

1. Трехфазные системы
2. Соединение генератора звездой
3. Соединение генератора треугольником
4. Соединение приемников звездой
5. Соединение приемников треугольником
6. Мощность трехфазной системы

### 1. Трехфазные системы

Трехфазной (многофазной) системой электрических цепей называется система, состоящая из трех (нескольких) электрических цепей переменного тока одной частоты, э. д. с. которых имеют разные начальные фазы.

Трехфазная система переменного тока получила широчайшее распространение, как система, обеспечивающая более экономичную передачу энергии по сравнению с однофазной системой. Кроме того, она позволяет создать простые по устройству и надежные в эксплуатации генераторы, двигатели и трансформаторы.

Изобретение трехфазной системы и создание трехфазного генератора, трехфазного электродвигателя и трехфазного трансформатора принадлежит выдающемуся русскому инженеру М. О. Доливо-Добровольскому.

Отдельные цепи трехфазной системы сокращенно называются фазами. Трехфазную систему электрических цепей, соединенных друг с другом, называют трехфазной цепью.

172

Совокупность токов, напряжений или э. д. с., действующих в фазах трехфазной цепи, называется трехфазной системой токов, напряжений или э. д. с.

Простейший трехфазный генератор (рис. 7-1) устроен аналогично однофазному (рис. 5-2), отличаясь от последнего тем, что на якоре расположены три одинаковые обмотки (фазы), начала и концы которых обозначаются соответственно буквами  $A, B, C, X, Y, Z$ . Оси обмоток сдвинуты в пространстве одна относительно другой на равные углы  $2\pi/3 = 120^\circ$ . Поэтому индуцированные в обмотках э. д. с. с одинаковыми амплитудами сдвинуты по фазе относительно друг друга на углы  $120^\circ$ , или на  $1/3$  периода. Такая система трех э. д. с. называется *симметричной*. Наоборот, при неравенстве амплитуд э. д. с. или неравенстве углов сдвига между ними система э. д. с. будет *несимметричной*.

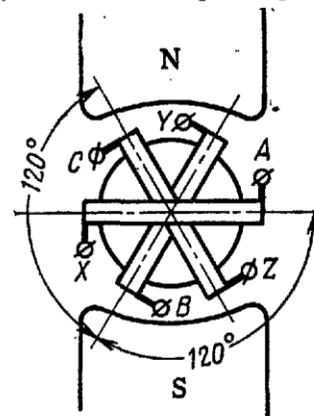


Рис. 7-1. Простейший генератор трехфазного тока.

Приняв за начало отсчета времени ( $t = 0$ ) начало периода э. д. с. в первой фазе ( $A$ ), получим ее выражение

$$e_A = E_m \sin \omega t. \quad (7-1)$$

Электродвижущая сила второй фазы ( $B$ ) отстает от э. д. с. первой фазы  $e_A$  на  $1/3$  периода, поэтому она запишется:

$$e_B = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3). \quad (7-2)$$

Электродвижущая сила третьей фазы ( $C$ ) отстает от э. д. с.  $e_A$  на  $2/3$  периода или опережает э. д. с.  $e_A$  на  $1/3$  периода, поэтому ее выражение

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin (\omega t + 2\pi/3). \quad (7-3)$$

Графики э. д. с. и их векторная диаграмма даны на рис. 7-2 и 7-3.

Положительные направления э. д. с. в обмотках генератора принято считать от концов обмоток X, Y, Z к их началам A, B, C.

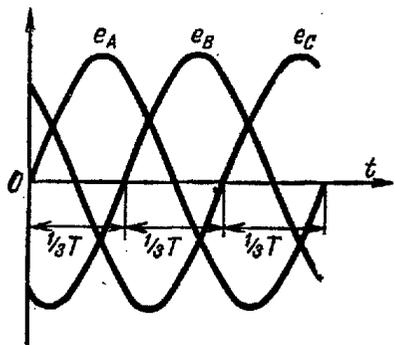


Рис. 7-2. График симметричных э. д. с. трехфазной системы.

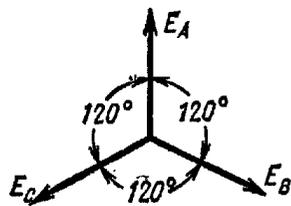


Рис. 7-3. Векторная диаграмма симметричных э. д. с.

Соединяя каждую обмотку трехфазного генератора с отдельным приемником энергии (рис. 7-4), получим несвязанную трехфазную систему с шестью проводами. Она является неэкономичной и поэтому на практике не применяется. Обмотки трехфазного генератора соединяются звездой или треугольником,

что дает возможность вместо шести проводов применять три или четыре провода.

Для трехфазных цепей стандартными являются напряжения: 127, 220, 380, 660 В и выше.

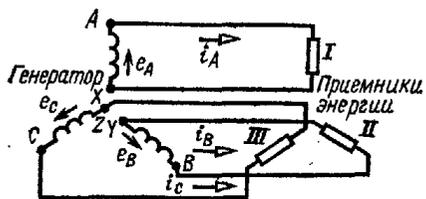


Рис. 7-4. Несвязанная трехфазная система.

## 2. Соединение обмоток генератора звездой

При соединении обмоток звездой концы обмоток X, Y, Z соединяются в одну точку, называемую нулевой точкой или нейтралью генератора (рис. 7-5). В четырехпроводной системе к нейтрали присоединяется нейтральный или нулевой провод. К 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  $U_\phi$ . Пренебрегая падением напряжения в обмотках генератора, можно считать фазные напряжения равными соответствующим э. д. с., индуцированным в обмотках генератора.

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  $U_L$ .

Установим соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении обмоток генератора звездой. Так как конец первой фазы X соединен не с началом второй фазы,

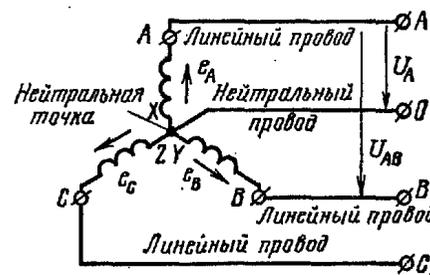


Рис. 7-5. Схема соединения обмоток генератора звездой.

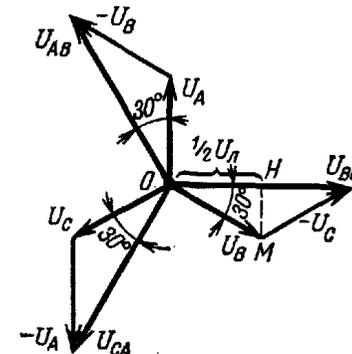


Рис. 7-6. Векторная диаграмма напряжений трехфазной цепи.

а с концом ее Y, что аналогично встречному соединению двух источников э. д. с. при постоянном токе, то мгновенное значение линейного напряжения между проводами A и B будет равно разности соответствующих фазных напряжений, т. е.

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$

аналогично мгновенные значения других линейных напряжений

$$u_{BC} = u_B - u_C \quad \text{и} \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$

Таким образом, мгновенное значение линейного напряжения равно алгебраической разности мгновенных значений соответствующих фазных напряжений.

Так как  $u_A, u_B$  и  $u_C$  изменяются по синусоидальному закону и имеют одинаковую частоту, то и линейные напряжения  $u_{AB}, u_{BC}$  и  $u_{CA}$  будут изменяться синусоидально, причем действующие значения линейных напряжений можно определить из векторной диаграммы (рис. 7-6):

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B, \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C \quad \text{и} \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

Из сказанного следует, что *вектор линейного напряжения равен разности векторов соответствующих фазных напряжений*.

Фазные напряжения  $u_A, u_B$  и  $u_C$  сдвинуты друг от друга на  $120^\circ$ . Для определения вектора линейного напряжения  $\vec{U}_{AB}$  из вектора напряжения  $\vec{U}_A$  нужно геометрически вычесть вектор  $\vec{U}_B$ , или, что то же, прибавить равный по величине и обратный по знаку вектор  $-\vec{U}_B$ .

Аналогично вектор линейного напряжения  $\vec{U}_{BC}$  получим как разность векторов напряжений  $\vec{U}_B$  и  $\vec{U}_C$  и вектор линейного  $\vec{U}_{CA}$  напряжения как разность векторов  $\vec{U}_C$  и  $\vec{U}_A$ .

Опуская перпендикуляр из конца произвольно взятого вектора фазного напряжения, например  $U_B$ , на вектор линейного напряжения  $U_{BC}$  получим прямоугольный треугольник ОНМ, из которого следует, что

$$\frac{1}{2} U_L = U_\phi \cos 30^\circ = U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi. \quad (7.4)$$

Из векторной диаграммы (рис. 7-6) и последней формулы следует, что *действующее значение линейного напряжения в  $\sqrt{3}$  раз больше действующего значения фазного напряжения и что линейное*

*напряжение  $U_{AB}$  на  $30^\circ$  опережает фазное напряжение  $U_A$ ; на такой же угол линейное напряжение  $U_{BC}$  опережает фазное напряжение  $U_B$  и напряжение  $U_{CA}$  — фазное напряжение  $U_C$ .*

Смежные линейные напряжения сдвинуты друг относительно друга на такие же углы ( $120^\circ$ ), как и смежные фазные напряжения. *Звезда векторов линейных напряжений повернута в положительную сторону относительно звезды векторов фазных напряжений на угол  $30^\circ$ .*

Необходимо обратить внимание на то, что полученные соотношения между линейными и фазными напряжениями имеют место только при симметричной системе напряжений.

Так как векторы линейных напряжений определяются как разности векторов фазных напряжений, то, соединив концы векторов фазных напряжений, образующих звезду, получим треугольник векторов линейных напряжений (рис. 7-7).

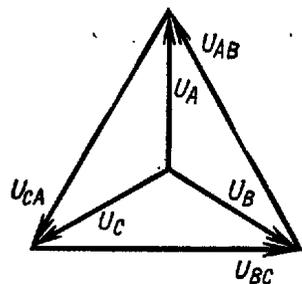


Рис. 7-7. Векторная диаграмма напряжений при соединении обмоток генератора звездой.

**Пример 7-1.** Определить линейное напряжение генератора, если фазное напряжение его 127 и 220 В.

Решение.

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi = 1,73 U_\phi = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ В.}$$

Если фазное напряжение 220 В, то

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi = 1,73 \cdot 220 = 380 \text{ В.}$$

### 3. Соединение обмоток генератора треугольником

При соединении обмоток трехфазного генератора треугольником (рис. 7-8) 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,

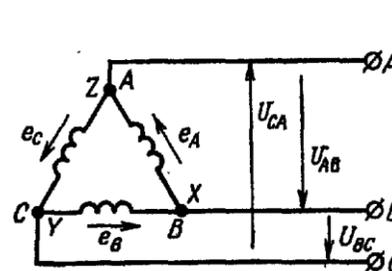


Рис. 7-8. Схема соединения обмоток генератора треугольником.

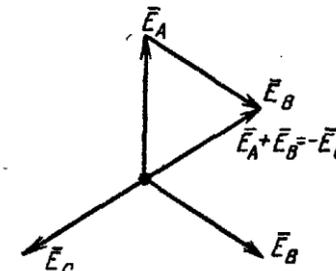


Рис. 7-9. Векторная диаграмма э. д. с. при соединении генератора треугольником.

идущих к приемникам энергии, присоединяются к началам фаз  $A, B$  и  $C$ .

Из рис. 7-8 ясно, что при таком соединении обмоток *фазные напряжения равны линейным*, т. е.

$$U_{AB} = U_A; \quad U_{BC} = U_B; \quad U_{CA} = U_C. \quad (7.5)$$

При соединении треугольником три фазы генератора образуют замкнутый контур с весьма малым сопротивлением. Очевидно, такое соединение возможно только в том случае, если сумма э. д. с., действующих в этом контуре, будет равна нулю, так как в противном случае в контуре даже при отсутствии нагрузки возникнет значительный ток, могущий вызвать перегрев генератора.

*Сумма трех симметричных э. д. с., действующих в обмотках генератора, равна нулю.* В этом легко убедиться, складывая векторы э. д. с. На рис. 7-9 даны три вектора

э. д. с. Складывая  $E_A$  и  $E_B$ , получаем вектор, равный и противоположный вектору  $\bar{E}_C$ , т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B = -\bar{E}_C,$$

а следовательно, сумма трех векторов э. д. с. равна нулю, т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C = 0. \quad (7-6)$$

Опасно неправильное соединение обмоток генератора треугольником. На рис. 7-10 дана одна из возможных неправильных схем соединения, в которой конец первой фазы

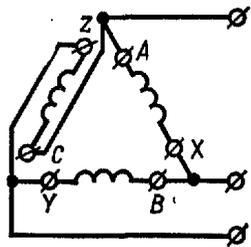


Рис. 7-10. Неправильная схема соединения обмоток генератора треугольником.

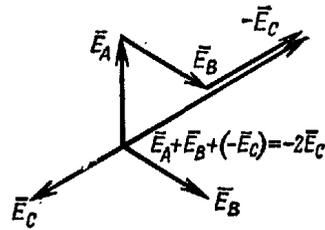


Рис. 7-11. Векторная диаграмма э. д. с. генератора, соединенного по схеме рис. 7-10.

Х правильно соединен с началом второй фазы В, но конец второй фазы Y соединен не с началом третьей фазы С, а с ее концом Z, и начало третьей фазы С соединено с началом первой фазы А, вследствие чего э. д. с.  $E_C$  не складывается с остальными э. д. с., а вычитается из их суммы. Результирующая э. д. с. может быть определена из векторной диаграммы рис. 7-11, на которой произведено сложение векторов  $\bar{E}_A$ ,  $\bar{E}_B$  и  $-\bar{E}_C$ . Сумма этих трех векторов, как видно из диаграммы, равна удвоенному вектору  $\bar{E}_C$ , т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B - \bar{E}_C = -2\bar{E}_C.$$

Таким образом, в этом случае э. д. с. замкнутого контура по абсолютной величине равна удвоенному значению фазной э. д. с., что при малом сопротивлении контура (обмоток генератора) равносильно короткому замыканию.

#### 4. Соединение приемников энергии звездой

Приемники энергии, так же как и обмотки генератора, могут соединяться звездой, при этом трехфазная система может быть четырехпроводной (при осветительной нагрузке) или трехпроводной (при силовой нагрузке).

В четырехпроводной трехфазной системе лампы включаются между нейтральным проводом и каждым из линейных

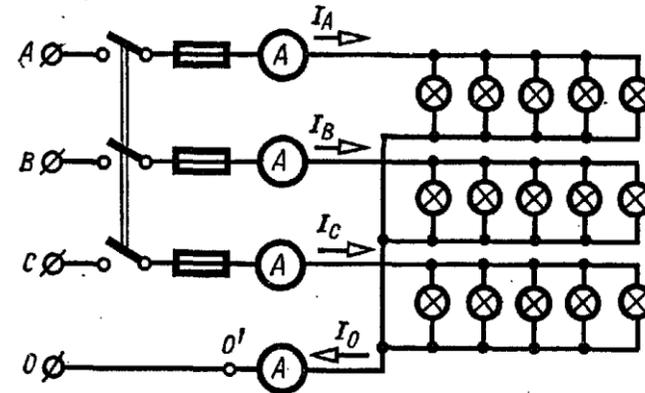


Рис. 7-12. Схема соединения звездой с нейтральным проводом.

проводов (рис. 7-12), причем номинальное напряжение ламп должно быть равно фазному напряжению сети.

При этом условия работы приемников энергии остаются теми же, что и в однофазной системе, так как нейтральный провод обеспечивает равенство фазных напряжений генератора и соответствующих фазных напряжений приемников.

Как видно из рис. 7-12, токи в линейных проводах равны токам в соответствующих фазах приемников или генератора, т. е.

$$I_n = I_\phi. \quad (7-7)$$

Определение фазных токов приемников производится так же, как и в однофазных цепях переменного тока, т. е.

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{z_C}.$$

Углы сдвига токов относительно фазных напряжений определяются из формул

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

или

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{x_A}{r_A}; \quad \operatorname{tg} \varphi_B = \frac{x_B}{r_B}; \quad \operatorname{tg} \varphi_C = \frac{x_C}{r_C}.$$

Мгновенное значение тока в нейтральном проводе согласно первому закону Кирхгофа равно сумме мгновенных значений фазных токов, т. е.

$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Действующее значение тока в нейтральном проводе можно определить путем геометрического сложения векторов фазных токов, т. е.

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (7-8)$$

**Пример 7-2.** Фазное напряжение генератора  $U_\phi = 125$  В, сопротивления фаз приемника  $z_A = z_B = r_A = r_B = 12,5$  Ом,  $z_C = r_C = 25$  Ом. Найти фазные токи.

**Решение.**

$$I_A = I_B = \frac{125}{12,5} = 10 \text{ А};$$

$$I_C = \frac{125}{25} = 5 \text{ А}.$$

На рис. 7-13 даны векторы фазных напряжений и фазных токов, а также произведено сложение фазных токов. В результате сложения получен ток в нейтральном проводе  $I_0 = 5$  А, отстающий по фазе от  $U_A$  на угол  $\varphi_0 = 60^\circ$ .

Нулевой провод может иметь сечение, равное сечению линейных проводов, или в 2—3 раза меньше, так как обычно ток в нейтральном проводе бывает меньше, чем токи в линейных проводах.

Следует еще раз отметить, что нейтральный провод при любых нагрузках фаз обеспечивает равенство фазных напряжений электроприемников. В случае же обрыва нейтрального провода при неодинаковых сопротивлениях фаз приемников энергии напряжения на отдельных фазах приемников будут различными. На некоторых фазах (с меньшим сопротивлением) напряжение уменьшится, а на

других увеличится по сравнению с нормальным, что является недопустимым. Особенно опасно, если при обрыве нулевого провода в одной из фаз произойдет короткое замыкание. При этом напряжение в других фазах увеличится в  $\sqrt{3}$  раз, и все лампы, включенные в этих фазах, перегорят. По указанной причине во избежание разрыва нейтрального провода в нем не устанавливают предохранители и выключатели.

Если нагрузка трех фаз приемника одинакова (двигатели) то фазные токи будут равны между собой и сдвинуты на одинаковые углы от соответствующих фазных напряжений, т. е. система фазных токов будет также симметрична. В этом случае ток в нейтральном проводе, равный геометрической сумме фазных токов, будет равен нулю. Разумеется, что в этом случае нейтральный провод не нужен.

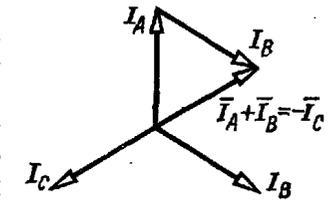


Рис. 7-14. Симметричные токи трехфазной цепи.

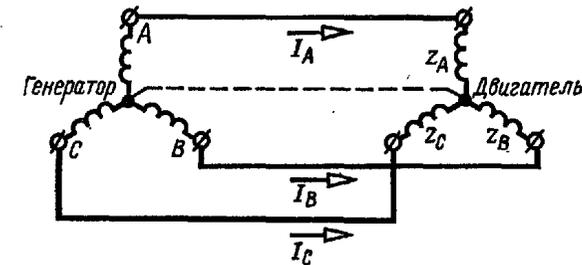


Рис. 7-15. Схема соединения трехфазного генератора и электроприемника звездой.

Складывая векторы фазных токов  $I_A$  и  $I_B$  (рис. 7-14), получаем вектор, равный и противоположный вектору  $I_C$ , т. е.

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B = -\bar{I}_C,$$

а сумма векторов трех токов равна нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Расчет симметричной трехфазной цепи сводится к расчету одной фазы.

Если приемник энергии, соединенный звездой (рис. 7-15), имеет одинаковые сопротивления фаз, то фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}. \quad (7-9)$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}}. \quad (7-10)$$

Косинус угла сдвига фазного тока относительно фазного напряжения

$$\cos \varphi_{\phi} = r_{\phi}/z_{\phi}. \quad (7-11)$$

Синус и тангенс того же угла

$$\sin \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{r_{\phi}}. \quad (7-12)$$

Активная, реактивная и полная мощности одной фазы определяются выражениями:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}. \quad (7-13)$$

При симметричной системе напряжений и токов мощности трех фаз определяются выражениями:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-14)$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad (7-15)$$

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi}. \quad (7-16)$$

Приняв во внимание, что при соединении приемников энергии звездой  $I_{\phi} = I_n$ , а  $U_{\phi} = U_n/\sqrt{3}$ , получим выражение для активной мощности:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \frac{3}{\sqrt{3}} U_n I_n \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-17)$$

для реактивной мощности

$$Q = \sqrt{3} U_n I_n \sin \varphi_{\phi} \quad (7-18)$$

и для полной мощности

$$S = \sqrt{3} U_n I_n. \quad (7-19)$$

При несимметричной системе напряжений или при неравномерной (неравномерной) нагрузке фаз приемников активная и реактивная мощности трехфазной системы определяются как суммы мощностей отдельных фаз.

**Пример 7-3.** Трехфазный генератор, соединенный звездой, имеет фазное напряжение 220 В. Приемник имеет активное сопротивление фазы 6 Ом и индуктивное 8 Ом. Определить линейное напряжение, фазный и линейный токи и активную мощность приемника энергии.

**Решение.**

Линейное напряжение

$$U_n = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 \cdot 220 \text{ В} = 380 \text{ В}.$$

Полное сопротивление фазы приемника

$$z_{\phi} = \sqrt{r_{\phi}^2 + x_{\phi}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом}.$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}.$$

При соединении приемников энергии звездой фазный ток равен линейному  $I_n = 22 \text{ А}$ .

Косинус угла сдвига фазного тока относительно фазного напряжения

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{r_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{6}{10} = 0,6.$$

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 22 \cdot 0,6 = 8,7 \text{ кВт}.$$

**Пример 7-4.** Трехфазный двигатель, соединенный звездой, подключенный к сети с напряжением 380 В, работает с мощностью 10 кВт и  $\cos \varphi = 0,8$ . Определить ток двигателя.

**Решение.**

Мощность в цепи питания двигателя

$$P = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi,$$

откуда ток

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi} = \frac{10000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8} = 19 \text{ А}.$$

## 5. Соединение приемников энергии треугольником

При соединении приемников энергии треугольником (рис. 7-16) отдельные фазы приемника присоединяются к линейным проводам, идущим от генератора. При этом каждая фаза приемника непосредственно включается на линейное напряжение, которое в то же время будет и фазным напряжением, т. е.

$$U_A = U_{AB}; \quad U_B = U_{BC}; \quad U_C = U_{CA}.$$

В этом случае фазные напряжения (в отличие от схемы соединения звездой) не зависят от сопротивлений фаз приемника.

За положительное направление фазных токов выбираем направление от  $A'$  к  $B'$ , от  $B'$  к  $C'$  и от  $C'$  к  $A'$ . За положительное направление линейных токов принимаем направление от генератора к приемнику.

По первому закону Кирхгофа для мгновенных значений токов для точки  $A'$  можно написать:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB},$$

откуда

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}.$$

Аналогично для точки  $B'$

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

и для точки  $C'$

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Таким образом, мгновенное значение линейного тока равно алгебраической разности мгновенных значений фазных токов тех фаз, которые соединены с данным проводом.

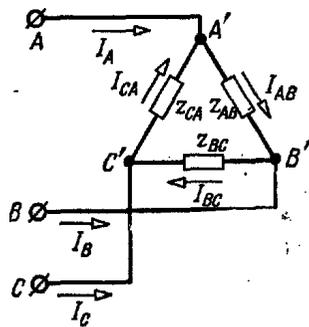


Рис. 7-16. Соединение электроприемников треугольником.

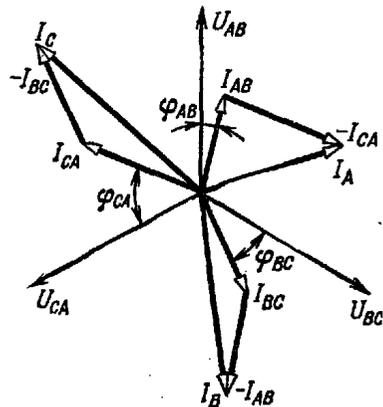


Рис. 7-17. Векторная диаграмма при соединении электроприемников треугольником.

Из сказанного следует, что вектор линейного тока равен разности векторов соответствующих фазных токов, т. е.

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \quad \text{и} \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}. \quad (7-20)$$

На диаграмме (рис. 7-17) векторы линейных токов получены как разности векторов соответствующих фазных токов, причем все векторы проведены из общего начала. Иногда для большей наглядности векторы перемещаются параллельно себе так, чтобы векторы напряжений давали замкнутый треугольник (рис. 7-18).

Если нагрузка фаз равномерная, т. е.

$$z_{AB} = z_{BC} = z_{CA} = z_{\phi}$$

и

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi},$$

то действующие значения фазных токов равны между собой и токи сдвинуты по фазам на одинаковые углы от соответствующих напряжений (рис. 7-19), на углы  $120^\circ$  один относительно другого. Следовательно, фазные токи образуют симметричную систему. Опустив перпендикуляр из конца произвольно взя-

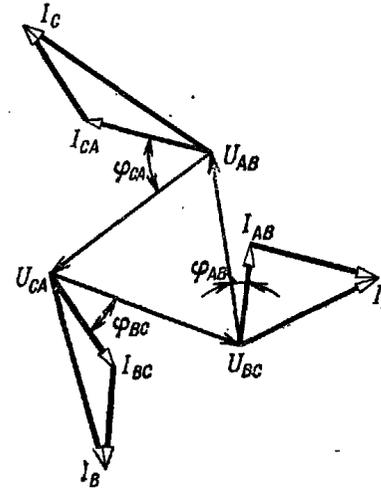


Рис. 7-18. Векторная диаграмма при соединении электроприемников треугольником.

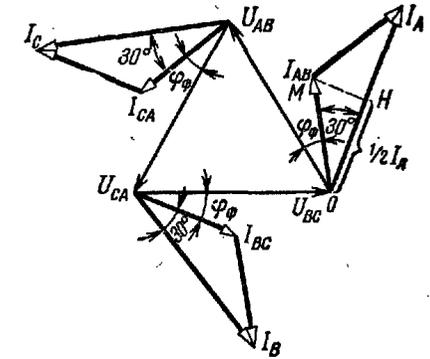


Рис. 7-19. Векторная диаграмма для цепи, соединенной треугольником, при равномерной нагрузке фаз.

того вектора фазного тока  $I_{AB}$  на вектор линейного тока  $I_A$ , из прямоугольного треугольника  $OMN$ , получим, что

$$\frac{1}{2} I_A = I_{\phi} \cos 30^\circ = I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$I_A = \sqrt{3} I_{\phi}, \quad (7-21)$$

т. е. линейные токи по абсолютной величине больше фазных токов в  $\sqrt{3}$  раз.

Из того же рисунка следует, что линейные токи отстают от соответствующих фазных токов на угол  $30^\circ$ .

Расчет трехфазной симметричной цепи, соединенной треугольником, сводится к расчету одной фазы.

Фазное напряжение

$$U_{\phi} = U_{\Delta};$$

фазный ток

$$I_{\phi} = U_{\phi} / z_{\phi};$$

линейный ток

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

Угол сдвига фазного тока относительно фазного напряжения определяется через его косинус, синус или тангенс:

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{r_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \sin \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{r_{\phi}}.$$

Активная, реактивная и полная мощности одной фазы определяются выражениями:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}.$$

При симметричной системе напряжений и токов соответствующие мощности трех фаз определяются выражениями:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-22)$$

$$Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi_{\phi}; \quad (7-23)$$

$$S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}. \quad (7-24)$$

При несимметричной системе напряжений или неравномерной нагрузке фаз приемников энергии активная и реак-

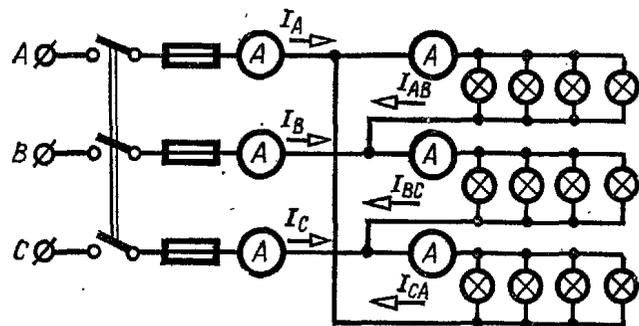


Рис. 7-20. Схема соединения электрических ламп треугольником.

тивная мощности трехфазной системы определяются как суммы мощностей отдельных фаз, т. е. они определяются теми же выражениями, которые были приведены для случая соединения приемников энергии звездой.

Соединение треугольником применяется для включения как ламп (рис. 7-20), так и электродвигателей. При этом

необходимо, чтобы номинальное напряжение ламп было равно линейному напряжению сети. Трехфазный электродвигатель включается треугольником, если номинальное фазное напряжение его равно линейному напряжению сети, или звездой, если номинальное фазное напряжение его в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного напряжения сети.

**Пример 7-5.** Трехфазный электродвигатель, соединенный треугольником, работает при напряжении 220 В с  $\cos \varphi = 0,8$  и мощностью 3 кВт. Определить линейные и фазные токи.

**Решение.**

Из выражения (7-22) следует, что

$$I_{л} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{л} \cos \varphi} = \frac{3000}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,8} = 10 \text{ А.}$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{1,73} = 6 \text{ А.}$$

**Пример 7-6.** Трехфазный электродвигатель, соединенный треугольником, работает при напряжении 120 В, имея в цепи питания линейный ток 25 А; мощность двигателя 3 кВт. Определить коэффициент мощности двигателя.

**Решение.**

Из выражения (7-2) следует, что

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{л} I_{л}} = \frac{3000}{1,73 \cdot 120 \cdot 25} = 0,58.$$

**Пример 7-7.** К трехфазной сети (рис. 7-20) с напряжением  $U_{л} = 120$  В присоединены приемники энергии, имеющие сопротивления  $r_{AB} = 10$  Ом,  $r_{BC} = r_{CA} = 20$  Ом. Определить, под какими напряжениями будут находиться приемники при перегорании предохранителя в проводе В.

**Решение.**

При перегорании предохранителя приемники АВ и ВС окажутся соединенными последовательно и включенными на линейное напряжение  $U_{л} = 120$  В. Ток приемников

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{AC}}{r_{AB} + r_{BC}} = \frac{120}{10 + 20} = 4 \text{ А.}$$

Напряжения на зажимах приемников

$$U'_{AB} = I_{AB} r_{AB} = 4 \cdot 10 = 40 \text{ В;}$$

$$U'_{BC} = I_{BC} r_{BC} = 4 \cdot 20 = 80 \text{ В;}$$

$$U_{CA} = U_{л} = 120 \text{ В.}$$

При любом способе соединения приемников энергии алгебраическая сумма мгновенных значений линейных токов в трехпроводной трехфазной цепи равна нулю.

При соединении звездой без нулевого провода, приняв за положительное направление линейных токов от генератора

к приемнику, по первому закону Кирхгофа, можно написать:

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (7-25)$$

При соединении приемников энергии треугольником сумма линейных токов равна нулю, так как

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Естественно, сумма векторов линейных токов равна нулю

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0. \quad (7-26)$$

Поэтому, например, магнитодвижущая сила трех линейных токов в трехфазном кабеле равна нулю, равен нулю и магнитный поток кабеля. Это позволяет для защиты кабеля от механических повреждений применять стальную броню, не опасаясь перегрева ее от перемагничивания, что имело бы место, если бы сумма токов не была равна нулю.

## 6. Мощность трехфазной системы и методы ее измерения

Активной мощностью трехфазной системы называют сумму активных мощностей ее отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_{\phi A} U_{\phi A} \cos \varphi_A + I_{\phi B} U_{\phi B} \cos \varphi_B + I_{\phi C} U_{\phi C} \cos \varphi_C. \quad (5.9)$$

При симметричной нагрузке мощности отдельных фаз равны между собой, а общая мощность определяется как

$$P = 3I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi. \quad (5.10)$$

На практике мощность трехфазной системы чаще выражают через линейные, а не через фазные токи и напряжения. При соединении звездой  $U_{\phi} = U_l / \sqrt{3}$  и  $I_{\phi} = I_l$ , а при соединении треугольником  $U_{\phi} = U_l$  и  $I_{\phi} = I_l / \sqrt{3}$ . В обоих случаях, заменяя фазные величины линейными, мы получим одно и то же выражение для мощности трехфазной системы при симметричной нагрузке:

$$P = 3I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} I_l U_l \cos \varphi. \quad (5.11)$$

Для трехфазной системы также справедливы следующие соотношения для полной, активной и реактивной мощностей, соответственно:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} U_l I_l; \\ P &= \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi. \end{aligned} \quad (5.12)$$