см} \cdot 3A = 2,4 \text{ А}$$

