

Семинар 1

Трехфазные цепи. Соединение обмоток и разметка выводов.

Симметричная нагрузка.

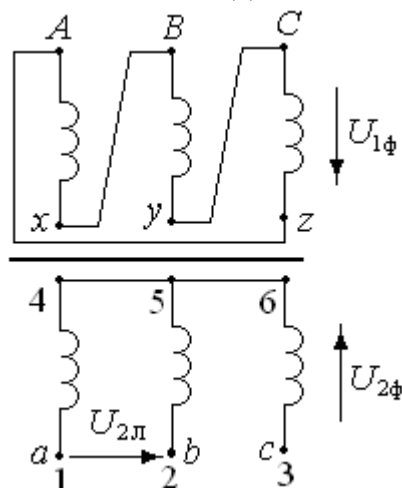
Трехфазная цепь представляет собой совокупность трехфазных источников, трехфазной нагрузки и трехпроводной (или четырехпроводной) системы проводов, связывающих источники и нагрузку.

В качестве трехфазных источников обычно применяются синхронные генераторы. На статоре синхронного генератора помещены 3 обмотки, которые сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 120° , в которых индуцируются ЭДС, изменяющиеся по синусоидальному закону. Фазные ЭДС на комплексной плоскости могут быть представлены векторными диаграммами в зависимости от способа соединения обмоток генератора. Обмотки включаются в звезду или в треугольник и соответственно маркируются ($A-x$, $B-y$, $C-z$). Аналогично соединяются и маркируются вторичные обмотки трансформаторов, включенные в трехфазную цепь. В этом случае обмотки трансформатора ведут себя как обмотки источника. Для **симметричного режима** сопротивления приемников в фазах равны, в таком случае расчет трехфазной цепи сводят к расчету на одну фазу. В уравновешенной трехфазной системе сумма мгновенных мощностей не зависит от времени и равна утроенной средней активной мощности одной фазы.

Задача 1.1. На щиток трехфазного трансформатора 660/380 В, мощностью 40 кВА выведены три пары зажимов его вторичной обмотки (зажимы 1-4, 2-5, 3-6). Максимальное напряжение вторичной обмотки не может превышать 220 В, а первичной – 660 В. Нарисовать схему соединений обмоток трансформатора, определить токи первичной и вторичной обмоток в номинальном режиме. Потерями в трансформаторе пренебречь.

Решение: на щитке, если нет уточнений, указывают линейные напряжения. Обмотки трансформатора можно соединить двумя способами: а) соединение «треугольник» - «звезда», б) соединение «звезда» - «звезда».

Для соединения «треугольник» - «звезда»:



Фазное напряжение первичной обмотки $U_{1\phi} \leq 660\text{В}$ ($U_{1л} = U_{1\phi}$).

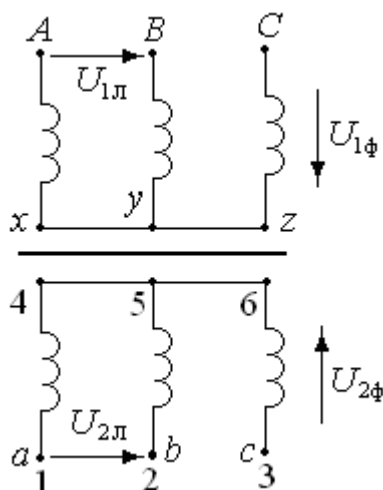
Фазное напряжение вторичной обмотки $U_{2\phi} \leq 220\text{В}$ ($U_{2л} = \sqrt{3} U_{2\phi}$).

Токи:

$$I_{1л} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{1л}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 35 \text{ А}, \quad I_{1\phi} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20,2 \text{ А},$$

$$I_{2л} = I_{2\phi} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{2л}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 60,6 \text{ А}.$$

Для соединения «звезда» - «звезда»:

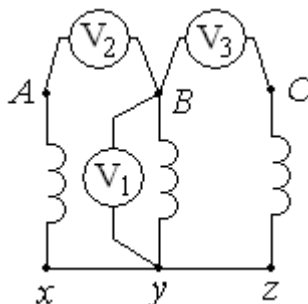


Фазное и линейное напряжение первичной обмотки $U_{1\phi} = 380 \text{ В}$, $U_{1л} = 660 \text{ В}$,
вторичной обмотки $U_{2\phi} = 220 \text{ В}$, $U_{2л} = 380 \text{ В}$.

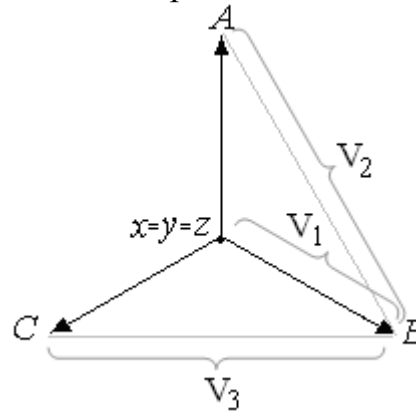
Токи: $I_{1л} = I_{1\phi} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{1л}} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 35 \text{ А},$

$$I_{2л} = I_{2\phi} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 60,6 \text{ А}.$$

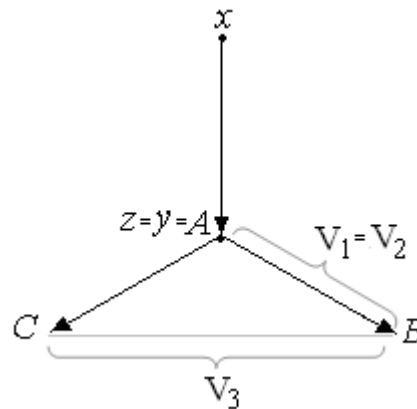
Задача 1.2. Обмотки трехфазного генератора, соединенного звездой, образуют симметричную систему напряжений. Показания вольтметров: $U_{V1}=220 \text{ В}$, $U_{V2}=380 \text{ В}$, $U_{V3}=380 \text{ В}$. Определить показания вольтметров после обратного присоединения выводов обмотки а) в фазе А б) в фазе В.



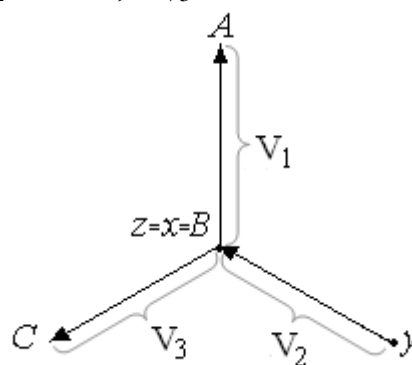
Решение. При соединении обмоток «звездой» вольтметр V_1 показывает действующее значение фазного напряжения U_B , вольтметры V_2 и V_3 показывают действующее значение линейного напряжения U_{AB} и U_{BC} .



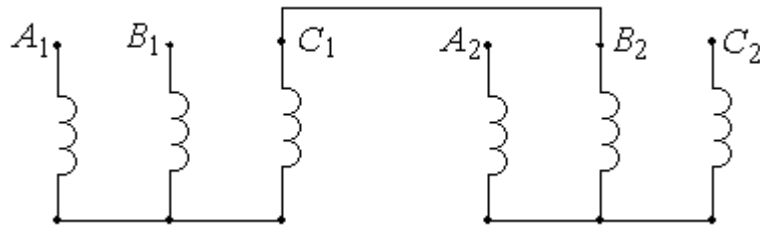
После обратного соединения выводов обмотки в фазе B показания вольтметров $U_{V1}=220$ В, $U_{V2}=220$ В, $U_{V3}=380$ В.



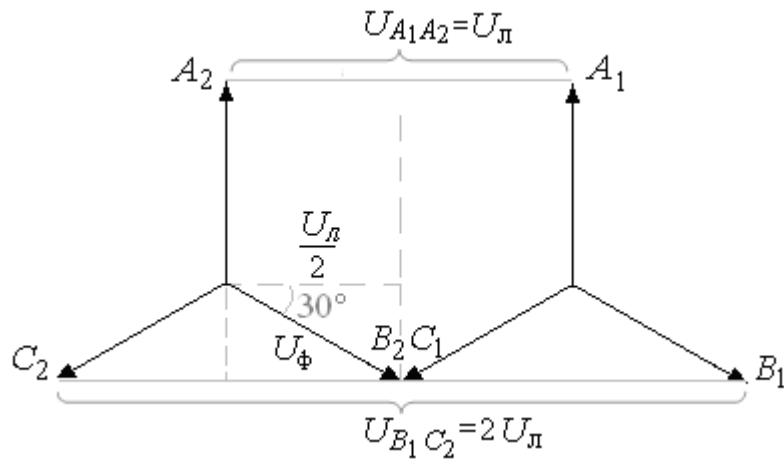
После обратного соединения выводов обмотки в фазе C показания вольтметров $U_{V1}=220$ В, $U_{V2}=220$ В, $U_{V3}=220$ В.



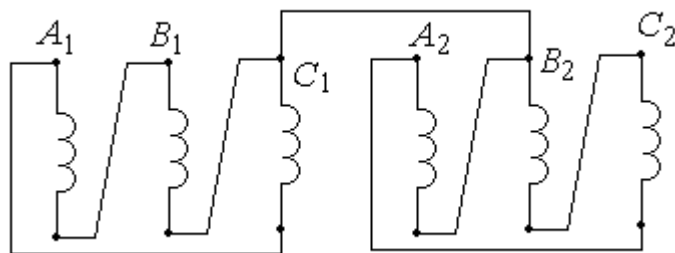
Задача 1.3. Вторичные обмотки двух одинаковых трехфазных трансформаторов, обмотки которых соединены «звездой», имеют еще соединение между фазами C_1 и B_2 . Определить показания вольтметров, включенных между выводами A_1 и A_2 , B_1 и C_2 . Напряжения одноименных обмоток совпадают по фазе, фазное напряжение 220 В.



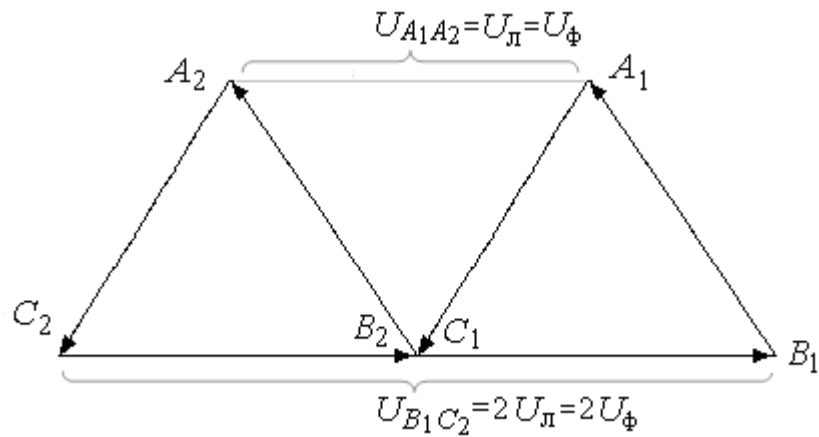
Решение. Линейное напряжение в $\sqrt{3}$ больше фазного и равно 380 В. Показания вольтметров соответственно 380 В и 760 В.



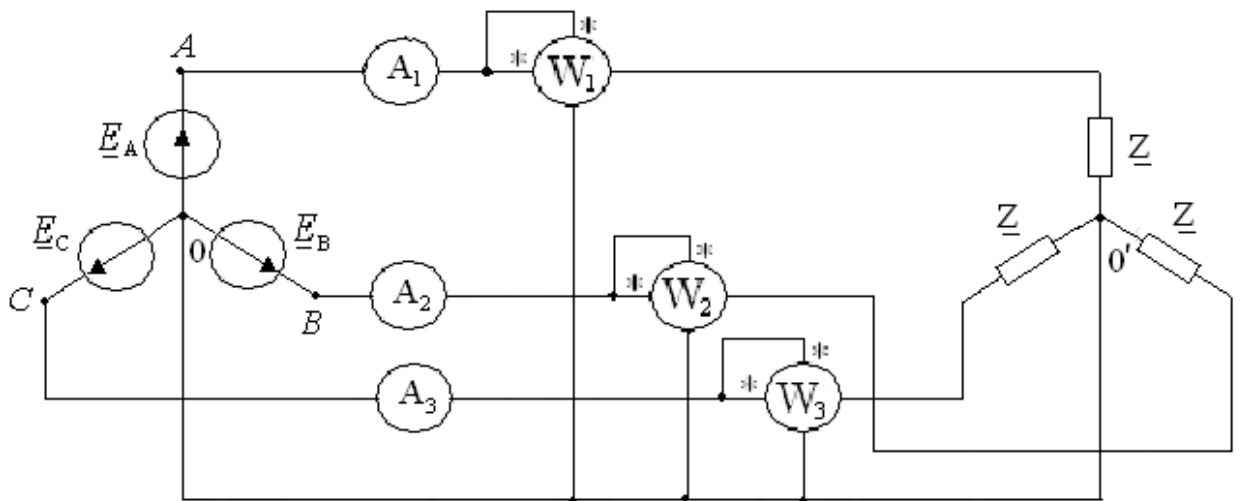
Задача 1.4. Вторичные обмотки двух одинаковых трехфазных трансформаторов, обмотки которых соединены «треугольником», имеют еще соединение между C_1 и B_2 . Напряжения одноименных обмоток совпадают по фазе, фазное напряжение 127 В. Определить показания вольтметров, включенных между выводами A_1 и A_2 , B_1 и C_2 .



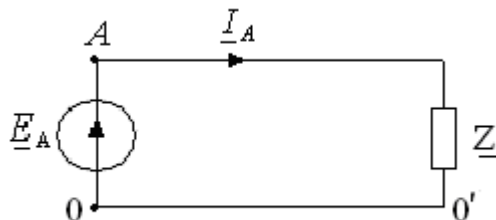
Решение. Линейное напряжение при соединении треугольником равно фазному напряжению 127 В. Показания вольтметров соответственно 127 В и 254 В.



Задача 1.5. Линейное напряжение трехфазной цепи 380 В, нагрузка симметричная $\underline{Z} = 8 + j6$ Ом. Найти токи, определить показания приборов.



Решение. Симметричный режим, напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{00'} = 0$. Расчет проводим по фазе А, расчетная схема:



Ток в фазе А

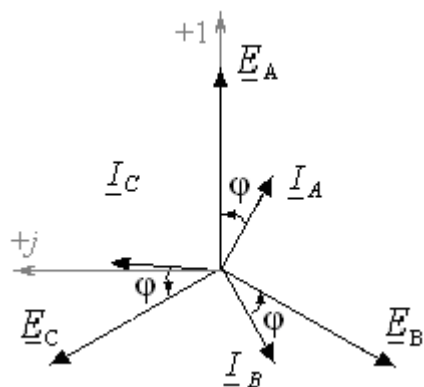
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}(8 + j6)} = 22 \angle -36,86^\circ \text{ А,}$$

в фазе В и С

$$\underline{I}_B = \underline{I}_A \cdot 1 \angle -120^\circ = 22 \angle -156,86^\circ \text{ А,}$$

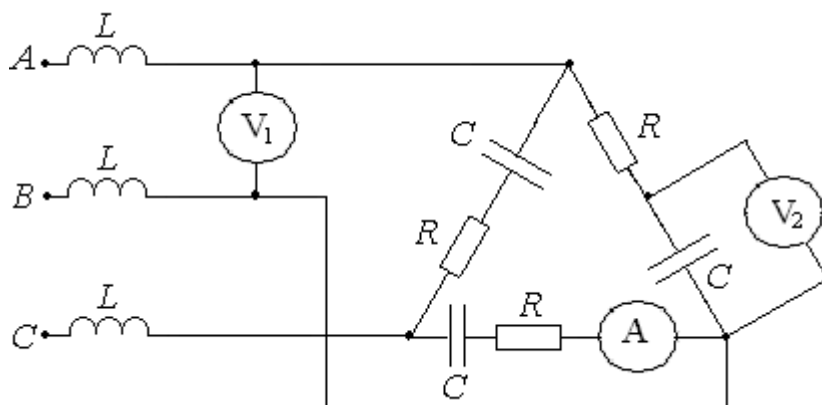
$$\underline{I}_C = \underline{I}_A \cdot 1 \angle 120^\circ = 22 \angle 83,14^\circ \text{ А.}$$

Векторная диаграмма симметричного режима имеет вид ($\varphi = 36,86^\circ$):

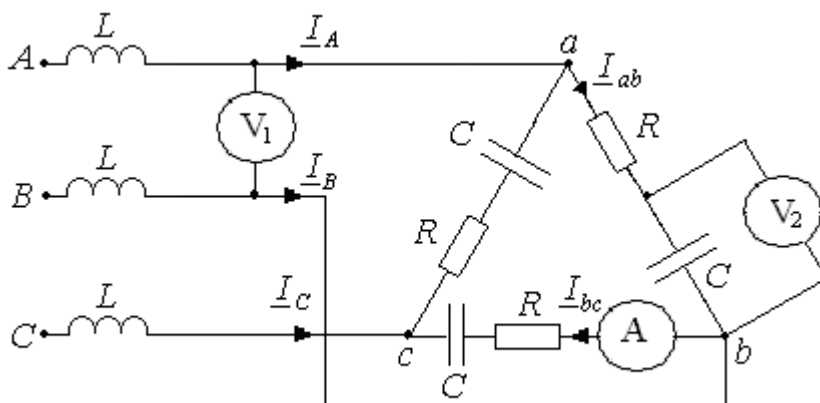


Амперметры показывают 22 А. Показания ваттметров одинаковые и равны $P_W = E_A \cdot I_A \cdot \cos(\underline{E}_A \hat{ \underline{I}}_A) = 220 \cdot 22 \cos 36,86^\circ = 3872$ Вт.

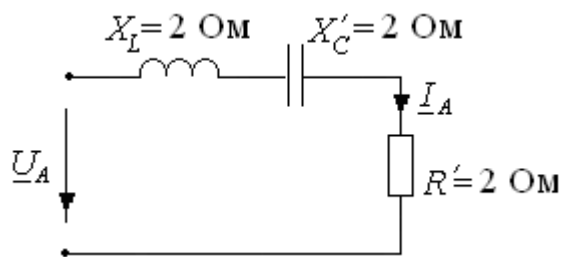
Задача 1.6. Линейное напряжение в трехфазной цепи $U_{\text{л}} = 120$ В; $\omega L = 2$ Ом, $R = 1/\omega C = 6$ Ом. Составить эквивалентную схему на одну фазу и найти показания всех приборов.



Решение: Выберем направление линейных и фазных токов:



Преобразуем симметричный «треугольник» нагрузки в симметричную «звезду», $X'_C = \frac{X_C}{3} = 2$ Ом, $R' = \frac{R}{3} = 2$ Ом. В силу симметрии расчет проводят на одну фазу.



Фазное напряжение

$$\underline{U}_A = \frac{120 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 69,36 \angle 0^\circ \text{ В.}$$

Ток в фазе A : $\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{R + j\omega L - j1/\omega C} = \frac{69,36 \angle 0^\circ}{2 + j2 - j2} = 34,68 \angle 0^\circ \text{ А.}$ Модули

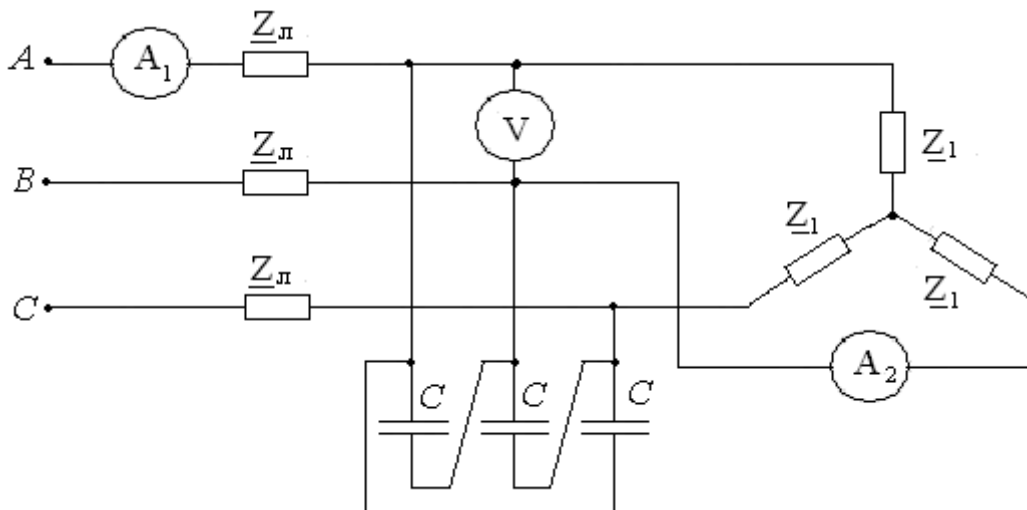
фазных и линейных токов при симметричной нагрузке связаны

соотношением $I_{bc} = \frac{I_A}{\sqrt{3}} = \frac{34,68}{\sqrt{3}} = 20 \text{ А,}$ $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$ в силу симметрии.

Показания приборов: $U_{V1} = I_{ab} \cdot Z = 20 \cdot 6\sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 169,2 \text{ В}$ (Z – модуль комплексного сопротивления симметричного приемника),

$$U_{V2} = I_{ab} \cdot \frac{1}{\omega C} = 20 \cdot 6 = 120 \text{ В.}$$

Задача 1.7. Линейное напряжение трехфазной цепи $U_{\text{л}} = 380 \text{ В};$
 $\underline{Z}_1 = 10 + j8 \text{ Ом,}$ $1/\omega C = 54 \text{ Ом,}$ $\underline{Z}_{\text{л}} = j1,8 \text{ Ом.}$ Составить эквивалентную схему на одну фазу, рассчитать комплексные токи через амперметры и показания приборов.

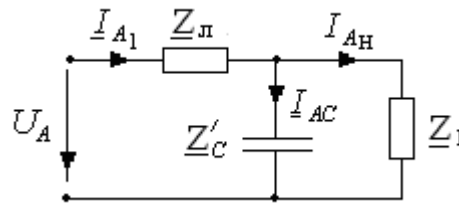


Решение. Преобразуем «треугольник» нагрузки в эквивалентную

«звезду», $\underline{Z}'_C = \frac{\underline{Z}_C}{3} = -j18 \text{ Ом.}$ В силу симметричности нагрузки расчет токов

в линии можно вести по одной фазе.

После преобразования эквивалентная расчетная схема на одну фазу:



Фазное напряжение: $\underline{U}_A = U_\phi \angle 0^\circ = \frac{U_\text{л}}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 220 \angle 0^\circ \text{ В.}$

Линейный ток фазы A :

$$\underline{I}_{A_1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_\text{л} + \frac{\underline{Z}'_C \underline{Z}_1}{\underline{Z}'_C + \underline{Z}_1}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{j1,8 + \frac{(-j18)(10 + j8)}{-j18 + 10 + j8}} = \frac{220}{j1,8 + 16,2 - j1,8} = 13,58 \text{ А.}$$

Ток в фазе приемника \underline{Z}_1 :

$$\underline{I}_{Aн} = \underline{I}_{A_1} \frac{\underline{Z}'_C}{\underline{Z}'_C + \underline{Z}_1} = 13,58 \frac{-j18}{10 + j8 - j18} = 12,26 - j12,26 = 17,28 \angle -45^\circ \text{ А, в силу}$$

симметрии $\underline{I}_{B_1} = \underline{I}_{A_1} \cdot 1 \angle -120^\circ = 13,58 \angle -120^\circ \text{ А.}$ Показания амперметров равны 13,58 А.

Определим показание вольтметра

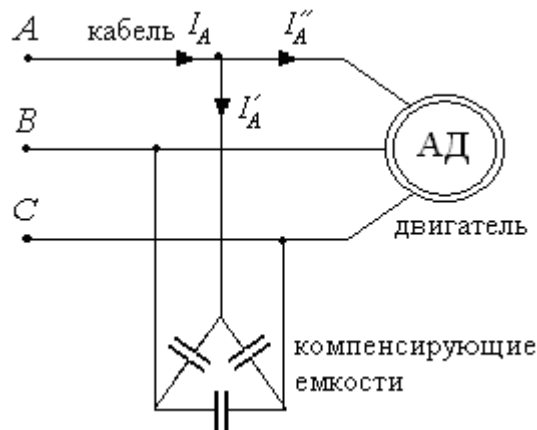
$$\underline{U}_V = -\underline{I}_{A_1} \cdot \underline{Z}_\text{л} + \underline{U}_{AB} + \underline{I}_{B_1} \cdot \underline{Z}_\text{л} = -13,58(j1,8) + 380 \angle 30^\circ + 13,58 \angle -120^\circ \cdot (j1,8) =$$

$$= -j24,44 + 329 + j190 - j12,22 + 21,17 = 350,17 - j153,34 = 382,3 \angle -23,65^\circ \text{ В.}$$

Следовательно, $U_V = 382,3 \text{ В.}$

Задача 1.8. Асинхронный трехфазный двигатель мощностью 55 кВт подключен к сети с помощью трехфазного кабеля и имеет $\cos \varphi = 0,707$. Линейное напряжение двигателя $U_\text{л} = 380 \text{ В}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить ток кабеля и величину компенсирующей емкости (на одну фазу), которую нужно подключить к двигателю, чтобы на входе кабеля коэффициент мощности был равен 0,96. Компенсирующие емкости включены треугольником.



Решение. Ток двигателя до компенсации

$$I_A'' = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{55 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,707} = 118,3 \text{ А.}$$
 Реактивная мощность двигателя

при $\varphi = \arccos(0,707) = 45^\circ$: $Q = P \operatorname{tg} \varphi = 55 \cdot 10^3 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ = 55 \text{ кВар}$. После компенсации $\cos \varphi' = 0,96$, $\varphi' = 16,26^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi' = 0,291$, реактивная мощность $Q' = P \operatorname{tg} \varphi' = 55 \cdot 10^3 \cdot 0,291 = 16,005 \text{ кВар}$.

Реактивная мощность компенсирующей емкости

$$Q_C = Q - Q' = 55 - 16,005 = 38,995 \text{ кВар}$$
 может быть определена как $Q_C = 3 \frac{U_{\text{л}}^2}{X_C}$,

следовательно, $X_C = 3 \frac{U_{\text{л}}^2}{Q_C} = 3 \frac{380^2}{38995} = 11,1 \text{ Ом}$ и $C = 286,9 \text{ мкФ}$.