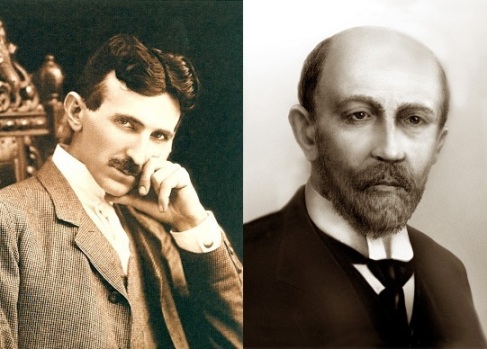
**Краткая историческая справка**

Исторически первым явление вращающегося магнитного поля описал [Никола Тесла](https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2118-nikola-tesla-biografiya-izobreteniya-otkrytiya.html), и датой этого открытия принято считать 12 октября 1887 года, - момент подачи ученым заявок на патенты, касающиеся асинхронного двигателя и технологии передачи электроэнергии. 1 мая 1888 года в США, Тесла получит свои главные патенты - на изобретение многофазных электрических машин (в том числе на асинхронный электродвигатель) и на системы передачи электрической энергии посредством многофазного переменного тока.

Сутью новаторского подхода Тесла к данному вопросу явилось его предложение строить всю цепочку генерации, передачи, распределения и использования электроэнергии как единую многофазную систему переменного тока, включающую в себя и генератор, и линию передачи, и двигатель переменного тока, который Тесла называл тогда «индукционным».



На европейском континенте, параллельно изобретательской деятельности Тесла, аналогичную задачу решал Михаил Осипович Доливо-Добровольский, работа которого была направлена на оптимизацию способа широкомасштабного использования электроэнергии.

На основе технологии двухфазного тока Николы Тесла, Михаил Осипович самостоятельно разработал трёхфазную электрическую систему (как частный случай многофазной системы) и асинхронный электродвигатель совершенной конструкции — с ротором типа «беличья клетка». Патент на двигатель Михаил Осипович получит 8 марта 1889 года в Германии.

[Трехфазная сеть по Доливо-Добровольскому](https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/2115-peredacha-trehfaznogo-toka-iz-lauffena-na-frankfurt.html) строилась по тому же принципу, что и у Тесла: механическую энергию в электрическую преобразует трехфазный генератор, по линии электропередач к потребителям подаются симметричные ЭДС, при этом потребителями выступают трехфазные двигатели или однофазные нагрузки (такие как лампы накаливания).

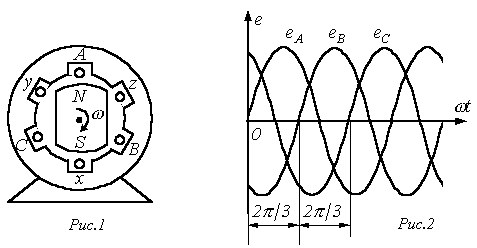


Трехфазные цепи переменного тока по сей день служат для обеспечения генерации, передачи и распределения электрической энергии. Данные цепи, как следует из их названия, строятся каждая из трех электрических подцепей, в каждой из которых действует синусоидальная ЭДС. ЭДС эти генерируются общим источником, имеют равные амплитуды, равные [частоты](https://electricalschool.info/main/osnovy/988-period-i-chastota-peremennogo-toka.html), однако смещены по фазе друг относительно друга на 120 градусов или на 2/3 пи (треть периода).

Каждая из трех цепей трехфазной системы именуется фазой: первая фаза – фаза "А", вторая фаза – фаза "В", третья фаза – фаза "С".

Начала этих фаз обозначаются соответственно буквами А, В и С, а концы фаз – X, Y и Z. Данные системы отличаются экономичностью, в сравнении с однофазными; возможностью простого получения вращающегося магнитного поля статора для двигателя, доступностью двух напряжений на выбор — линейного и фазного.

**Генератор трехфазного тока и асинхронные двигатели**



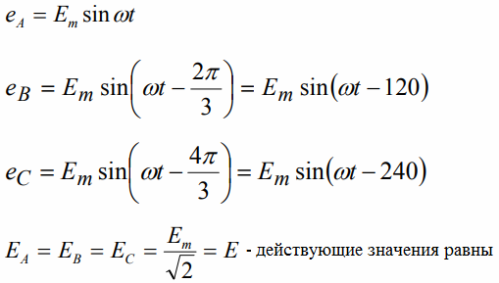
Итак, [трехфазный генератор](https://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1706-kak-ustroeny-generatory-postojannogo-i.html) представляет собой синхронную электрическую машину, предназначенную для создания трех гармонических ЭДС, смещенных на 120 градусов по фазе (по сути - во времени) друг относительно друга.

На статоре генератора для этой цели установлена трехфазная обмотка, у которой каждая фаза состоит из нескольких катушек, причем магнитная ось каждой «фазы» обмотки статора физически в пространстве повернута на треть окружности относительно двух других «фаз».

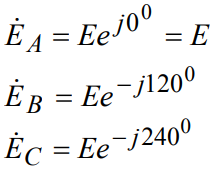
Такое расположение обмоток позволяет получать он них систему трехфазных ЭДС в процессе вращения ротора. Ротором здесь служит постоянный электромагнит, возбуждаемый током обмотки возбуждения, расположенной на нем.

Турбина на электростанции вращает ротор с постоянной скоростью, магнитное поле ротора вращается вместе с ним, магнитные силовые линии пересекают проводники обмоток статора, в итоге получается система индуцированных синусоидальных ЭДС одинаковой частоты (50 Гц), смещенных друг относительно друга во времени на треть периода.

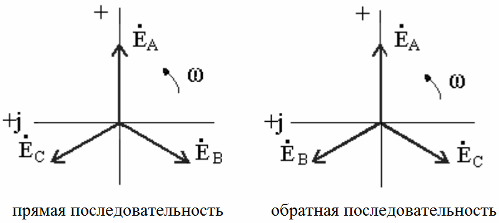
Амплитуда ЭДС определяется индукцией магнитного поля ротора и количеством витков в обмотке статора, а частота — угловой скоростью вращения ротора. Если принять начальную фазу обмотки А равной нулю, то для симметричных ЭДС трех фаз можно сделать запись в форме тригонометрических функций (фаза в радианах и в градусах):



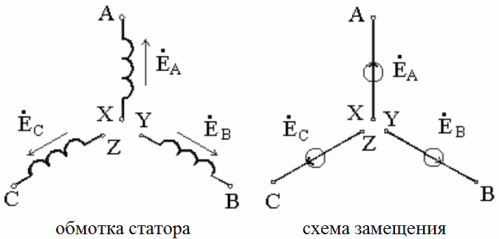
Кроме того возможна запись действующих значений ЭДС и в комплексной форме, а также изображение множества мгновенных значений в графическом виде (см.рис2):



Векторные диаграммы отражают взаимный фазовый сдвиг трех ЭДС системы, причем в зависимости от направления вращения ротора генератора, направление чередования фаз будет различаться (прямое или обратное). Соответственно, направление вращения ротора подключенного к сети асинхронного двигателя будет разным:



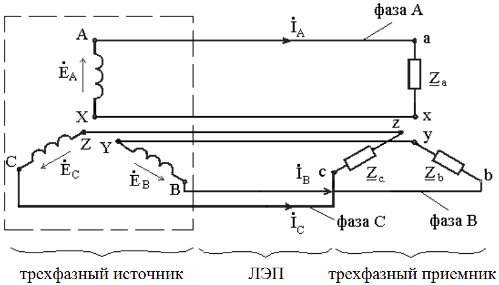
Если нет дополнительных оговорок, то подразумевается прямое чередование ЭДС в фазах трехфазной цепи. Обозначение начал и концов обмоток генератора - соответствующих фаз, а также направление действующих в них ЭДС, показано на рисунке (справа схема замещения):



**Схемы подключения трехфазной нагрузки — «звезда» и «треугольник»**

Для питания нагрузки через три провода трехфазной сети, к каждой из трех фаз присоединяют как-бы по своему потребителю, или по фазе трехфазного потребителя (так называемого приемника электроэнергии).

Трехфазный источник можно изобразить схемой замещения из трех идеальных источников симметричных гармонических ЭДС. Идеальные приемники представлены здесь тремя полными комплексными сопротивлениями Z, каждое из которых питается от соответствующей фазы источника:

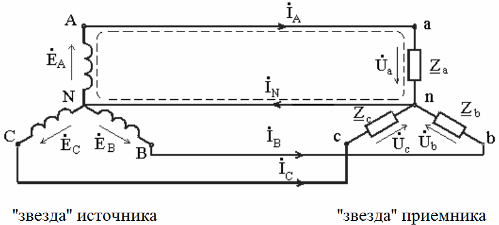


На рисунке для ясности изображены три цепи, не связанные между собой электрически, однако на практике такое включение не используется. В реальности три фазы все же имеют электрические соединения друг с другом.

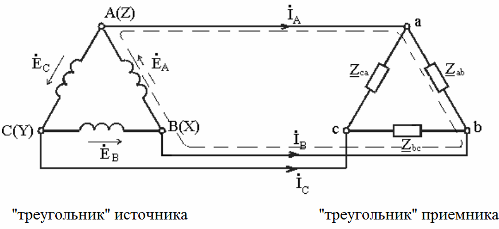
Фазы трехфазных источников и трехфазных потребителей соединяют друг с другом различными способами, и чаще всего встречается одна из двух схем - «треугольник» или «звезда».

Фазы источника и фазы потребителя могут быть сопряжены между собой разными сочетаниями: источник соединен звездой и приемник звездой, или источник — звездой, а приемник — треугольником.

Именно такие сочетания соединений и применяются чаще всего на практике. Схема «звезда» предполагает наличие одной общей точки у трех «фаз» генератора или трансформатора, такая общая точка называется нейтралью источника (или нейтралью приемника, если речь о «звезде» потребителя).



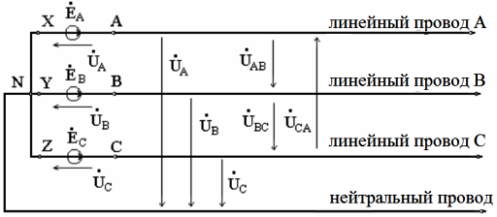
Соединяющие источник и приемник провода, называются линейными проводами, они связывают выводы обмоток фаз генератора и приемника. Провод, соединяющий нейтраль источника и нейтраль приемника называют **нейтральным проводом**. Каждая фаза образует своеобразную индивидуальную электрическую цепь, где каждый из приемников присоединен к своему источнику парой проводов - одним линейным и одним нейтральным.



Когда конец одной фазы источника соединяется с началом второй его фазы, конец второй — с началом третьей, а конец третьей — с началом первой, такое соединение фаз источника называется «треугольник». Три провода приемника, присоединенные аналогичным образом между собой, тоже образуют схему «треугольник», и вершины данных треугольников присоединяются друг к другу.

Каждая фаза источника в данной схеме образует собственную электрическую цепь с приемником, где присоединение образовано двумя проводами. Для такого подключения названия фаз приемника записывают двумя буквами в соответствии с проводами: ab, ac, ca. Индексы для параметров фаз обозначают этими же буквами: комплексные сопротивления Zab, Zac, Zca.

**Фазное и линейное напряжения**

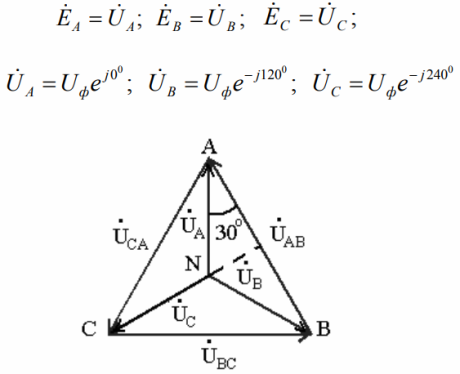


У источника, обмотка которого соединена по схеме «звезда», имеется две системы трехфазных напряжений: фазное и линейное.

**Фазное напряжение** — между линейным проводом и нейтралью (между концом и началом одной из фаз).

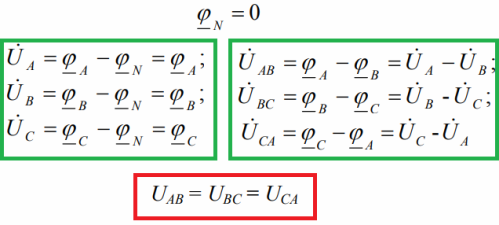
**Линейное напряжение** — между началами фаз или между линейными проводами. За положительное направление напряжения здесь условно принимают направление от точки цепи с более высоким потенциалом — к точке с более низким потенциалом.

Поскольку внутренние сопротивления обмоток генератора крайне малы, ими обычно пренебрегают, и считают, что фазные напряжения равны фазным ЭДС, поэтому и на векторных диаграммах напряжения и ЭДС обозначают одними и теми же векторами:



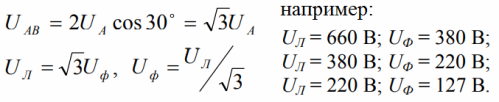
Приняв потенциал нейтральной точки за ноль, получим, что потенциалы фаз окажутся тождественны фазным напряжениям источника, а линейные напряжения — разностям фазных напряжений. Векторная диаграмма примет вид как на рисунке выше.

Каждая точка на такой диаграмме соответствует определенной точке трехфазной цепи, и проведенный между двумя точками диаграммы вектор покажет поэтому напряжение (его величину и фазу) между соответствующими двумя точками той цепи, для которой построена данная диаграмма.



В силу симметричности фазных напряжений, симметричны и линейные напряжения. Это видно по векторной диаграмме. Векторы линейных напряжений лишь сдвинуты между собой так же на 120 градусов. А соотношение между фазными и линейными напряжениями легко находится из треугольника на диаграмме: линейное в корень из трех раз больше фазного.

Кстати, для трехфазных цепей всегда нормируются именно линейные напряжения, ибо только при введении нейтрали можно будет говорить еще и о напряжении фазном.

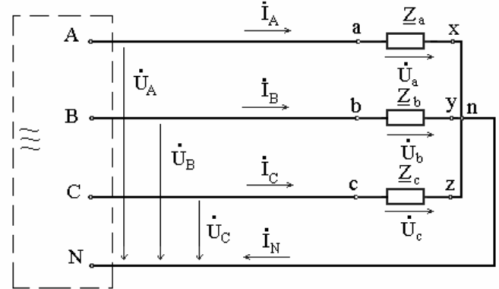


**Расчеты для «звезды»**

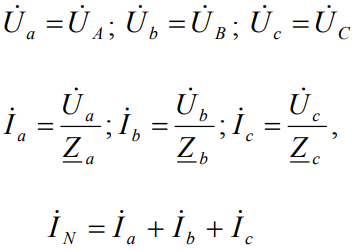
На рисунке ниже изображена схема замещения приемника, фазы которого соединены «звездой», подключенного через провода ЛЭП к симметричному источнику, выводы которого обозначены соответствующими буквами. При расчетах трехфазных цепей решаются задачи по нахождению линейных и фазных токов когда известны сопротивления фаз приемника и напряжения источника.

Токи в линейных проводниках называются линейными токами, их положительное направление — от источника — к приемнику. Токи в фазах приемника — это фазные токи, их положительное направление — от начала фазы — к ее концу, как направление фазных ЭДС.

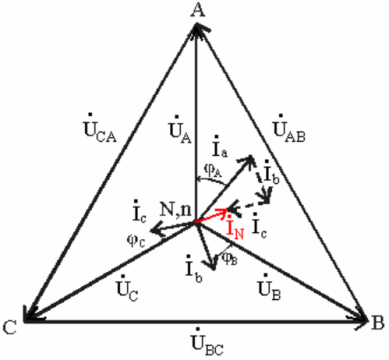
Когда приемник собран по схеме «звезда», имеет место ток и в нейтральном проводнике, его положительным направлением принимается — от приемника — к источнику, как на ниже приведенном рисунке.



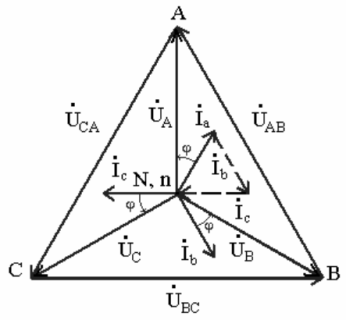
Если рассмотреть для примера несимметричную четырехпроводную цепь нагрузки, то фазные напряжения приемника, при наличии нейтрального проводника, окажутся равны фазным напряжениям источника. Токи в каждой фазе [находятся по закону Ома](https://electricalschool.info/ecalc/1505-raschet-toka-po-zakonu-oma.html). А первый закон Кирхгофа позволит найти величину тока и в нейтрали (в нейтральной точке n на рисунке выше):



Далее рассмотрим векторную диаграмму данной цепи. На ней отражены линейные и фазные напряжения, также построены несимметричные фазные токи, показан цветом и ток в нейтральном проводнике. Ток нейтрального провода построен как сумма векторов фазных токов.

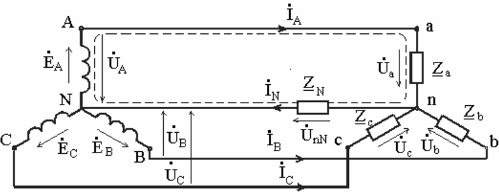


Пусть теперь нагрузка фаз симметрична и имеет активно-индуктивный характер. Построим векторную диаграмму токов и напряжений, приняв в расчет тот факт, что ток отстает от напряжения на угол фи:



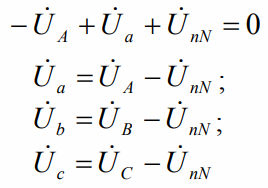
Ток в нейтрально проводе будет равен нулю. Значит при соединении «звездой» симметричного приемника нейтральный провод влияния не оказывает, и может быть в принципе убран. Нет надобности в четырех проводах, достаточно трех.

**Нейтральный провод в цепи трехфазного тока**

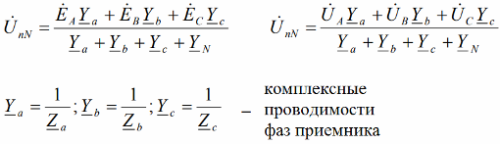


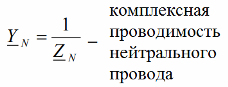
Когда нейтральный проводник имеет достаточно большую длину, он оказывает ощутимое сопротивление прохождению тока. Отразим это на схеме добавив резистор Zn.

Ток в нейтральном проводнике создает падение напряжения на сопротивлении, что приводит к искажению напряжений в фазных сопротивлениях приемника. Второй закон Кирхгофа для цепи фазы А приводит нас к следующему уравнению, и далее — находим по аналогии напряжения фаз В и С:



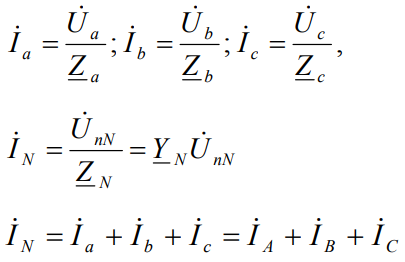
Хотя фазы источника симметричны, фазные напряжения приемника несимметричны. И согласно методу узловых потенциалов напряжение между нейтральными точками источника и приемника будет равно (ЭДС фаз равны фазным напряжениям):





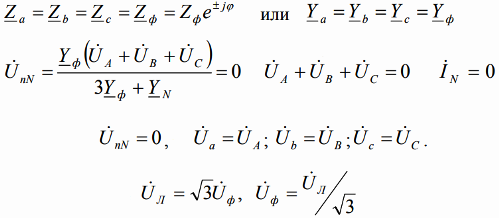
Иногда, когда сопротивление нейтрального провода очень мало, его проводимость можно принять бесконечной, и значит напряжение между нейтральными точками трехфазной цепи считать равным нулю.

Таким образом, симметричные фазные напряжения приемника не искажаются. Ток в каждой фазе и ток в нейтральном проводнике находятся по закону Ома или [по первому закону Кирхгофа](https://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/545-zakony-kirkhgofa.html):

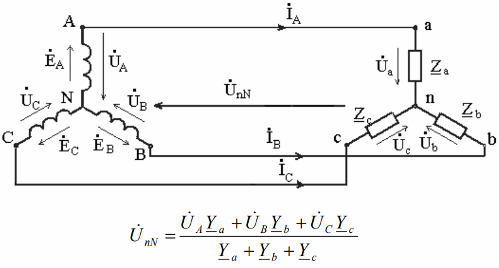


Симметричный приемник имеет одинаковые сопротивления в каждой из своих фаз. Напряжение между нейтральными точками равно нулю, сумма фазных напряжений равна нулю и ток в нейтральном проводнике равен нулю.

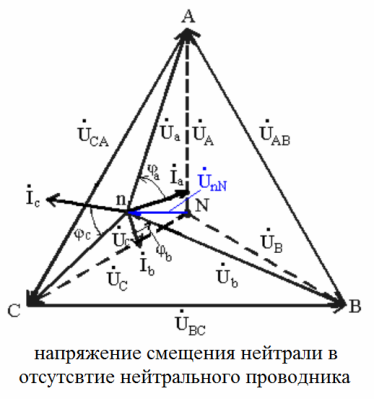
Таким образом для симметричного приемника соединенного «звездой» наличие нейтрали не влияет на его работу. Но соотношение между линейными и фазными напряжениями остаются в силе:



Несимметричный приемник, соединенный по схеме «звезда», в отсутствие нейтрального проводника будет обладать максимальным напряжением смещения нейтрали (проводимость нейтрали нулевая, сопротивление - бесконечность):



Максимальны в этом случае и искажения фазных напряжений приемника. Векторная диаграмма фазных напряжений источника, с построением напряжения нейтрали, отражает данный факт:



Очевидно, при изменении величин или характера сопротивлений приемника, величина напряжения смещения нейтрали варьируется в широчайших пределах, и нейтральная точка приемника на векторной диаграмме может располагаться в самых разных местах. При этом фазные напряжения приемника будут значительно различаться.

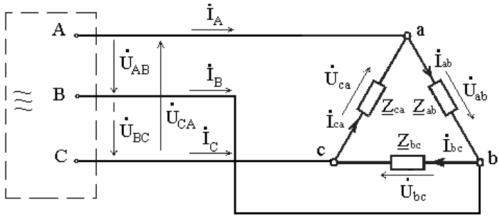
**Вывод:** симметричная нагрузка допускает удаление нейтрального провода без влияния на фазные напряжения у приемника; несимметричная нагрузка при удалении нейтрального проводника сразу ведет к устранению жесткой связи между напряжениями приемника и напряжениями фаз генератора, - на напряжения нагрузки влияют теперь только линейные напряжения генератора.

Несимметричная нагрузка приводит к несимметрии фазных напряжений на ней, и к смещению нейтральной точки дальше от центра треугольника векторной диаграммы.

Нейтральный провод поэтому необходим для выравнивания фазных напряжений приемника в условиях его несимметричности или при подключении к каждой из фаз однофазных приемников, рассчитанных на фазное, а не на линейное напряжение.

По этой же причине нельзя в цепь нейтрального провода устанавливать [предохранитель](https://electricalschool.info/main/osnovy/1563-vidy-predokhranitelejj.html), так как в случае разрыва нейтрального провода на фазных нагрузках возникнет тенденция [к опасным перенапряжениям](https://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1277-perenaprjazhenija-v-jelektricheskikh.html).

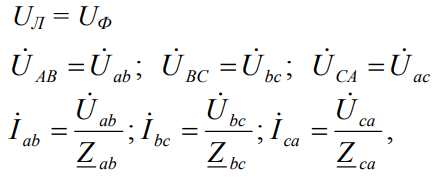
**Расчеты для «треугольника»**



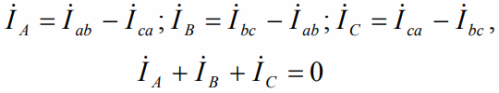
Теперь рассмотрим соединение фаз приемника по схеме «треугольник». На рисунке показаны выводы источника, причем нейтральный провод отсутствует, да и присоединять его здесь некуда. Задача при такой схеме соединения обычно заключается в том, чтобы вычислить фазные и линейные токи при известных напряжении источника и фазных сопротивлениях нагрузки.

Напряжения между линейными проводами — это и есть фазные напряжения при соединении нагрузки «треугольником». Исключая из рассмотрения сопротивления линейных проводов, линейные напряжения источника приравниваем к линейным напряжениям фаз потребителя. Фазные токи замыкаются по комплексным сопротивлениям нагрузки и по проводам.

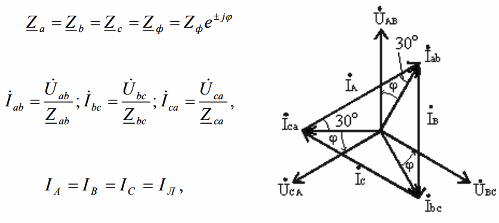
За положительное направление фазного тока принимают направление соответствующее фазным напряжениям, от начала — к концу фазы, а для линейных токов — от источника — к приемнику. Токи в фазах нагрузки находятся по закону Ома:



Особенность «треугольника», в отличие от звезды, в том, что фазные токи здесь не равны линейным. По фазным токам можно вычислить линейные, воспользовавшись первым законом Кирхгофа для узлов (для вершин треугольника). А сложив уравнения, получим, что сумма комплексов токов линейных равна в треугольнике нулю независимо от симметричности или несимметричности нагрузки:

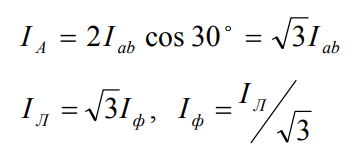


При симметричной нагрузке линейные (равные фазным в данном случае) напряжения создают систему симметричных токов в фазах нагрузки. Фазные токи являются равновеликими, а отличаются лишь фазами на треть периода, то есть на 120 градусов. Линейные токи — тоже равны между собой величинами, отличия лишь в фазах, что и отражено на векторной диаграмме:

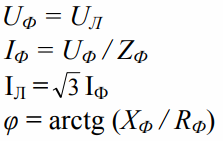


Допустим, что диаграмма построена для симметричной нагрузки индуктивного характера, тогда фазные токи запаздывают по отношению к фазным напряжениям на некоторый угол фи. Линейные токи образованы разностью двух токов фазных (так как соединение нагрузки «треугольник») и при этом симметричны.

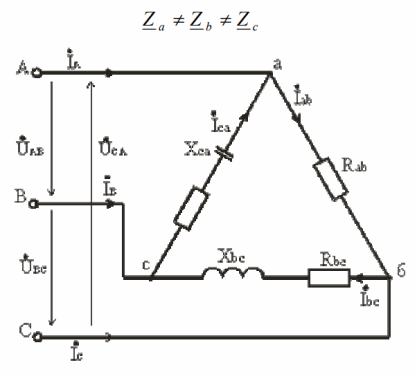
Рассмотрев треугольники на диаграмме, легко видеть, что соотношение между токами фазными и линейными имеет вид:



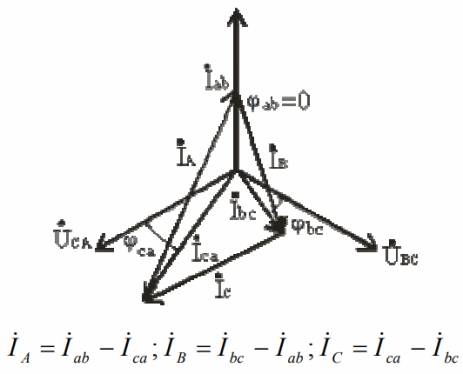
То есть при симметричной нагрузке, соединенной по схеме «треугольник», действующее значение фазного тока в корень из трех раз меньше действующего значения тока линейного. В условиях симметрии для «треугольника» расчет для трех фаз сводится к расчету для единственной фазы. Линейное и фазное напряжения равны между собой, фазный ток находится по закону Ома, линейный ток — в корень из трех раз больше фазного.



Несимметричная нагрузка предполагает различие в комплексных сопротивлениях, что характерно для питания различных однофазных приемников от одной трехфазной сети. Здесь фазные токи, фазные углы, мощности в фазах, - будут различаться.



Пусть в одной фазе имеется чисто активная нагрузка (ab), в другой — активно-индуктивная (bc), в третьей — активно-емкостная (ca). Тогда векторная диаграмма будет иметь вид подобный тому, как на рисунке:



Токи в фазах не симметричны, и для нахождения линейных токов придется прибегать к графическим построениям или к уравнениям для вершин по первому закону Кирхгофа.

Отличительная особенность схемы приемника «треугольник» в том, что при варьировании сопротивления в одной из трех фаз, для оставшихся двух фаз условия не изменятся, поскольку линейные напряжения никак не поменяются. Изменится лишь ток в одной конкретной фазе и токи в передающих проводах, к которым данная нагрузка подключена.

В связи с данной особенностью схема соединения трехфазной нагрузки по схеме «треугольник» востребована обычно для питания несимметричной нагрузки.

В ходе расчета несимметричной нагрузки в схеме «треугольник», первым делом вычисляют фазные токи, затем сдвиги фаз, и только потом находят линейные токи в соответствии с уравнениями по первому закону Кирхгофа или прибегают к векторной диаграмме.

**Мощность в трехфазной цепи**

Для трехфазной цепи, как и для любой цепи переменного тока, характерны полная, активная и реактивная мощности. Так, активная мощность для несимметричной нагрузки равна сумме трех активных составляющих:

Активная мощность в трехфазной цепи

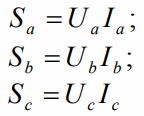
Реактивная мощность — есть сумма реактивных мощностей в каждой из фаз:

Реактивная мощность в трехфазной цепи

Для «треугольника» подставляются фазные величины, как то:

Активная мощность

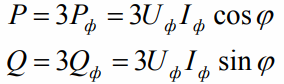
Полная мощность каждой из трех фаз считается так:



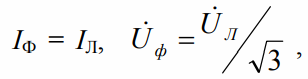
Полная мощность любого трехфазного приемника:

Полная мощность

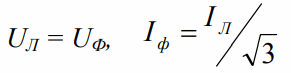
Для симметричного трехфазного приемника:



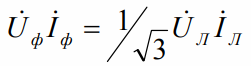
Для симметричного приемника, включенного по схеме «звезда»:



Для симметричного «треугольника»:



Значит и для «звезды», и для «треугольника»:



Мощности активная, реактивная, полная — для любой симметричной схемы приемника:

