

Законспектировать материал. Фотоотчёт (1 файл) прислать на эл. почту по расписанию

Обязательно! Прописывать предмет, фамилию в каждом фотоотчёте.

24.10.24 (8:30 – 10:00)

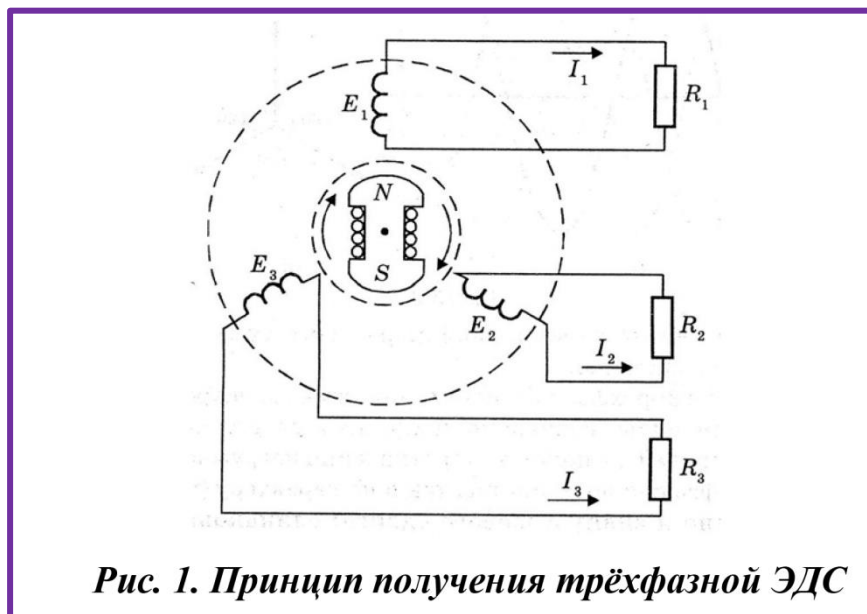
Принцип построения трехфазной системы

Объединение в одной линии электропередачи нескольких цепей переменного тока с независимыми источниками электроэнергии называется *многофазной системой*. Наибольшее распространение получила *трёхфазная система*, которая была изобретена и разработана во всех деталях, включая генератор трехфазного переменного тока, трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель, М. О. Доливо - Добровольским в 1889-1891 гг. Благодаря своим достоинствам изобретение привлекло внимание инженеров и промышленников всего мира; трехфазная система быстро заняла ведущее положение в мировой электротехнике и сохраняет его до настоящего времени.

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных переменных ЭДС (токов) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых относительно друг друга по фазе на $1/3$ периода (120°). **Каждая из ЭДС (токов) находится в своей фазе периодического процесса, поэтому часто называется просто «фазой».** Также «фазами» называют проводники - носители этих токов.

Для того чтобы выяснить, как получают трехфазный переменный ток, кратко рассмотрим устройство трехфазного генератора.

Трехфазный генератор состоит из трех одинаковых изолированных друг от друга обмоток, расположенных на статоре и разнесенных в пространстве на 120° . В центре статора вращается электромагнит (рис. 1).



При этом форма магнита такова, что магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, изменяется по косинусоидальному закону. Тогда по закону электромагнитной индукции в катушках будут индуцироваться ЭДС равной амплитуды и частоты, отличающиеся друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} e_1 &= E_0 \sin \omega t; \\ e_2 &= E_0 \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_3 &= E_0 \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \tag{1}$$

Эти три ЭДС можно изобразить на временной (рис. 2) и векторной (рис. 3) диаграммах:

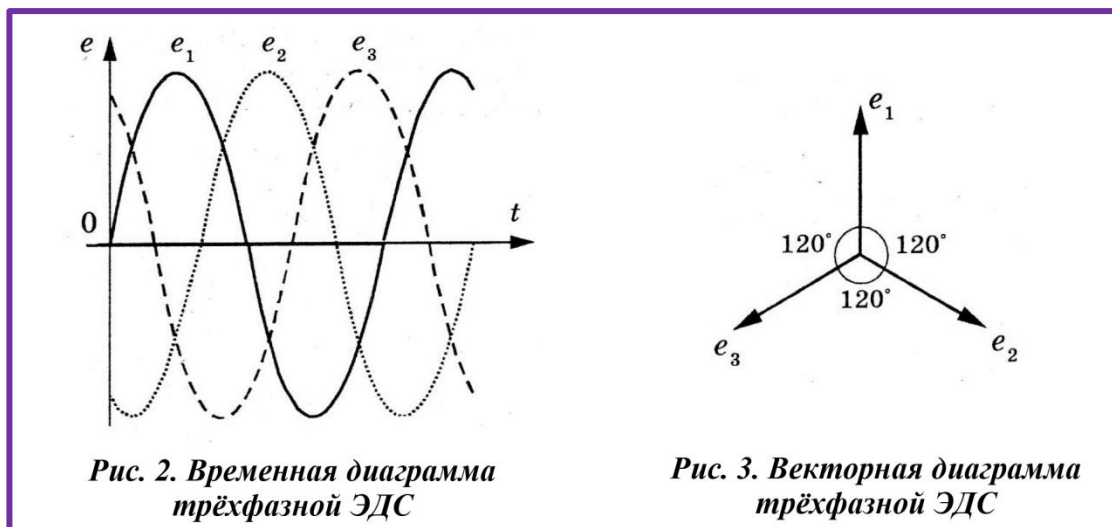


Рис. 2. Временная диаграмма трёхфазной ЭДС

Рис. 3. Векторная диаграмма трёхфазной ЭДС

Как видно из векторной диаграммы, сумма этих ЭДС равна нулю.

Если в трехфазной системе действуют электродвижущие силы, равные по величине и сдвинутые по фазе на 120° , а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз как по величине, так и по характеру (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то режим в ней называется **симметричным**. Невыполнение одного из этих условий или двух является причиной **несимметричного** режима.

Чтобы образовать из этих независимых однофазных систем единую трехфазную, необходимо определенным образом электрически соединить отдельные обмотки.

Существуют два основных способа соединения: **звездой** и **треугольником**

Соединение звездой

Отдельные фазы трехфазной системы принято обозначать латинскими буквами **A**, **B** и **C**. Этими же буквами обозначают начала обмоток генератора. Концы обмоток обозначают буквами **X**, **Y** и **Z**.

Условимся, что положительно направленный ток выходит из обмотки генератора через ее начало и входит в нее через ее конец (см. рис. 1). Если все концы обмоток генератора соединить в одной точке O , а к их началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии (у которых концы также соединены в общей точке O'), то мы получим соединение звездой (рис. 3).

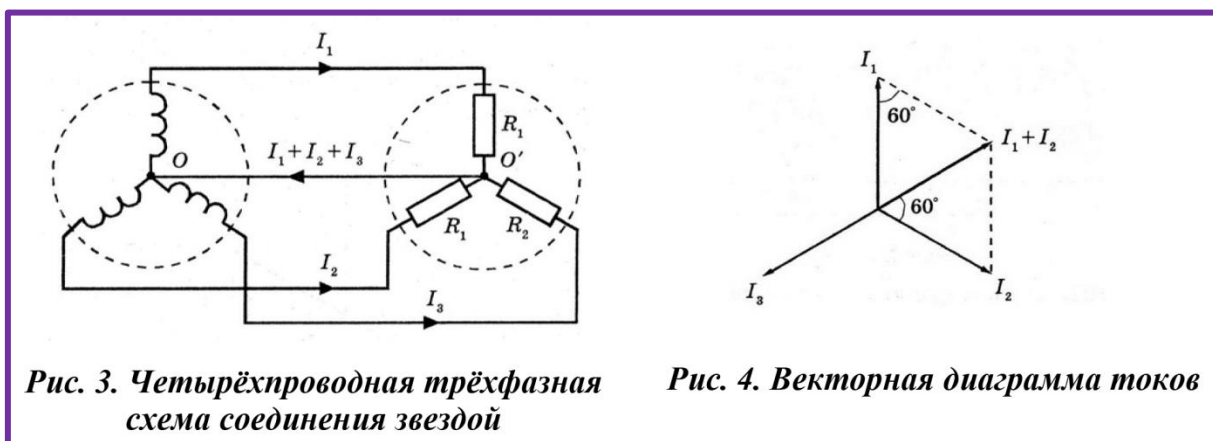


Рис. 3. Четырёхпроводная трёхфазная схема соединения звездой

Рис. 4. Векторная диаграмма токов

Контуры, по которым замыкаются фазные токи, при соединении звездой не изменятся по сравнению с рис. 1. Следовательно, по общему обратному проводу будет протекать ток, равный сумме токов трех фаз:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \quad (2)$$

Если все три фазы имеют одинаковые нагрузки, то фазные токи будут равны по модулю, отличаясь друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} I_A &= I_m \sin \omega t \\ I_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ I_C &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

Для того чтобы найти значение тока в проводе OO' , нужно сложить токи (3). Но намного проще это можно сделать с помощью векторной диаграммы (рис. 4). В результате мы получим, что при симметричной нагрузке ток в общем проводе равен нулю, поэтому провод OO' называется **нулевым**. Точка соединения концов обмоток генератора или концов нагрузок называется **нулевым**. Провода, соединяющие начала обмоток генератора с приемниками электроэнергии, называются **линейными**. Система трехфазного тока с нулевым проводом называется **четырёхпроводной**.

В цепях трехфазного тока вне зависимости от способа соединения различают два типа напряжений — линейные U_L и фазные U_Φ — и два типа токов — линейные I_L и фазные I_Φ . Напряжение между двумя линейными проводами называется **линейным**, а между линейным и нулевым проводом — **фазным**. Токи, протекающие в линейных проводах, называются **линейными**, а в нагрузках фаз — **фазными**.

Роль нулевого провода. На первый взгляд может показаться, что поскольку в нулевом проводе ток равен нулю, то этот провод можно совсем убрать, оставив только три линейных провода. Однако это не всегда возможно. В случае несимметричной нагрузки отсутствие нулевого провода приведет к перераспределению фазных напряжений, в результате чего некоторые из них станут выше номинального (что недопустимо), а некоторые — ниже.

Если же при несимметричной нагрузке включить нулевой провод, то все фазные напряжения будут равны номинальному, а по нулевому проводу будет протекать некоторый ток. В этом легко убедиться с помощью векторных диаграмм. Следовательно, в цепях с симметричными нагрузками нулевой провод не нужен. Таковыми являются, например, электродвигатели. Однако, наличие нулевого провода обеспечивает равенство фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

В дальнейшем, для обозначения линейных напряжений будем пользоваться двойными индексами, а фазных — одинарными (рис. 5).

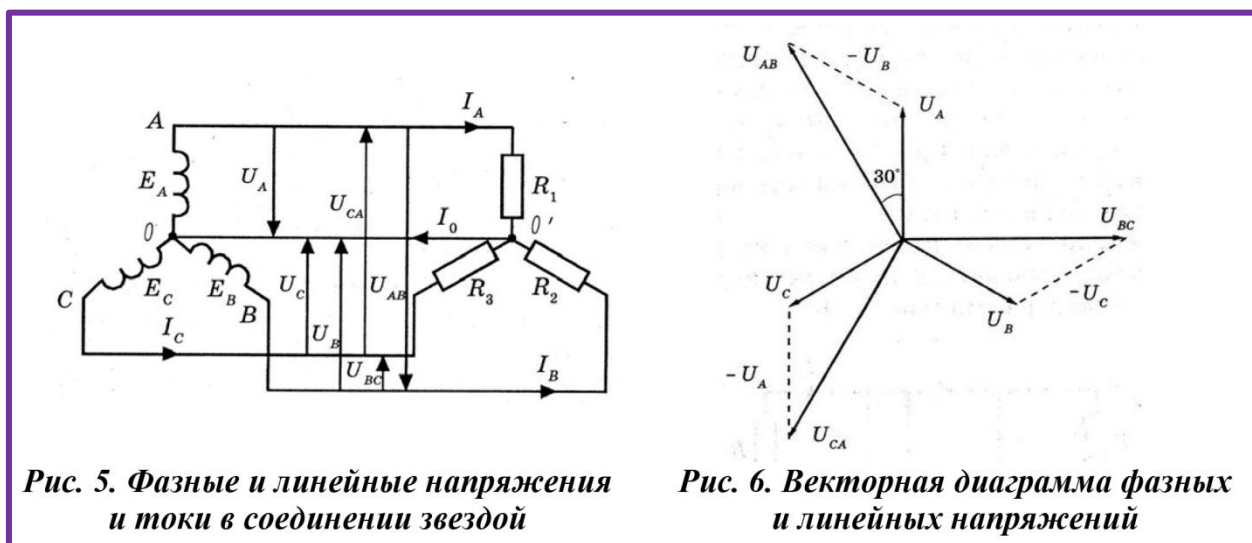


Рис. 5. Фазные и линейные напряжения и токи в соединении звездой

Рис. 6. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

При соединении звездой линейный ток совпадает с фазным, т. е. $I_L = I_\phi$. Как видно из рис. 5, линейные напряжения при соединении звездой являются векторными разностями соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A. \end{aligned} \quad (4)$$

Построим векторную диаграмму линейных и фазных напряжений при соединении звездой (рис. 6).

Сначала построим три вектора фазных напряжений: U_A , U_B и U_C , расположенные относительно друг друга под углом 120° , а затем, пользуясь соотношениями (4), - векторы линейных напряжений. Для построения вектора линейного напряжения U_{AB} нужно из вектора U_A вычесть вектор U_B , т. е. прибавить к вектору U_A вектор $(-U_B)$. Таким же способом строятся и остальные векторы линейных напряжений.

Мы видим, что линейные напряжения также образуют симметричную трехлучевую звезду, повернутую относительно звезды фазных напряжений на угол 30° против часовой стрелки.

Для нахождения соотношения между модулями линейных и фазных напряжений рассмотрим тупоугольный треугольник с углом 120° при вершине, образованный векторами U_A , $(-U_B)$ и U_{AB} . Опустим перпендикуляр из вершины тупого угла этого треугольника на противоположную сторону и найдем, что $U_L = U_A \cos 30^\circ$. Следовательно,

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (5)$$

Таким образом, в трехфазной системе, соединенной звездой, линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3}$ раза. Например, если линейное напряжение равно 220 В, то фазное будет в $\sqrt{3}$ раза меньше и равно 127 В. Если же фазное напряжение равно 220 В, то линейное будет в $\sqrt{3}$ раза больше — 380 В.

При соединении звездой с нулевым проводом существуют две системы напряжений — 220/127 В и 380/220 В. Наличие двух напряжений (линейного и фазного) является достоинством четырехпроводной линии.

Если при соединении звездой с нулевым проводом нагрузка становится неравномерной, то соотношение (5) можно считать практически справедливым. Следует только помнить, что в этом случае в нулевом проводе появляется ток. Это приводит к незначительному падению напряжения на нулевом проводе, которым обычно можно пренебречь. Поэтому можно считать, что между нулевой точкой генератора и нулевой точкой приемника разность потенциалов отсутствует.

Соединение звездой без нулевого провода применяют при подключении обмоток трехфазных двигателей, с нулевым проводом — при электрификации жилых домов. В последнем случае он необходим, поскольку в жилом доме практически невозможно добиться симметрии нагрузок. При этом к домам подводят три фазы и нулевой провод, а внутри каждого дома стремятся примерно одинаково загрузить каждую из фаз, чтобы общая нагрузка была более или менее симметричной. К каждой квартире подводят нулевой провод и одну из фаз. Установка предохранителей в нулевом проводе на распределительных щитах категорически запрещена, так как при перегорании фазные напряжения могут стать неравными, что приводит к превышению номинального напряжения в некоторых фазах и выходу из строя осветительных и бытовых приборов.

Соединение треугольником

Если обмотки генератора трехфазного тока соединить так, что конец первой обмотки соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой, а к общим точкам подключить линейные провода, то получим *соединение треугольником* (рис. 7).

Кажущегося короткого замыкания в обмотках генератора не произойдет, так как сумма мгновенных значений ЭДС в них равна нулю:

$$\vec{e}_{AB} + \vec{e}_{BC} + \vec{e}_{CA} = 0 \quad (6)$$

в чем легко убедиться, построив векторную диаграмму.

На рис. 7 три приемника тока z_{AB} , z_{BC} , z_{CA} также включены треугольником. В отличие от соединения звездой, где в большинстве случаев применяется четырехпроводная система, здесь используются три провода.

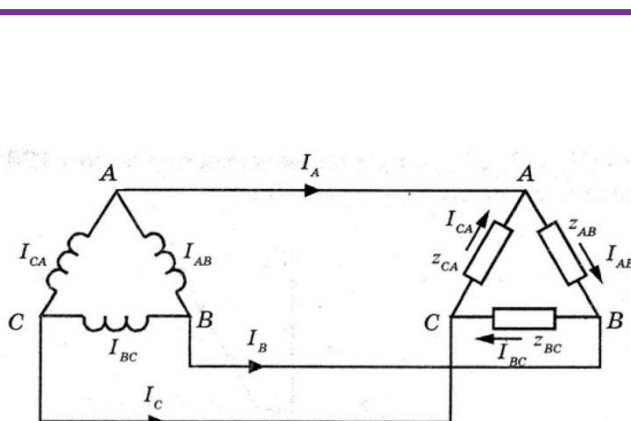


Рис. 7. Фазные и линейные напряжения и токи в соединении треугольником

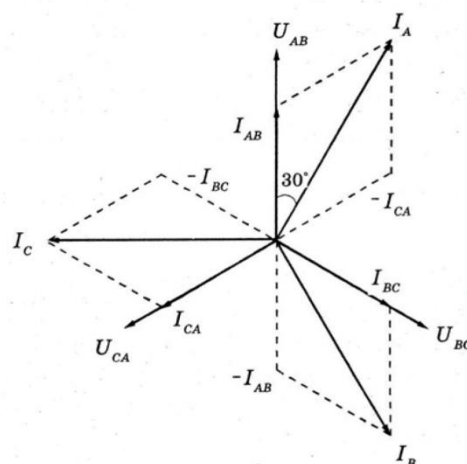


Рис. 8. Векторная диаграмма фазных и линейных токов

При соединении треугольником существуют только линейные напряжения (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}), поскольку нулевой провод отсутствует, но появляются фазные (I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}) и линейные (I_A , I_B , I_C) токи. Соотношения между линейными и фазными токами легко могут быть получены, если для каждой узловой точки потребителя применить первый закон Кирхгофа:

$$\begin{aligned}\vec{I}_A &= \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.\end{aligned}\tag{7}$$

Из этих соотношений видно, что любой из линейных токов равен геометрической разности двух фазных токов. Кроме того, почленное сложение этих равенств показывает, что геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0\tag{8}$$

Для построения векторной диаграммы в качестве исходных возьмем три вектора линейных напряжений (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}), расположенных под углом 120° относительно друг друга (рис. 8).

При симметричной нагрузке векторы фазных токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} сдвинуты по фазе относительно соответствующих напряжений на угол φ , величина которого зависит от характера нагрузки.

Теперь, пользуясь соотношениями (7), построим на этой же диаграмме векторы линейных токов. Для того чтобы построить вектор линейного тока I_A , нужно к вектору фазного тока I_{AB} прибавить вектор $(-I_{CA})$, т. е. вектор, равный по длине I_{CA} , но противоположный по направлению. Также строятся остальные векторы линейных токов.

Для нахождения соотношения между модулями линейных и фазных токов рассмотрим тупоугольный треугольник с углом 120° , образованный векторами I_{AB} ($-I_{CA}$) и I_{AB} . Опустим перпендикуляр из вершины тупого угла этого треугольника на противоположную сторону и найдем, что $I = I_{AB} \cos 30^\circ$. Следовательно, $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. Таким образом, в трехфазной системе, соединенной треугольником, линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раза, а фазные напряжения совпадают с линейными.

Наличие двух способов включения нагрузок расширяет возможности потребителей. Например, если каждая из трех обмоток трехфазного электродвигателя рассчитана на напряжение 220 В, то электродвигатель может быть включен треугольником в сеть 220/127 В или звездой в сеть 380/220 В. Соединение треугольником чаще всего используется в силовых установках (электродвигатели и т. п.), где нагрузка близка к равномерной. В трехфазных цепях способ включения нагрузки (звездой или треугольником) не зависит от способа включения обмоток генератора или трансформатора, питающего данную цепь.

Мощность трехфазной системы

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

$$P = P_A + P_B + P_C\tag{9}$$

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

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi \quad (10)$$

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

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}I_{Л}U_{Л} \cos \varphi \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3}U_{Л}I_{Л}; \\ P &= \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент мощности симметричной трёхфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$