

Трёхфазные электрические цепи

Наибольшее распространение в современной электроэнергетике получили трёхфазные цепи благодаря следующим преимуществам:

- высокий КПД и экономичность производства и передачи электроэнергии;
- возможность получения двух эксплуатационных напряжений — фазного и линейного;
- простота конструкции трёхфазного асинхронного двигателя — основного приводного двигателя в промышленности.

Трёхфазные цепи — это такие цепи, в ветвях которых действуют три одинаковые по амплитуде и частоте синусоидальные ЭДС, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 120° (рис 1 б).

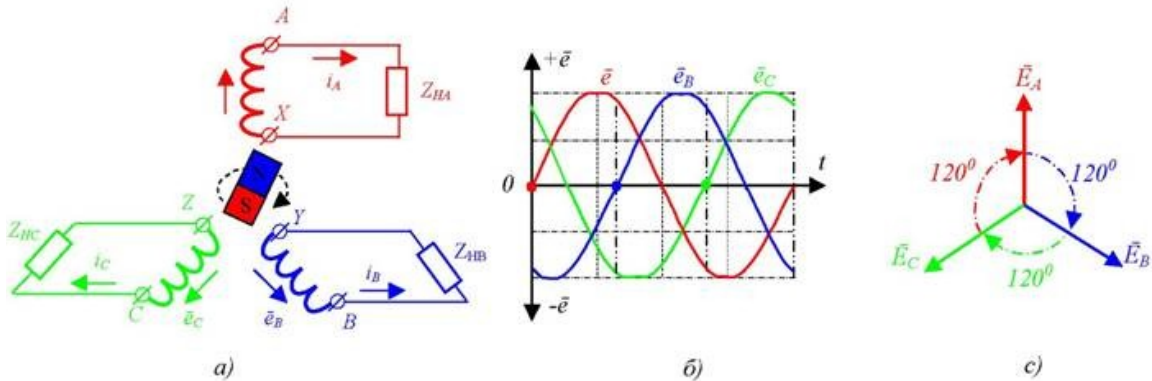


Рисунок 1 - Трёхфазная система ЭДС

Каждую из однофазных цепей, входящих в трёхфазную систему, принято называть фазой. Фаза - это элемент трёхфазной системы в отличие от угла сдвига векторов. Как и однофазная цепь, трёхфазная состоит из генератора (трёхфазного), линии передачи (трёхфазной) и приемников (как трёхфазных, так и однофазных).

Трёхфазная система ЭДС образуется при вращении постоянного магнита с угловой скоростью ω внутри трех обмоток, расположенных под углом 120° друг относительно друга, при этом в них будут индуцироваться три синусоидальных ЭДС, сдвинутые на угол 120° . Начала фаз источника обозначают А, В, С, концы фаз — X, Y, Z. У приемников энергии начала фаз обозначают а, b, с, концы — x, y, z (рис 1а).

Способы соединения фаз источника

Трёхфазный источник, как правило, включают по схеме звезда. При этом концы фаз X, Y, Z соединяют вместе, образуя нейтральную точку N, а начала фаз А, В, С подключают к проводам, идущим к нагрузке.

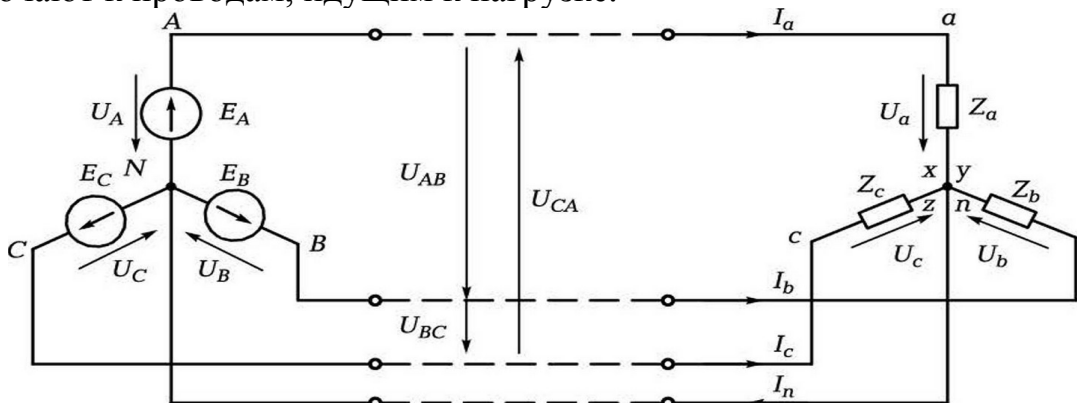


Рисунок 2 - Схема соединения звездой трёхфазных источника и приемника

Эти провода называются *линейными*, а цепь — *трехпроводной*. Если нейтральная точка источника N соединена с нейтральной точкой приемника n, то цепь становится *четырёхпроводной*, а четвертый провод носит название *нейтрального*.

Если ЭДС каждой фазы равны и сдвинуты друг относительно друга на угол 120° , система называется *симметричной*.

Приняв начальную фазу ψ фазы A равной нулю (см. рис. 3.1, а), можно выразить мгновенные значения ЭДС в фазах следующим образом:

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

$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

Направление ЭДС в фазах принимается от конца к началу (от X к A), а напряжения — от начала к концу (рис 2). Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС имеет вид, приведенный на рис. 1с. Из нее следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0$$

Соответственно равна нулю в любой момент времени и алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС генератора:

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

В трехфазной цепи при соединении звездой следует различать:

E_A, E_B, E_C — фазные ЭДС источника;

U_A, U_B, U_C — фазные напряжения источника;

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} — линейные напряжения источника;

I_A, I_B, I_C — фазные и линейные токи источника;

U_N — напряжение смещения нейтрали.

Государственным стандартом предусмотрены номинальные значения линейных U_l (660, 380, 220 В) и фазных U_ϕ (380, 220, 127 В) напряжений.

При соединении фаз генератора треугольником начало одной фазы подключают к концу другой, в результате чего образуется последовательное соединение фаз источника (рис. 3 а).

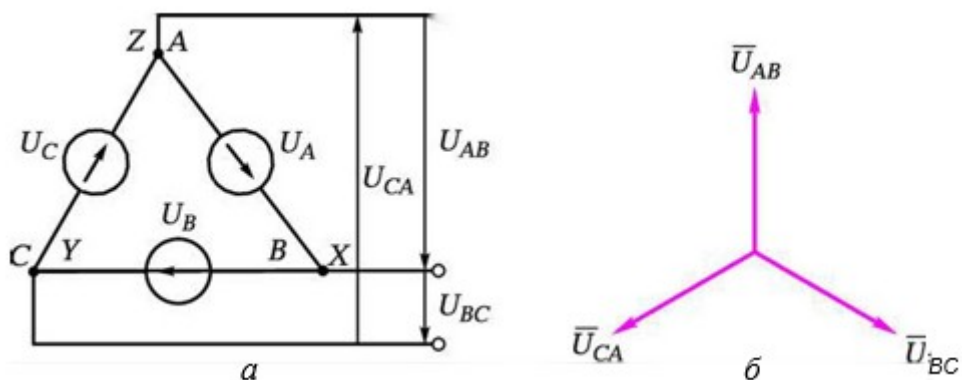


Рисунок 3 - Соединение фаз источника треугольником: а — схема; б — векторная диаграмма

Это не короткое замыкание, так как сумма мгновенных значений ЭДС, сдвинутых друг относительно друга на 120° , в любой момент времени равна нулю. При соединении треугольником векторы фазных и линейных напряжений источника совпадают (рис. 3 б): $U_A = U_{AB}, U_B = U_{BC}, U_C = U_{CA}$

Последовательность в обозначении фаз A, B, C не случайна, так как она определяет последовательность изменений фазных ЭДС.

Виды нагрузок. Способы соединения фаз нагрузки.

В трехфазных цепях нагрузка может быть:

- *симметричной*, когда полные сопротивления в фазах равны ($Z_a = Z_b = Z_c$) и характер их одинаков ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$). Примером могут служить трехфазные асинхронные или синхронные двигатели, обмотки статора которых имеют одинаковые значения как активных, так и индуктивных сопротивлений;
- *равномерной*, когда полные сопротивления в фазах равны ($Z_a = Z_b = Z_c$), но характер их различен ($\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$). Например, в одну фазу включена активная нагрузка, в другую — индуктивная, в третью — емкостная, равные друг другу по модулю;
- *однородной*, когда характер нагрузки в фазах одинаков ($\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$), но полные сопротивления различны ($Z_a \neq Z_b \neq Z_c$). Примером такой нагрузки может служить осветительная сеть промышленных и бытовых зданий, когда во всех фазах включены осветительные лампы, но число их различно.

Равномерная и однородная нагрузки относятся к *несимметричной* нагрузке.

При соединении нагрузки звездой (рис 2):

U_a, U_b, U_c — фазные напряжения U_ϕ нагрузки;

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} — линейные напряжения U_l нагрузки;

I_a, I_b, I_c — фазные и линейные токи нагрузки;

I_n — ток в нейтральном проводе;

U_n — напряжение смещения нейтрали.

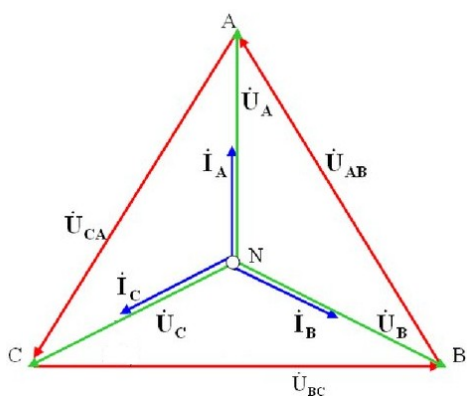
Для схемы приведенной на рисунке 2, в соответствии с о вторым законом

Кирхгофа можно записать:

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

$$\vec{U}_{bc} = \vec{U}_b - \vec{U}_c$$

$$\vec{U}_{ca} = \vec{U}_c - \vec{U}_a$$



Тогда в соответствии с векторной диаграммой можно записать основные соотношения:

$$I_l = I_\phi$$

$$U_l = \sqrt{3} * U_\phi$$

При соединении нагрузки **треугольником** фазные напряжения равны линейным (U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}), а в цепи текут токи двух видов: фазные I_ϕ (I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}) и линейные I_l (I_a, I_b, I_c) (рис. 4 а).

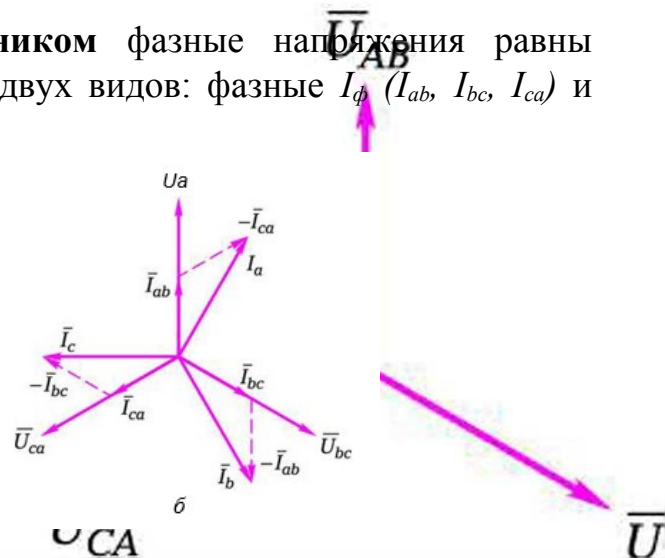
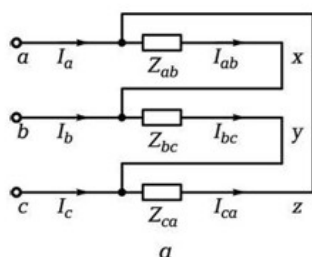
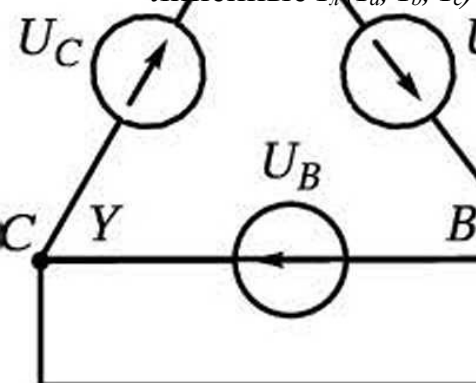


Рисунок 4 - Соединение фаз нагрузки треугольником

Соотношение между I_ϕ и I_l найдем с помощью векторной диаграммы (рис. 4 б), записав в соответствии с первым законом Кирхгофа для цепи (см. рис. 4 а):

$$\vec{I}_{AB} = \vec{I}_A - \vec{I}_B$$

$$\vec{I}_{BC} = \vec{I}_B - \vec{I}_C$$

$$\vec{I}_{CA} = \vec{I}_C - \vec{I}_A$$

Линейные и фазные токи и напряжения связаны соотношением

$$U_l = U_\phi$$

$$I_l = \sqrt{3} * I_\phi$$

Для известных U_ϕ и I_ϕ . независимо от схемы соединения нагрузки, могут быть определены активная, реактивная и полная мощности, потребляемые каждой фазой:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; S_\phi = U_\phi I_\phi$$

Мощности, потребляемые симметричной трехфазной нагрузкой:

$$P_H = 3 P_\phi; Q_H = 3 Q_\phi; S_H = 3 S_\phi$$

Для линейных напряжений и токов

$$P_H = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_\phi; Q_H = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi_\phi; S_H = \sqrt{3} U_l I_l$$

Если сопротивления фаз не равны между собой (нагрузка несимметрична), то расчет трехфазной цепи должен вестись для каждой фазы, поскольку фазные токи, фазные мощности, углы сдвига фаз различны.

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a; S_a = U_a I_a$$

$$P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b; S_b = U_b I_b$$

$$P_c = U_c I_c \cos \varphi_c; Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c; S_c = U_c I_c$$

Мощности, потребляемые несимметричной трехфазной нагрузкой:

$$P_H = P_a + P_b + P_c; Q_H = Q_a + Q_b + Q_c; S_H = S_a + S_b + S_c;$$

При известных значениях фазных или линейных напряжений и фазных сопротивлений расчет трехфазных цепей ведут в последовательности:

- 1) определяют углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами:

$$\cos \varphi_\phi = \frac{R_\phi}{Z_\phi}$$

- 2) находят действующие значения фазных токов:

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}$$

- 3) в соответствии со схемой соединения нагрузки определяют значения линейных токов и фазных или линейных напряжений, значения которых не заданы.

- 4) находят активные, реактивные и полные мощности каждой фазы и

суммарные активную, реактивную и полную мощности трехфазной цепи. При этом следует помнить, что реактивная мощность цепи с индуктивной нагрузкой положительна, а с емкостной — отрицательна.

- 5) строят звезду фазных и линейных напряжений в масштабе m_U (В/мм).
- 6) под соответствующими углами к векторам фазных напряжений строят в масштабе (А/мм) векторы фазных токов и строят векторы линейных токов для схемы треугольник, соединив концы векторов фазных токов.

Роль нейтрального провода при несимметричной нагрузке

При соединении фаз приемника звездой для четырехпроводной трехфазной системы с нейтральным проводом (рис. 5 а)

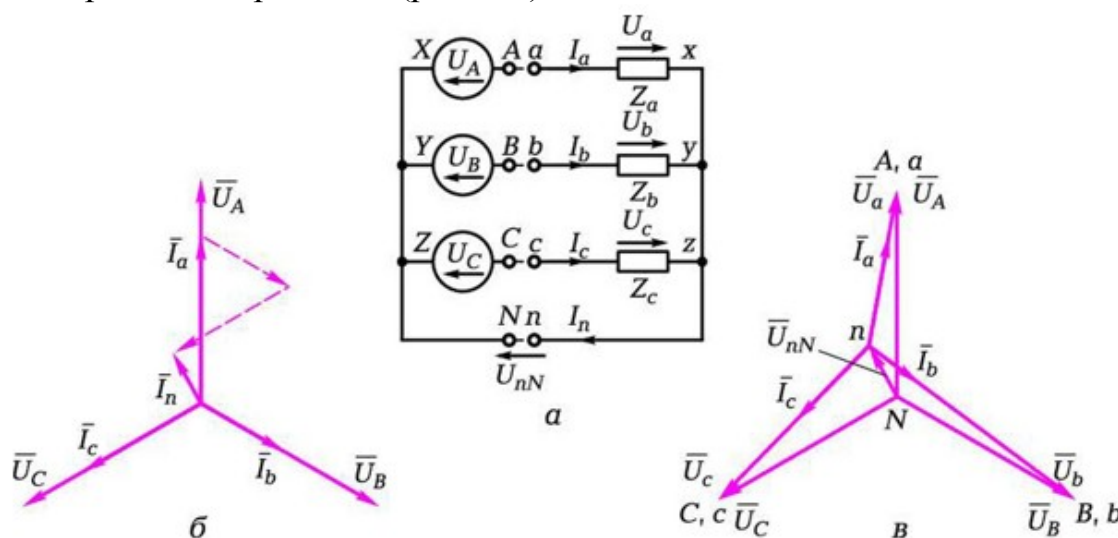


Рисунок 5 - Соединение фаз нагрузки звездой с нейтральным проводом

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа определяется как геометрическая сумма векторов

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$$

Поскольку при симметричной нагрузке $I_a = I_b = I_c$, то $I_n = 0$, т. е. нейтральный провод не нужен. Следовательно, обрыв нейтрального провода не приведет к каким-либо изменениям в цепи.

При несимметричной нагрузке фазные токи определяются величиной нагрузки в фазах и в общем случае не равны между собой. Как видно из представленной на рис. 5 б диаграммы для четырехпроводной цепи с активной нагрузкой, при несимметричной нагрузке в нейтральном проводе появляется ток I_n , который может быть определен с помощью векторной диаграммы.

Обрыв нейтрального провода приводит к появлению напряжения смещения нейтрали U_{nN} , что в свою очередь ведет к нарушению равенства фазных напряжений — «перекосу» фаз (рис. 5 в). Использование нейтрального провода при соединении приемников звездой позволяет отсимметризовать фазные напряжения и не допускать их изменения при изменении нагрузки в фазах.

Применение трехпроводной цепи с несимметричной нагрузкой, включенной звездой, недопустимо, поскольку «перекос» фаз в нагрузке ведет к изменению режимов работы оборудования и может вывести его из строя.

