

1. Посмотреть видеоурок

<https://youtu.be/Kb1CN7cXaVQ>

2. Списать в тетрадь

Трехфазная система ЭДС

Под трехфазной, симметричной системой ЭДС понимают совокупность трех одинаковых синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° . Именно так устроены промышленные источники электрической энергии. Такой источник представляет собой генератор, в котором имеются три катушки, находящиеся на одной оси, но сдвинутые в пространстве на 120° . Если плоскость катушки поворачивается в магнитном поле, или магнитное поле поворачивается относительно этих катушек, то в катушках возникает синусоидальная ЭДС. Каждая катушка, спустя некоторое время, занимает положение соседней катушки, поэтому ЭДС катушек сдвинуты во времени, рис.1.1.

Катушки генератора называются обмотками или фазами генератора. Слово «фаза» в электротехнике перегружено смысловыми значениями, тем не менее, это не приводит к путанице. Провода, с помощью которых фазы генератора подключаются к нагрузке, называются линиями.

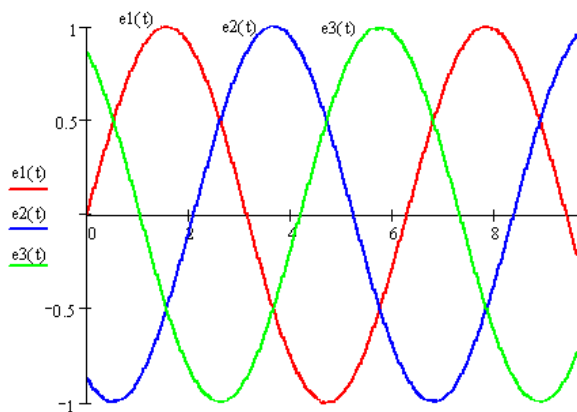


Рис.1.1. Изменение ЭДС фаз трехфазного генератора

Такой генератор, по-существу, представляет собой три генератора синусоидального напряжения с равными амплитудами и сдвинутыми на 120° относительно друг друга начальными фазами. Схема замещения такого генератора имеет вид изображенный на рис 1.2.а. Внутреннее сопротивление источников, для простоты, считаем равным нулю.

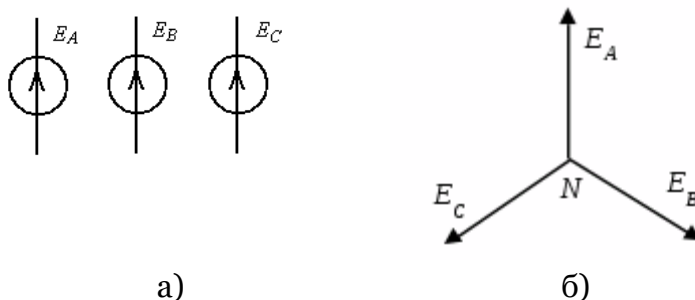


Рис.1.2. Трехфазный генератор (а) и его векторная диаграмма (б).

Амплитуды напряжений всех генераторов равны, а фазы отличаются на 120° , что отражено на векторной диаграмме, рис.1.2.б.

2. Способы соединения трехфазных источников и приемников

2.1. Соединение по схеме «звезда»

Каждая фаза генератора имеет собственную нагрузку, рис.2.1.а, они называются фазами нагрузки. В результате получается три автономные цепи. Если теперь соединить эти цепи в одной точке (рис.2.1.б), то токи, текущие в элементах цепей не изменяются, т.к. дополнительных контуров не возникает, при этом количество проводов снижается с шести до четырех. Такой способ соединения источников и приемников называется схемой «звезда».

Нагрузка каждой фазы может быть произвольной, т.е. отличаться как по величине, так и по характеру, от нагрузки остальных фаз. Особый интерес представляет симметричная нагрузка. При симметричной нагрузке, т.е. когда комплексные сопротивления $Z_a = Z_b = Z_c$, амплитуды токов в каждой фазе нагрузки равны, а фазы токов сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .

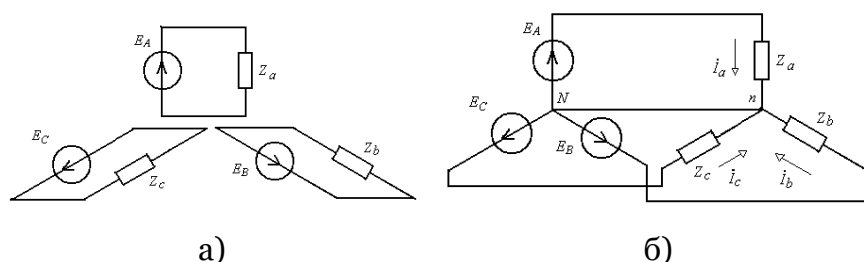


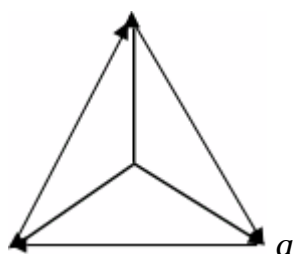
Рис.2.1. Трехфазный генератор с нагрузкой.

а) Шестипроводное включение трехфазного генератора;

б) Включение генератора и нагрузки по схеме звезда.

Ток в каждой фазе нагрузки определяется как:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_A}{Z_a} = \frac{E}{Z_a} e^{j0}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{E}_B}{Z_b} = \frac{E}{Z_b} e^{j120^\circ}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{E}_C}{Z_c} = \frac{E}{Z_c} e^{j240^\circ}$$



U_a

$U_{ca} \quad U_{ab}$

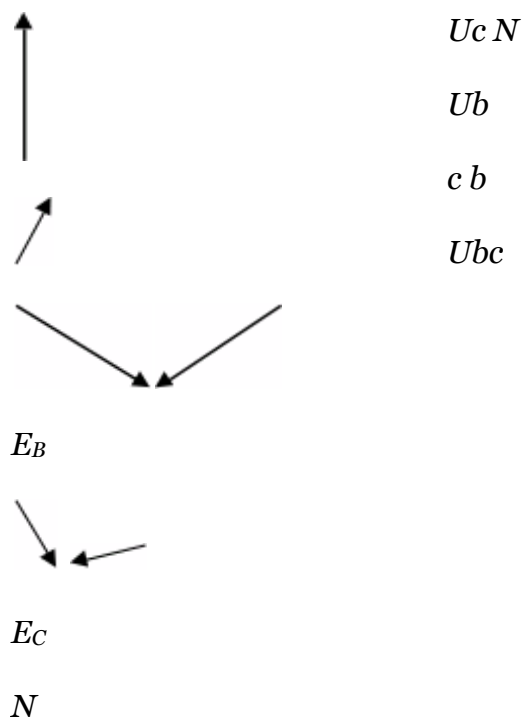


Рис.2.2. а) – векторно-потенциальная диаграмма источника включенного по схеме «звезда»;
 б) – потенциальная диаграмма, иллюстрирующая связь фазных и линейных напряжений.

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе равен сумме токов фаз нагрузки, т.е. равен нулю, рис.2.3.а. Это значит, что при симметричной нагрузке нейтральный провод можно отключить, рис. 2.3,б.

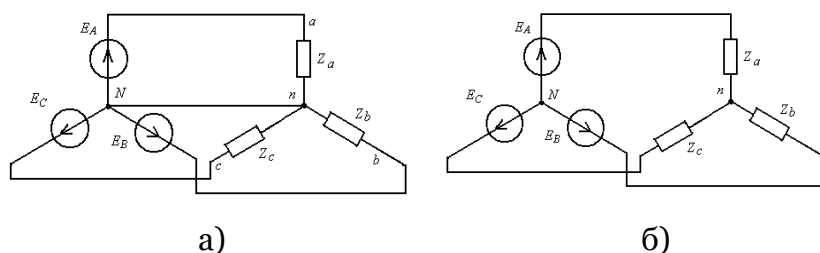


Рис.2.3. Трехфазная цепь, выполненная по схеме звезда.

а) с нейтральным проводом

б) без нейтрального провода

В трехфазной цепи общий провод Nn называется нейтральным проводом или просто нейтралью, а остальные провода линиями. Напряжения между линиями и нейтралью называются фазными напряжениями. Напряжения между линиями – линейными напряжениями. На рис.1.3,б линейные напряжения обозначены как U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} , а фазные U_a , U_b , U_c . Из данной диаграмма следует, что фазные напряжения равны между собой, т.е. $U_{\phi} = U_a = U_b = U_c$. Линейные напряжения также равны между собой, т.е. $U_{\text{л}} = U_{ab} = U_{bc} = U_{ca}$. Из треугольника abN следует, что между линейными и фазными напряжениями имеется простая связь $U_{\text{л}} = 2U_{\phi} \cos 30^{\circ} = \sqrt{3}U_{\phi}$.

Для трехфазной цепи выполненной по схеме звезда, токи протекающие в линиях равны токам протекающим в фазах, т.е. справедливы следующие $\vec{I}_A = \vec{I}_a$, $\vec{I}_B = \vec{I}_b$, $\vec{I}_C = \vec{I}_c$, а для узла N $\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0$. При симметричной нагрузке модули фазных токов равны.

2.2. Соединение по схеме «треугольник»

Включение источников по схеме звезда позволило сократить количество проводов. Есть еще один способ включения, который позволяет сократить количество проводов. Это включение по схеме «треугольник», рис. 2.4. Возможность включения фаз генератора по схеме треугольник пояснить довольно просто. Сумма векторов одинаковой длины, сдвинутых по фазе на 120° , равна нулю, рис.2.4.б. Это значит, что при включении ЭДС генератора по схеме треугольник дополнительных токов в контуре образованном источниками не возникает. Источники работают точно также как при шестипроводной системе.

Для цепи нагрузки, выполненной по схеме «треугольник» справедливы следующие равенства для токов:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}, \quad \vec{I}_B = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab}, \quad \vec{I}_C = \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc},$$

а для напряжений

$$U_\phi = U_\Delta.$$

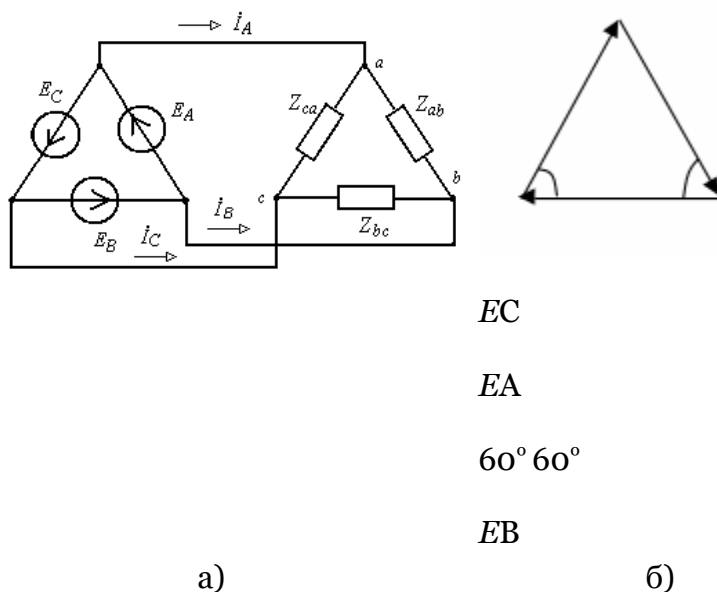


Рис.2.4. а) Схема включения (а) и потенциальная диаграмма (б)

трехфазного источника включенного, по схеме «треугольник»

Вообще говоря, трехфазный генератор и трехфазная нагрузка могут быть включены по разным схемам, т.е. имеется 5 способов соединения обмоток генератора с нагрузкой

Способы соединения трехфазных цепей Таблица 2.1

№пп	Схема включения фаз генератора	Схема включения фаз нагрузки	Нейтральный провод
1	«Звезда»	«Звезда»	Есть
2	«Звезда»	«Звезда»	Нет
3	«Звезда»	«Треугольник»	-
4	«Треугольник»	«Звезда»	-
5	«Треугольник»	«Треугольник»	-

3. Мощность трехфазных цепей

3.1. Энергетические соотношения в трехфазных цепях

Каждая фаза нагрузки может иметь свое сопротивление, поэтому активная мощность всех фаз определяется как сумма мощностей отдельных фаз нагрузки.

Для нагрузки включенной по схеме «звезда» активная мощность находится как

$$P = P_a + P_b + P_c,$$

или иначе

$$P = U_a I_a \cos j_a + U_b I_b \cos j_b + U_c I_c \cos j_c$$

Теоретически возможен случай включения нагрузки в нейтральный провод. В этом случае в формулу для мощности должно быть добавлено еще одно слагаемое.

Реактивная мощность также находится как сумма реактивных мощностей фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c,$$

т.е.

$$Q = U_a I_a \sin j_a + U_b I_b \sin j_b + U_c I_c \sin j_c$$

Нужно иметь в виду, что угол сдвига фаз определяется как разность углов между вектором напряжения и тока, т.е.

$$j = j_u - j_i,$$

иначе знак при синусе изменится на противоположный.

Полная мощность нагрузки определяется как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Для нагрузки выполненной по схеме «треугольник» формулы имеют следующий вид

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} ,$$

или

$$P = U_{ab} I_{ab} \cos j_{ab} + U_{bc} I_{bc} \cos j_{bc} + U_{ca} I_{ca} \cos j_{ca} .$$

Реактивная мощность также находится как сумма реактивных мощностей фаз:

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} ,$$

или

$$Q = U_{ab} I_{ab} \sin j_{ab} + U_{bc} I_{bc} \sin j_{bc} + U_{ca} I_{ca} \sin j_{ca} .$$

Еще раз напомним, что угол сдвига фаз определяется как разность фаз вектора напряжения и тока.

Полная мощность нагрузки определяется как же, как для схемы «звезда»:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

3.2. Измерение мощности в трехфазных цепях

Для измерения мощности в трехфазных цепях, в общем случае, когда нагрузка неравномерная необходимо включать три ваттметра, рис.3.1. Активная мощность, потребляемая нагрузкой, равна сумме показаний трех ваттметров.

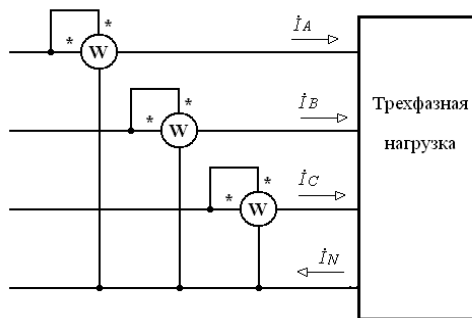


Рис.3.1. Рис.3.2. Измерение активной мощности в трехфазной цепи с помощью трех ваттметров.

Если нулевой провод отсутствует, то измерение мощности производится двумя ваттметрами, рис.3.2. В этом случае сумма показаний двух ваттметров равна мощности потребляемой всей нагрузкой.

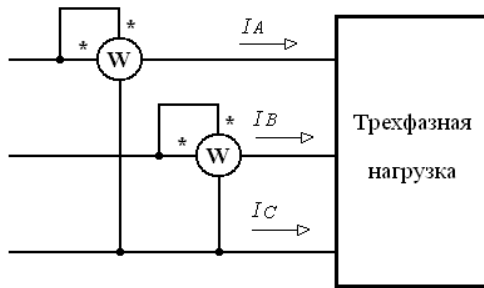


Рис.3.2. Измерение активной мощности в трехфазной цепи с помощью двух ваттметров.

Действительно, показания первого ваттметра $P_1 = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{AC}^* I_A \right]$, показания второго $P_2 = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{BC}^* I_B \right]$.

Рассмотрим сумму показаний

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{AC}^* I_A \right] + \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{BC}^* I_B \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{AC}^* I_A + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_{BC}^* I_B \right] = \\ &= \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{U}_A - \dot{U}_C)^* I_A + \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{U}_B - \dot{U}_C)^* I_B \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_A^* I_A + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_B^* I_B - \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{U}_A + \dot{U}_B)^* I_C \right] \end{aligned}$$

но $\dot{U}_A + \dot{U}_B = -\dot{U}_C$, тогда $I_A + I_B = -I_C$.

Из этого следует, что

$$P_1 + P_2 = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_A^* I_A + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_B^* I_B + \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_C^* I_C \right] = P_A + P_B + P_C$$

При симметричной нагрузке мощность можно измерить одним ваттметром, а результат утроить.

4. Расчет трехфазных цепей

При расчете трехфазных цепей используются те же методы, которые применяются для расчета цепей переменного тока. Правда, имеются некоторые особенности.

1. Положительные направления токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ в линиях приняты от источника к приемнику, а в нейтральном проводе $\dot{I}_n$, от приемника к источнику;
2. Положительные направления токов в схеме «треугольник» приняты в соответствии с движением часовой стрелки;
3. Приемники электрической энергии могут быть включены по схемам «звезда» с нейтральным проводом, «звезда» без нейтрального провода и «треугольник». В каждой схеме могут существовать симметричный и несимметричный режимы. При симметричном режиме сопротивления приемников всех фаз равны между собой.
4. При симметричном режиме расчет трехфазной цепи сводится к расчету одной фазы и выполняется как расчет однофазной цепи. При построении векторной

диаграммы такой цепи нужно учитывать, что напряжения другой фазы цепи имеет иную начальную фазу.

При расчете трехфазных цепей приняты специальные обозначения:

1. Все электрические величины, относящиеся к источникам, имеют индексы из прописных букв: A , B , C для фаз, и N - для нейтрального провода.
2. Все величины, относящиеся к приемникам используют индексы из строчных букв a , b , c и n для схемы «звезда» и ab , bc , ca - для схемы «треугольник».