

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ СО СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

ПОСОБИЕ

**по курсу «Теоретические основы электротехники»
для студентов электротехнических специальностей
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2008

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.21я73
Т66

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 22.09.2008 г.)*

Составители: *С. А. Грачев, Д. В. Комнатный*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц.
А. В. Сычев

Т66 **Трехфазные** цепи со статической нагрузкой : пособие по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов электротехн. специальностей днев. и заоч. форм обучения / сост.: С. А. Грачев, Д. В. Комнатный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 38 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены трехфазная система напряжений, схемы соединения трехфазных генераторов, основные способы соединения генераторов и нагрузки, расчет активной и реактивной мощности.

Для студентов электротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.21я73

- © Грачев С. А., Комнатный Д. В., составление, 2008
- © Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2008

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные (и в общем случае многофазные) цепи занимают особое место в курсе теоретических основ электротехники. Это объясняется тем, что в настоящее время распределение электрической энергии между большим количеством потребителей осуществляется при помощи трехфазных цепей.

Появление рассматриваемых цепей было вызвано актуальными проблемами инженерной практики, существовавшими в 70-80 годы XIX века.

Первой проблемой была передача электрической энергии на большие расстояния от электростанций к потребителям [1]. В работах Д. А. Лачинова (1840–1902) и Марсея Депре было показано, что для сокращения потерь энергии в линиях электропередач требуется применять высокие напряжения. Но непосредственное использование высокого напряжения в промышленности и в быту привело бы к значительным техническим трудностям. Высокие напряжения также крайне опасны для жизни людей. Следовательно, необходимо повышение напряжения перед подачей в линию и понижение перед использованием. Простые устройства для преобразования переменного напряжения – трансформаторы – были изобретены П. Н. Яблочковым (1847–1894).

Вторая проблема заключается в том, что у имевшихся в ту эпоху однофазных двигателей переменного тока отсутствовал начальный вращающий момент, и их нужно было приводить в движение от постороннего двигателя. Обе эти проблемы затрудняли внедрение электрического привода и электрического освещения.

Для решения второй проблемы ученые-электротехники обратились к явлению взаимодействия вихревых токов, порожденных магнитным полем, с этим же полем.

Впервые движение проводящего тела, вызванное вихревыми токами, продемонстрировал на опыте известный французский ученый Франсуа Доминик Араго. Он показал медный диск, который начинал вращаться, если под ним вращали постоянный подковообразный магнит. Для практического применения этого явления требовалось получить вращающееся магнитное поле от переменного тока. В 1888 г. независимо друг от друга итальянский физик Галилео Феррарис и сербский электротехник Никола Тесла открыли способ получения вращающегося магнитного поля путем подачи в обмотки

электрической машины двух токов, один из которых опережает другой на четверть периода. Затем Никола Тесла описал вращающееся магнитное поле системы трех токов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на $2\pi/3$ радиан. Подробнее с явлением вращающегося магнитного поля читателю рекомендуется ознакомиться самостоятельно по книге [2].

Многофазные системы Тесла требовали выделять отдельную пару проводов для каждого тока и поэтому оказывались неэкономичными. В 1888–1889 годах выдающийся электротехник М. О. Доливо-Добровольский открыл возможность соединить выводы обмоток генератора переменного тока и отказаться от обратных проводов. Тем самым он изобрел современные трехфазные цепи.

Эти электрические цепи имеют несколько практических преимуществ:

- переменное напряжение можно легко повышать для линий передачи и понижать при потреблении;

- с помощью трехфазной системы токов можно получать вращающееся магнитное поле в самопроизвольно приходящих в движение при подаче напряжения асинхронных двигателях[2];

- в магнитных цепях этих двигателей имеется почти равномерное распределение магнитного потока, что улучшает их эксплуатационные характеристики;

- система трехпроводной трехфазной линии экономична, так как сечения проводов могут быть меньшими, нежели у однофазной линии при передаче одной и той же мощности;

- в трехфазной системе можно одновременно использовать два разных по величине напряжения.

Все это и обусловило широкое распространение трехфазных цепей в системах энергоснабжения и электропривода. Поэтому изучение методов расчета трехфазных цепей особенно важно для подготовки инженера-электрика.

В настоящем пособии излагаются основы трехфазных цепей, как наиболее распространенных. Излагаемый материал закрепляется при выполнении расчетно-лабораторных работ. Навыки расчета цепей со сложной нагрузкой приобретаются при выполнении расчетно-графических работ.

1. ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ

Трехфазная система ЭДС получается в трехфазных генераторах. Простейший трехфазный генератор состоит из неподвижной части – статора и подвижной вращающейся части – ротора. На роторе размещена обмотка возбуждения, питаемая постоянным током. На статоре имеются три обмотки, называемые фазными обмотками или фазами. Начала этих обмоток обозначаются буквами A , B , C . Соответственно концы обмоток – буквами X , Y , Z . Когда ротор вращается, в статоре, благодаря конструктивным приемам, наводятся синусоидальные ЭДС. Фазные обмотки изготавливаются одинаковыми, поэтому в них наводятся ЭДС одинаковой амплитуды. Эти обмотки сдвинуты в пространстве друг относительно друга на $2\pi/3$ радиан. Поэтому ЭДС в каждой последующей обмотке отстает от ЭДС в предыдущей обмотке на $2\pi/3$ радиан. Порядок, в котором ЭДС обмоток проходят через одинаковые значения (максимумы) называют порядком следования фаз. В СНГ прямой порядок следования фаз определен ГОСТ: A - B - C .

Начальная фаза ЭДС обмотки A чаще всего принимается равной нулю. Тогда начальная фаза ЭДС обмотки B равна $-2\pi/3$ радиан, а начальная фаза обмотки C составит $-4\pi/3$ радиан. График изменения ЭДС трех обмоток приведен на рисунке 1.1 а). Векторная диаграмма, соответствующая этим графикам – на рисунке 1.1 б).

Из векторной диаграммы следует, что ЭДС обмотки C опережает ЭДС обмотки A на $2\pi/3$ радиан. Положительные направления ЭДС обмоток выбираются от концов обмоток (X , Y , Z) к началам (A , B , C).

Таким образом, для мгновенных значений ЭДС трехфазного генератора справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t & e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

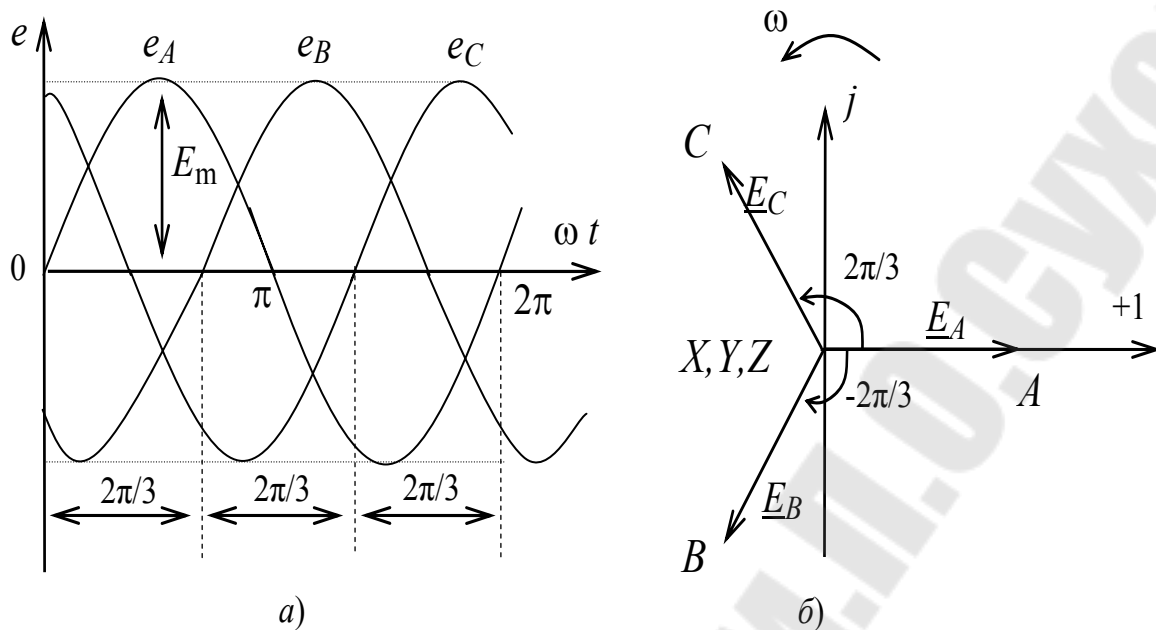


Рис. 1.1. График ЭДС трехфазного генератора (а) и векторная диаграмма (б)

Трехфазная система ЭДС представляется комплексными числами следующим образом

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E e^{j0} = E(1 + j0) = E & \underline{E}_B &= E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \underline{E}_C &= E e^{j\frac{2\pi}{3}} = E \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Описанная система ЭДС называется **симметричной**. В симметричной трехфазной системе ЭДС амплитуды ЭДС равны, а сами ЭДС сдвинуты по отношению друг к другу на $2\pi/3$ радиан. Те трехфазные системы ЭДС, у которых амплитуды не равны или у которых сдвиг фаз не равен $2\pi/3$ радиан, называются **несимметричными**.

В электротехнике отдельная обмотка генератора трехфазной ЭДС и участок электрической цепи, соединенный с этой обмоткой, называется **фазой**. Этот термин следует отличать от аргумента синусоидальной функции, который также называют фазой.

1.1 Соединение обмоток трехфазного генератора звездой

При соединении обмоток трехфазного генератора **звездой** одноименные зажимы обмоток объединяют в общий узел. В подавляющем большинстве случаев объединяются концы обмоток (X, Y, Z). Общий узел называют **нейтральной точкой** генератора и обозначают N . Нейтральная точка может быть заземлена, поэтому при расчетах ее потенциал принимают равным нулю. От начал обмоток A, B, C к приемнику электрической энергии прокладываются **линейные провода**. От нейтральной точки может быть выведен провод, называемый **нейтральным**.

Сопротивлениями обмоток генератора обычно можно пренебречь, поскольку эти сопротивления незначительны. Поэтому напряжения обмоток практически равны ЭДС. Положительные направления напряжений на фазах генератора противоположны положительным направлениям ЭДС, то есть, приняты от начал фаз к их концам (рис. 1.2). Напряжения между началами и концами фаз генератора называются **фазными напряжениями генератора** и определяются по формулам:

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0} ; \underline{U}_B = U_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}} ; \underline{U}_C = U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}} . \quad (3)$$

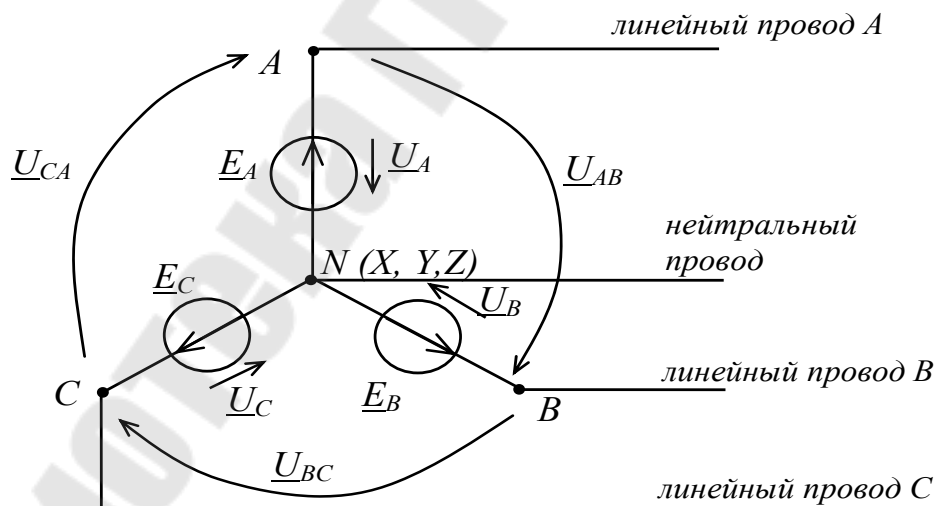


Рис. 1.2. Соединение фаз генератора звездой

Напряжения между началами фаз или между линейными проводами, называются **линейными напряжениями** (рис. 1.2). Их можно найти по второму закону Кирхгофа.

Так для напряжения \underline{U}_{AB} имеем

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_B - \underline{U}_A = 0 \quad \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B \quad (4)$$

Аналогично получаем

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C \quad \underline{U}_{AC} = \underline{U}_C - \underline{U}_A \quad (5)$$

Чтобы найти амплитуды и начальные фазы линейных напряжений, рассмотрим векторную диаграмму на рис. 1.3.

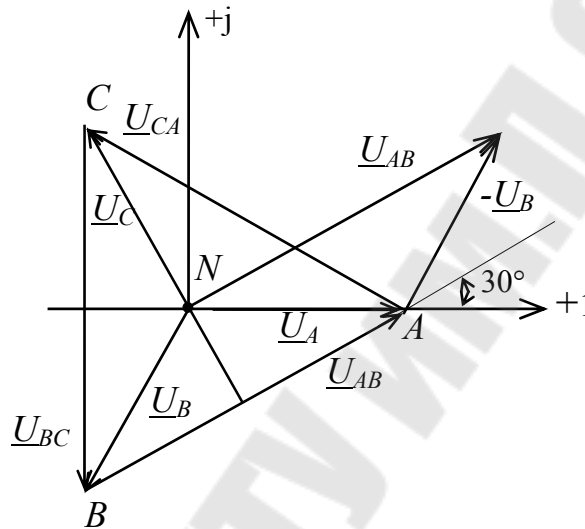


Рис. 1.3. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении фаз звездой

По формулам (4) и (5) векторы линейных напряжений можно построить как разность векторов фазных напряжений по правилу треугольника. Так как фазные напряжения равны по модулю, то и модули векторов линейных напряжений равны между собой. Тогда треугольник ABC – равносторонний и углы его равны 60° . Треугольники ANB , BNC и CNA равны по равенству их сторон. Следовательно, равны и их углы, в частности $\angle NBA = \angle CBN = 30^\circ$. Восставим перпендикуляр к стороне AB из точки N . Из $\triangle ANB$ $|\vec{U}_{AB}| = 2U_B \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi$. Итак, модуль вектора U_{AB} равен $\sqrt{3}U_\phi$, а начальная фаза составляет 30° , или $\pi/6$ радиан.

Рассуждая аналогичным образом, можно показать, что в комплексной форме линейные напряжения записываются в виде

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{j\frac{\pi}{6}}; \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{-j\frac{\pi}{2}}; \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3}U_{\phi}e^{j\frac{5\pi}{6}}. \quad (6)$$

Из рис. 1.3. следует, что на векторной диаграмме линейные напряжения образуют замкнутый треугольник и их сумма равна нулю.

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$$

Соединение фаз генератора звездой наиболее часто применяется на практике, чтобы использовать как фазное, так и линейное напряжение одновременно.

1.2 Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником

В некоторых случаях обмотки трехфазного генератора соединяются треугольником. При этом конец обмотки X соединяется с началом обмотки B , конец Y – с началом C , а конец Z – с началом A по кольцу (рис. 1.4).

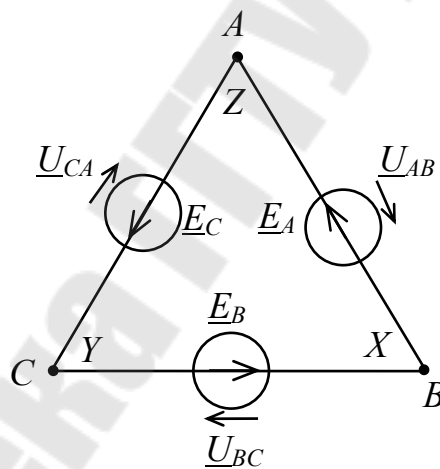


Рис. 1.4. Соединение обмоток генератора треугольником

В контуре, образованном обмотками, по второму закону Кирхгофа

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = E_m \left(1 + \left(-\frac{1}{2} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} + \left(-\frac{1}{2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0. \quad (7)$$

Сумма ЭДС, действующая в контуре, равна нулю, поэтому при отсутствии нагрузки в обмотках генератора, соединенных

треугольником, ток не протекает. При малом сопротивлении обмоток, возникновение, при отсутствии нагрузки, тока в контуре на рис. 1.4. привело бы к короткому замыканию. Выражение (7) справедливо только для симметричной системы ЭДС генератора. Следовательно, соединять треугольником можно только обмотки трехфазного генератора с симметричной системой ЭДС.

Из рис. 1.4. следует, что фазные напряжения генератора при соединении его обмоток треугольником определяются по формулам (3), а линейные и фазные напряжения равны:

$$\underline{U}_л = \underline{U}_ф.$$

Векторная диаграмма для рассматриваемого соединения обмоток должна отражать равенство нулю суммы ЭДС генератора в контуре, образованном его обмотками. Кроме этого, из диаграммы видно, что линейные напряжения равны фазным напряжениям генератора. При построении векторной диаграммы начало вектора \underline{U}_C перенесено к концу вектора \underline{U}_A , и начало вектора \underline{U}_B – к началу вектора \underline{U}_C , так чтобы эти векторы образовали замкнутый треугольник (рис. 1.5).

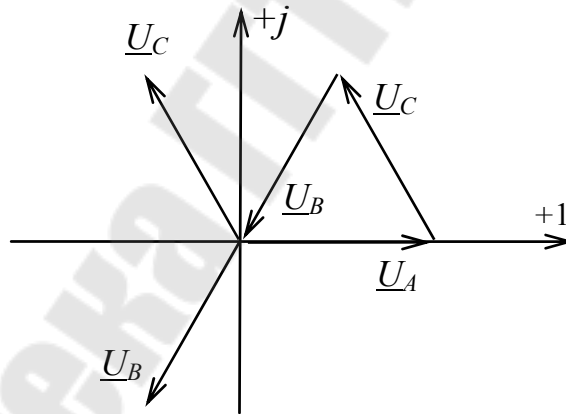


Рис. 1.5. Векторная диаграмма при соединении фаз генератора в треугольник

Рассмотрим, какие будут последствия неправильного соединения фаз генератора в треугольник [3].

Пусть соединены концы фаз A и B и начала фаз B и C (рис. 1.6).

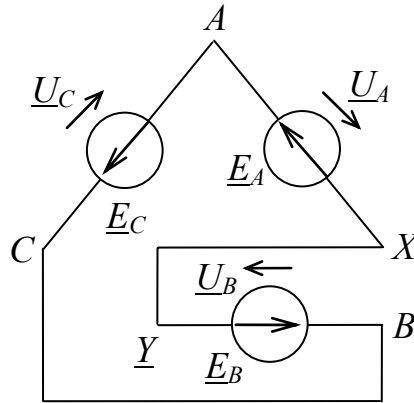


Рис. 1.6. Неправильное соединение фаз генератора треугольником

Найдем суммарное напряжение в контуре $AXUCBA$. Оно рассчитывается по соотношению $\underline{U}_A - \underline{U}_B + \underline{U}_C$. Действия с векторами выполним геометрически, как показано на рис. 1.7.

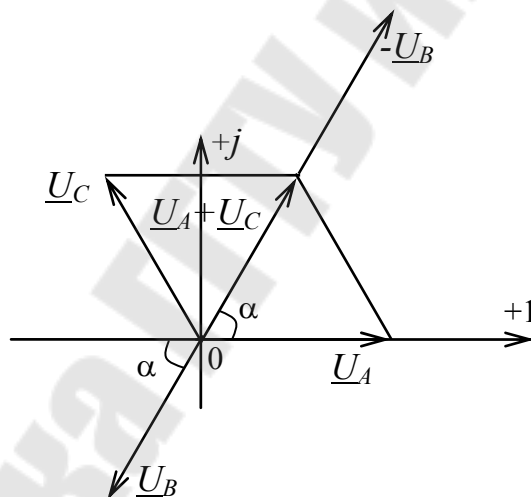


Рис. 1.7. Векторная диаграмма при неправильном соединении фаз генератора в треугольник

В начале построения сложим \underline{U}_A и \underline{U}_C по правилу параллелограмма. Так как модули векторов \underline{U}_A и \underline{U}_C равны, то построенный на этих векторах параллелограмм – ромб. Вектор-сумма \underline{U}_A и \underline{U}_C – диагональ ромба, и поэтому угол между этим вектором и действительной осью равен $\pi/3$. С другой стороны угол между отрицательной действительной полуосью и вектором \underline{U}_B равен $\pi/3$ радиан. Поэтому векторы \underline{U}_B и $\underline{U}_A + \underline{U}_C$ лежат на одной прямой.

Чтобы из $\underline{U}_A + \underline{U}_C$ вычесть \underline{U}_B на продолжении вектора $\underline{U}_A + \underline{U}_C$ строится вектор $-\underline{U}_B$. Из построения видно, что сумма напряжений в контуре $AXYBCA$ не равна нулю. Выше уже отмечалось, что при малом сопротивлении обмоток, наличие ненулевого суммарного напряжения в контуре из соединенных треугольником обмоток генератора, приводит к короткому замыканию.

1.3. Соединение обмоток трехфазного источника питания в зигзаг-звезду и двойной зигзаг

В системах энергоснабжения трехфазное напряжение преобразуются при помощи **трехфазных трансформаторов**. Для более равномерного распределения нагрузки по фазам трансформатора и для улучшения его работы применяется соединение обмоток в **зигзаг-звезду**.

Для осуществления такого соединения обмотки каждой фазы составляются из двух частей (полуобмоток). Эти части соединяются так, как показано на рисунке 1.8. Выводы полуобмоток a_1, b_1, c_1 используются для подключения линейных проводов. Выводы a_2, b_2, c_2 объединяются и образуют нейтральную точку.

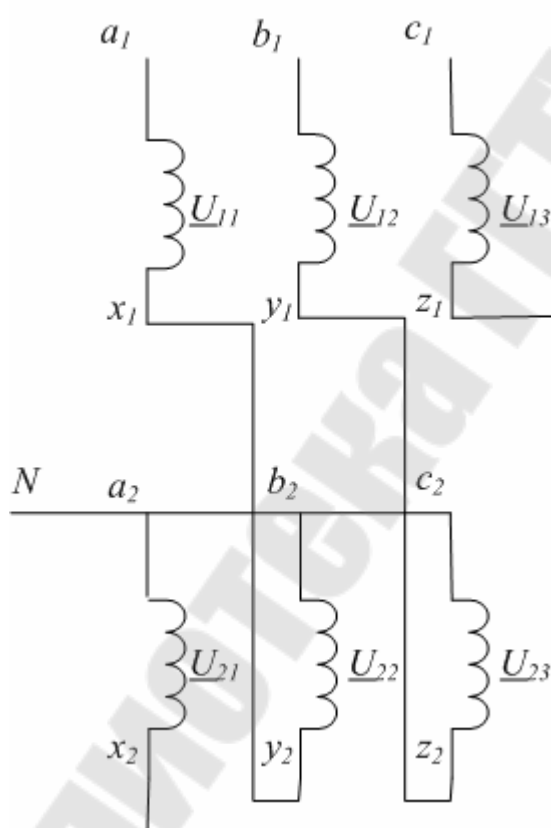


Рис. 1.8 Соединение зигзаг-звезда

Векторная диаграмма соединения зигзаг-звезда строится путем суммирования фазных напряжений отдельных полуобмоток по схеме их соединения (рис. 1.9). При этом векторы фазных напряжений первых полуобмоток строятся так, как при соединении их концов x_1, y_1, z_1 в звезду. Векторы фазных напряжений вторых полуобмоток строятся при соединении их начал a_2, b_2, c_2 , как показано на рис. 1.8.

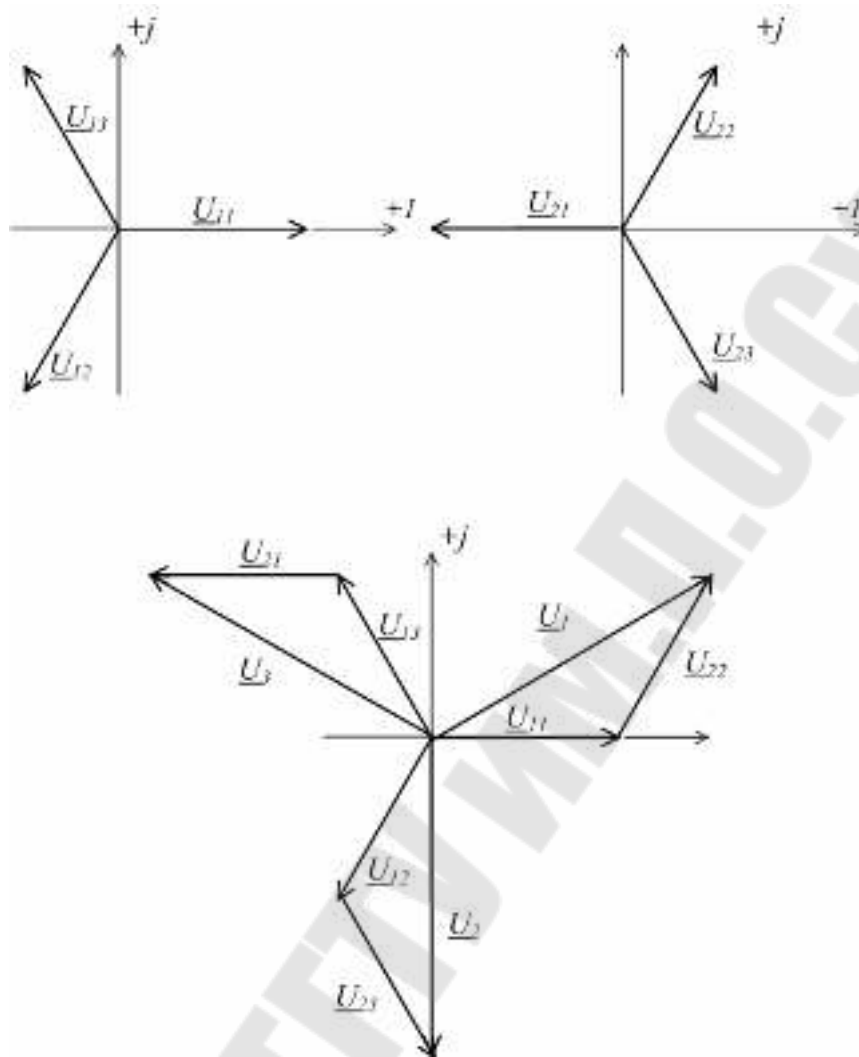


Рис 1.9. Векторная диаграмма соединения зигзаг-звезда

Для преобразования переменного трехфазного напряжения в постоянное применяются выпрямительные схемы, которые подключаются к вторичной обмотке трехфазного трансформатора. Для улучшения работы трансформатора на выпрямительную схему применяется соединение **двойной зигзаг**, при котором обмотки фаз состояются из трех частей каждая [4]. Этот специальный вопрос изучается в курсе преобразовательной техники

2. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА И НАГРУЗКИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Трехфазные приемники электрической энергии соединяются звездой или треугольником в целях экономии линейных проводов. В предыдущем разделе указывалось, что участок трехфазной цепи, соединенный с отдельной обмоткой генератора называется **фазой**. Напряжение на этом участке нагрузки называется **фазным напряжением нагрузки**, а ток в этом участке – **фазным током**.

Целью расчетов трехфазной цепи является определение токов, протекающих в фазах нагрузки, линейных проводах и в нейтральном проводе, при его наличии.

Имеется четыре основных способа соединения обмоток генератора и фаз нагрузки трехфазной цепи [2]. Рассмотрим их последовательно.

2.1. Соединение «звезда-звезда»

В этом случае обмотки генератора и фазы нагрузки соединены звездой. Общая (нейтральная) точка фаз приемника обозначается n , точка присоединения к нагрузке линейного провода фазы генератора A обозначается буквой a , точка присоединения линейного провода фазы генератора B обозначается b , а точка присоединения провода фазы C – буквой c .

Как правило, при расчете трехфазных цепей сопротивлением линейных проводов пренебрегают.

Прежде всего, рассмотрим наиболее общий случай, когда нейтральные точки генератора и приемника соединены нейтральным проводом, имеющим сопротивление Z_n .

Схема этой цепи приведена на рис. 2.1. Токи в линейных проводах принимаются направленными к фазам нагрузки, а ток в нейтральном проводе – направленными к нейтральной точке генератора.

Для расчета фазных токов нагрузки и тока в нейтральном проводе в данной схеме удобно применить метод узловых потенциалов. Согласно этому методу вначале вычисляется напряжение между точками N и n . Это напряжение называется **напряжением смещения нейтрали**. Его находим по формуле

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} \quad (8)$$

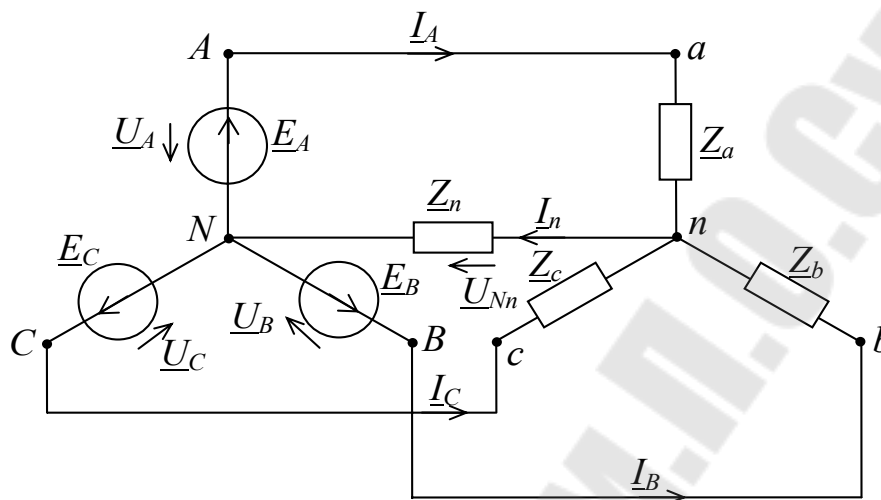


Рис. 2.1. Соединение “звезда-звезда”

Фазные напряжения нагрузки определяются по второму закону Кирхгофа

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} \quad (9)$$

Тогда фазные токи нагрузки можно вычислить по закону Ома

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} \quad (10)$$

В случае идеального приемника, который имеется в исследуемой схеме, линейные токи равны соответствующим фазным токам нагрузки.

Ток в нейтральном проводе можно определить, составив уравнение первого закона Кирхгофа для втекающих и вытекающих из узла n токов

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c; \quad (11)$$

или по закону Ома

$$\underline{I}_n = \frac{\underline{U}_{Nn}}{\underline{Z}_N}. \quad (12)$$

Линейные напряжения определяются по формулам (4) – (6).

В частном случае нейтральный провод может отсутствовать. Тогда расчет производится в том же порядке по формулам (8) – (10), но в формуле (8) проводимость нейтрального провода \underline{Y}_n равна нулю.

Далее рассмотрим некоторые частные случаи соединения «звезда-звезда».

2.1.1 Соединение «звезда-звезда» с нейтральным проводом пренебрежимо малого сопротивления

Схема трехфазной цепи в этом случае имеет вид, показанный на рис. 2.2.

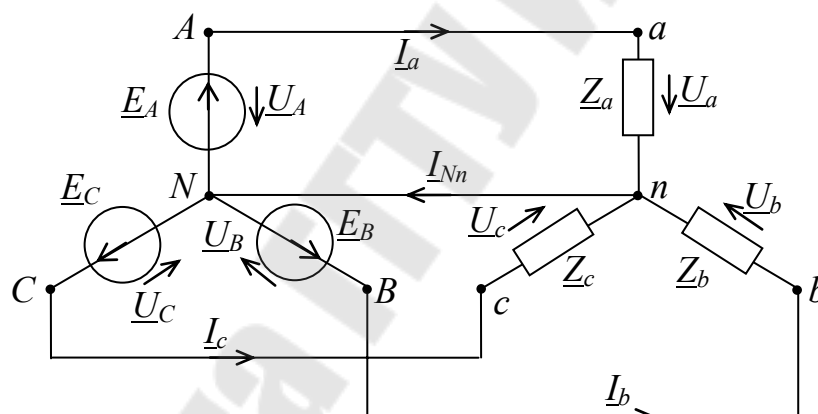


Рис. 2.2. Соединение «звезда-звезда с нейтральным проводом»

Фазные напряжения приемника в этом случае равны фазным напряжениям генератора

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \quad (13)$$

Из (13) следует, что режим работы каждой фазы не зависит от режима двух других фаз. Поэтому фазный ток каждого луча звезды определяется параметрами этого луча. Фазные токи можно вычислить по закону Ома.

$$\underline{I}_a = \frac{U_a}{\underline{Z}_a} \quad \underline{I}_b = \frac{U_b}{\underline{Z}_b} \quad \underline{I}_c = \frac{U_c}{\underline{Z}_c} \quad (14)$$

Ток в нейтральном проводе вычисляется по (11).

2.1.2 Соединение «звезда-звезда» с симметричной нагрузкой

Если комплексные сопротивления всех трех фаз приемника равны, то такая нагрузка называется симметричной.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z_\phi e^{j\varphi_\phi}$$

Рассмотрим случай симметричной нагрузки в схеме «звезда-звезда» с нейтральным проводом бесконечно малого сопротивления. В этом случае из (14) следует

$$\underline{I}_a = \frac{U_\phi e^{j0}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} \quad \underline{I}_b = \frac{U_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} \quad \underline{I}_c = \frac{U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} \quad (15)$$

Из (15) можно заключить, что действующие значения фазных токов нагрузки имеют во всех фазах одинаковые значения. Фазные токи нагрузки сдвинуты относительно фазных напряжений на один и тот же угол φ_ϕ . Это позволяет рассчитывать ток только в одной фазе цепи. Векторы фазных токов нагрузки образуют симметричную систему векторов.

Вычислим ток нейтрального провода для данного случая по формуле (11)

$$\underline{I}_n = \frac{U_\phi e^{j0}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} + \frac{U_\phi e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} + \frac{U_\phi e^{j\frac{2\pi}{3}}}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} = \frac{U_\phi}{Z_\phi e^{j\varphi_\phi}} \left(e^1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \right) = 0.$$

При симметричной нагрузке в схеме «звезда-звезда» ток в нейтральном проводе отсутствует и необходимость в нейтральном проводе отпадает.

Пример 2.1

В схеме на рис. 2.1 фазные напряжения генератора $U_\phi = 127$ В. Сопротивления фаз приемника $R_a = 10$ Ом, $R_b = 5$ Ом, $X_b = 8,66$ Ом, $X_c = -j10$ Ом. Нейтральный провод отсутствует. Найти фазные токи нагрузки [5].

Решение

Фазные напряжения генератора равны

$$\underline{U}_a = 127e^{j0} \quad \underline{U}_b = 127e^{-j120^\circ} \quad \underline{U}_c = 127e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

Комплексные сопротивления фаз приемника

$$\underline{Z}_a = R_a = 10 \text{ Ом} \quad \underline{Z}_b = R_b + jX_b = 5 + j8.66 = 10e^{j60^\circ} \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_c = -jX_c = -j10 = 10e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

Проводимости фаз приемника

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = 0,1 \text{ См} \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{10 e^{j60^\circ}} = 0,1e^{-j60^\circ} \text{ См}$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{-j10} = 0,1e^{j90^\circ} \text{ См}$$

Напряжение смещения нейтрали определяется по формуле (8) с учетом $\underline{Y}_n = 0$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Nn} &= \frac{127e^{j0} \cdot 0,1 + 127e^{-j120^\circ} \cdot 0,1e^{-j60^\circ} + 127e^{j120^\circ} \cdot 0,1e^{j90^\circ}}{0,1 + 0,1e^{-j60^\circ} + 0,1e^{j90^\circ}} = \\ &= 76 - j35,5 \text{ В} \end{aligned}$$

Фазные напряжения приемника по (9)

$$\underline{U}_a = 127 - (-76 - j35,5) = 203 + j35,5 = 206e^{j10^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = -63,5 - j110 - (-76 - j35,5) = 12,5 - j74,5 = 75,5e^{-j80,5^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = -63,5 + j110 - (-76 - j35,5) = 12,5 + j145,5 = 145,6e^{i85^\circ} \text{ В}$$

Фазные токи приемника, равные линейным токам, находятся по формулам (10)

$$\underline{I}_a = \frac{206e^{10^\circ}}{10} = 20,6e^{10^\circ} \text{ А} \quad \underline{I}_b = \frac{75,5e^{-j80,5^\circ}}{10e^{j60^\circ}} = 7,55e^{-j140,5^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_c = \frac{145,6e^{i85^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 14,6e^{j175^\circ} \text{ А}$$

Векторная диаграмма для рассмотренного примера приведена на рис. 2.3.

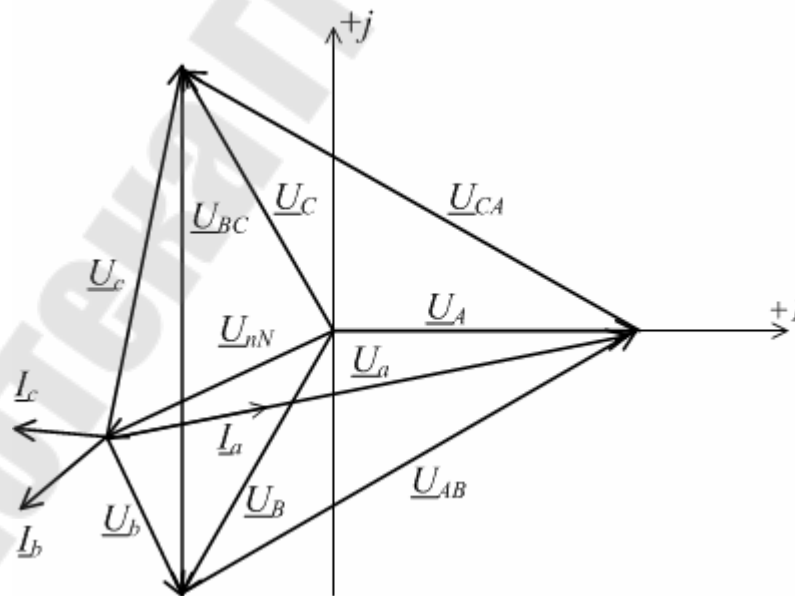


Рис 2.3. Векторная диаграмма к примеру 2.1.

При ее построении вначале строятся векторы фазных напряжений генератора. Затем – вектор напряжения смещения нейтрали \underline{U}_{Nn} . Путем вычитания вектора смещения нейтрали из векторов фазных напряжений генератора по формулам (9) строятся фазные напряжения нагрузки. Векторы фазных токов нагрузки строятся с учетом углов сдвига фаз относительно фазных напряжений нагрузки.

2.2 Соединение «треугольник-треугольник»

В этом случае обмотки генератора и фазы нагрузки соединяются треугольником так, как показано на рис. 2.4. При этом соединении направления линейных токов выбираются от зажимов генератора к точке соединения фаз нагрузки. Фазные токи нагрузки принято направлять так, как показано на рис. 2.4.

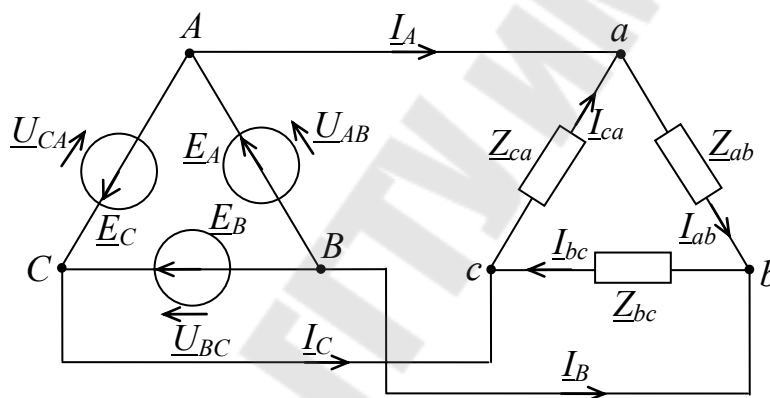


Рис. 2.4. Соединение трехфазной цепи по схеме «треугольник-треугольник»

Фазные напряжения приемника в рассматриваемой цепи равны фазным напряжениям генератора и линейным напряжениям.

Фазные токи нагрузки можно вычислить по закону Ома

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} \quad (16)$$

Линейные токи можно найти, записав выражения первого закона Кирхгофа для узлов a , b , c . Например, для узла a

$$\underline{I}_A + \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{ab} = 0 \quad \underline{I}_A = \underline{I}_{ba} - \underline{I}_{ca} \quad (17)$$

Аналогично для двух остальных линейных токов получим

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} \quad (18)$$

Рассмотрим частный случай симметричной нагрузки в фазах треугольника. Тогда фазные токи нагрузки имеют одинаковое действующее значение и сдвинуты относительно фазных напряжений на один и тот же угол. Рассмотрим векторную диаграмму для этого случая, приведенную на рис. 2.5. При построении диаграммы принято, что нагрузка каждой фазы имеет активно-индуктивный характер. Для наглядности, векторы фазных напряжений построены из точки нулевого потенциала, а линейные токи – путем геометрического вычитания векторов фазных токов нагрузки.

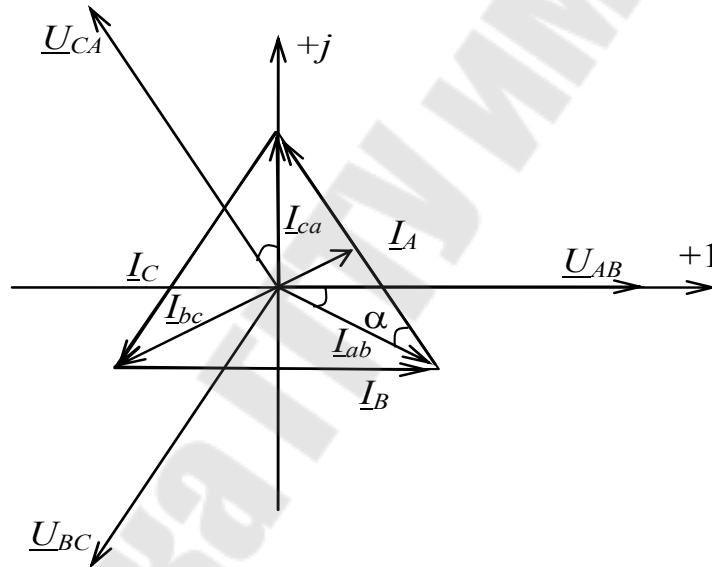


Рис. 2.5 Векторная диаграмма цепи треугольник-треугольник при симметричной нагрузке

Из (17) и (18) следует, что модули векторов линейных токов в случае симметричной нагрузки равны. Треугольник, образованный векторами линейных токов, является равносторонним. Его углы равны 60° . Угол α равен 30° , так как все треугольники, образованные парой фазных токов и линейным током равны по признаку равенства сторон. Восставив перпендикуляр к вектору \underline{I}_A из точки O, получаем

из рассмотрения треугольников, образованных векторами \underline{I}_{ca} , \underline{I}_{ab} и \underline{I}_A

$$I_{л} = 2I_{\phi} \cos 30^{\circ} = \sqrt{3}I_{\phi} \quad (19)$$

Пример 2.2

В схеме на рис. 2.4. $U_{\phi} = 220$ В. Сопротивления приемника $\underline{Z}_{ab} = 3 + j4$ Ом, $\underline{Z}_{bc} = 10$ Ом, $\underline{Z}_{ca} = 8 + j6$ Ом. Определить токи в нагрузке и в линейных проводах [3].

Решение

Фазные напряжения приемника равны фазным напряжениям генератора, поэтому

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= 220e^{j0} = 220; & \underline{U}_{bc} &= 220e^{-j120^{\circ}} = -110 - j190 \text{ В}; \\ \underline{U}_{ca} &= 220e^{j120^{\circ}} \text{ В} \end{aligned}$$

Фазные токи приемника по (16)

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{220}{3 + j4} = 26,4 - j35,2 \text{ А} \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{-110 - j190}{10} = -11 - j19 \text{ А}, \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{220e^{j120^{\circ}}}{8 + j6} = 2,6 + j21,8 \text{ А} \end{aligned}$$

Линейные токи находим по (17) и (18)

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= 26,4 - j35,2 - 2,6 - j21,8 = 23,8 - j75 \text{ А} \\ \underline{I}_B &= -11 - j19 - 26,4 + j35,2 = -37,4 + j16,2 \text{ А} \\ \underline{I}_C &= 26 + j21,8 + 11 + j19 = 37,6 + j40,8 \text{ А} \end{aligned}$$

Векторная диаграмма к примеру 2.2. приведена на рис. 2.6. Для ее построения берется диаграмма напряжений генератора по рис. 1.7. Векторы фазных токов нагрузки строятся с учетом углов сдвига фаз относительно фазных напряжений генератора. Векторы линейных токов строятся в соответствии с (17) и (18). Так как проще складывать векторы, то при построениях вектор-вычитаемое переносят к концу вектора-уменьшаемого и изменяют направление вычитаемого на противоположное. Полученный вектор складывается с вектором-уменьшаемым по правилу треугольника.

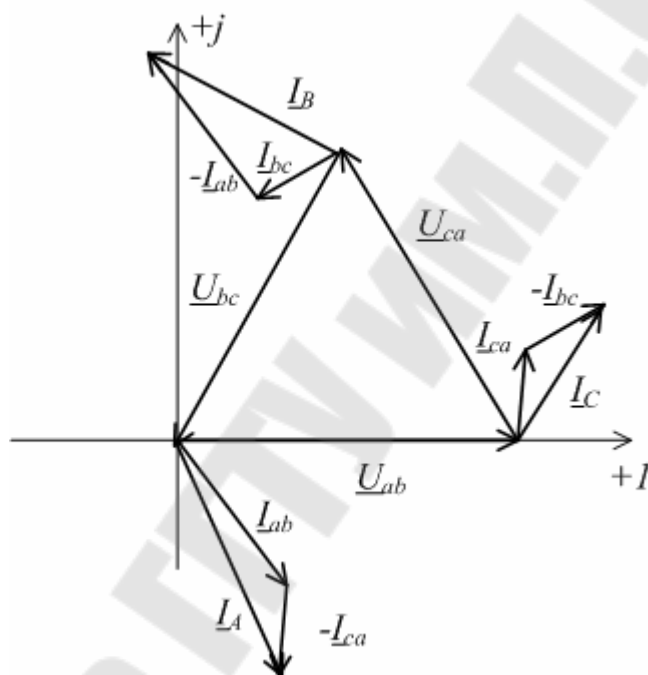


Рис 2.6 Векторная диаграмма к примеру 2.2.

2.3. Соединение «звезда-треугольник»

В этом случае трехфазный генератор соединяется звездой, а фазы приемника – треугольником. Соответствующая схема показана на рис. 2.7.

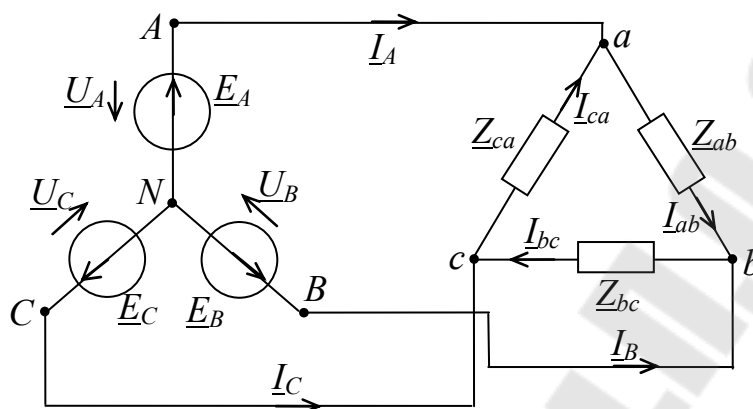


Рис. 2.7. Соединение «звезда-треугольник»

Из рис. 2.7 следует, что в этом случае фазные напряжения нагрузки равны линейным напряжениям, которые определяются по формулам (6).

Фазные токи нагрузки вычисляются по закону Ома (16), а линейные токи находят по (17) – (18).

Пример 2.3

В схеме на рис. 2.7 $U_\phi = 220$ В. $Z_{ab} = 10$ Ом; $Z_{bc} = j10$ Ом; $Z_{ac} = -j10$ Ом. Определить токи в фазах приемника и в линейных проводах [5].

Решение

Фазные напряжения приемника равны линейным напряжениям

$$\underline{U}_{ab} = 380e^{j30^\circ} \text{ В} \quad \underline{U}_{bc} = 380e^{-j90^\circ} \text{ В} \quad \underline{U}_{ac} = 380e^{j150^\circ} \text{ В}$$

Фазные токи приемника находятся по (16)

$$\underline{I}_{ab} = \frac{380e^{j30^\circ}}{10} = 38e^{j30^\circ} \text{ А} \quad \underline{I}_{bc} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{10e^{j90^\circ}} = 38e^{j180^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{380e^{j150^\circ}}{10e^{-j90^\circ}} = 38e^{j240^\circ} \text{ А}$$

Линейные токи вычисляются по формулам (17) и (18)

$$\underline{I}_A = 38e^{j30^\circ} - 38e^{j240^\circ} = 73,4e^{j45^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_B = 38e^{j180^\circ} - 38e^{j30^\circ} = 73,4e^{j195^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_C = 38e^{j240^\circ} - 38e^{j180^\circ} = 38e^{j60^\circ} \text{ А.}$$

По данным расчета построена векторная диаграмма (рис 2.8). Так как фазные напряжения нагрузки равны линейным напряжениям, то векторы фазных токов нагрузки строятся с учетом углов сдвига фаз относительно соответствующих линейных напряжений. Векторы линейных токов построены так же, как и для соединения «треугольник – треугольник»

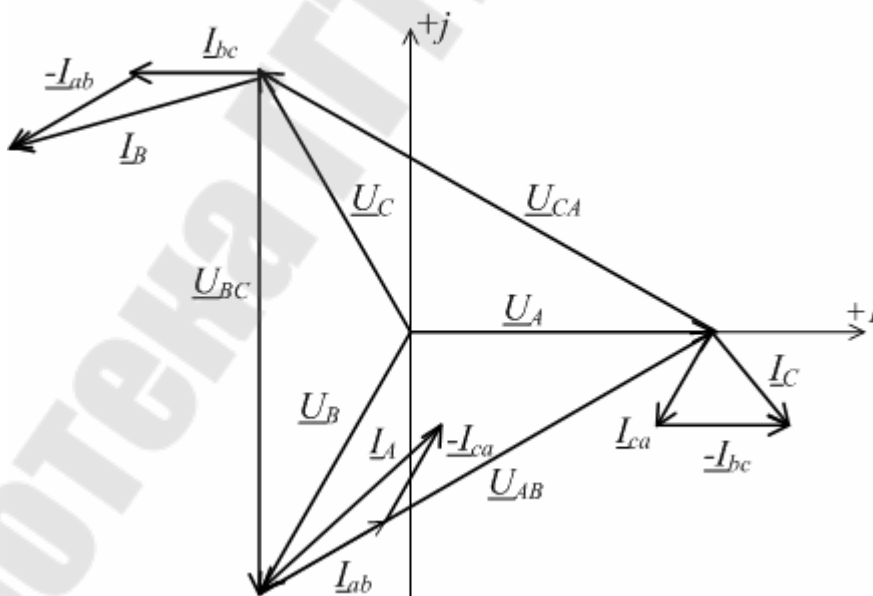


Рис. 2.8. Векторная диаграмма к примеру 2.3.

2.4 Соединение «треугольник-звезда»

При соединении «треугольник-звезда» (рис. 2.9) фазы генератора соединяются в треугольник, а фазы нагрузки в звезду.

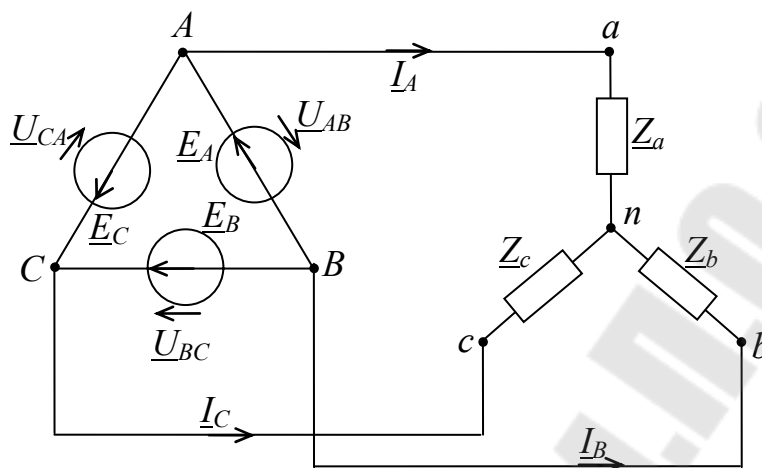


Рис. 2.9. Соединение трехфазного генератора и приемника по схеме «треугольник-звезда»

В этом случае удобно преобразовать звезду нагрузки в эквивалентный треугольник. После этого можно рассчитать схему «треугольник-треугольник», и вычислить линейные токи. При обратном преобразовании нагрузки в звезду, токи, подведенные к узлам a , b , c , не изменяются. А так как при соединении звездой линейные токи равны фазным токам нагрузки, то расчет схемы оказывается выполнен.

Рассмотрим расчет тока фазы « a » нагрузки. Из (17) следует, что

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = \underline{Y}_{ab} \underline{U}_{ab} - \underline{Y}_{ac} \underline{U}_{ca}$$

Проводимости фаз треугольника « ab » и « ca » определяются по известной формуле преобразования треугольника в эквивалентную звезду [6]

$$\underline{Y}_{ab} = \frac{\underline{Y}_a \underline{Y}_b}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

$$\underline{Y}_{ca} = \frac{\underline{Y}_c \underline{Y}_a}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

Тогда подстановка значений проводимости в формулу для тока даст

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{Y}_a (\underline{Y}_b \underline{U}_{ab} - \underline{Y}_c \underline{U}_{ca})}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} \quad (20)$$

Читателю рекомендуется самостоятельно вывести формулы для оставшихся фазных токов нагрузки.

3. АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

При эксплуатации трехфазных цепей возможны обрывы фазных и линейных проводов и короткие замыкания фаз. Необходимо провести исследование цепей с этими повреждениями для выявления их последствий. Из рассмотренных выше способов соединения генератора и приемника основными являются соединения «звезда-звезда» и «треугольник-треугольник». Поэтому рассмотрим различные режимы при этих соединениях.

3.1. Режимы при соединении «звезда-звезда»

3.1.1 Обрыв линейного провода

Схема цепи приведена на рис. 3.1.

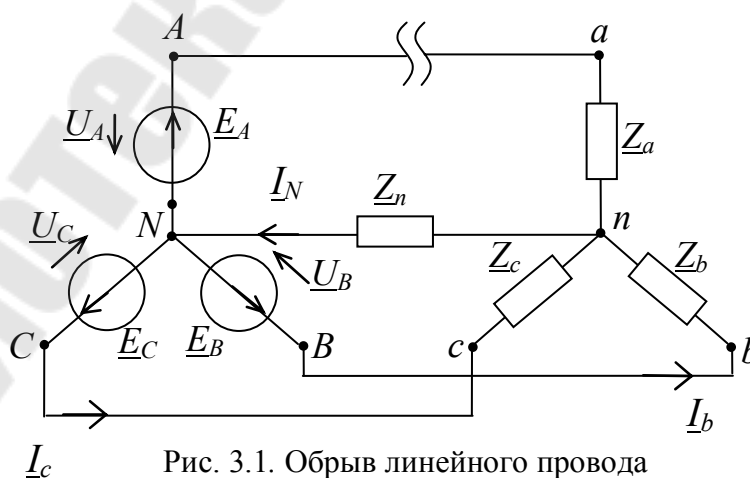


Рис. 3.1. Обрыв линейного провода при соединении «звезда-звезда»

В этом случае напряжение смещения нейтрали определяется с учетом того, что проводимость поврежденной фазы равна нулю. По формуле (8) для схемы на рис. 3.1. имеем

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} \quad (21)$$

Фазные напряжения в фазах нагрузки “b” и “c” определяем по формулам (9). Фазные токи неповрежденных фаз находят по закону Ома (10), а ток нейтрального провода по формуле (11).

$$\underline{I}_N = \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad (22)$$

В частном случае, когда нейтральный провод имеет пренебрежимо малое сопротивление, из (13) и (14) следует, что режимы работы неповрежденных фаз не меняются, поскольку в данном случае режимы отдельных фаз не зависят друг от друга.

Пример 3.1.

В схеме на рис. 3.1 $U_\phi = 380$ В. Сопротивления фаз “b” и “c” приемника $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = 8 - j6$ Ом. Нейтральный провод отключен, произошел обрыв фазы “a”. Требуется определить токи в неповрежденных фазах [5].

Решение

По формуле (21)

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{\underline{Y}_\phi (\underline{U}_B + \underline{U}_C)}{2 \underline{Y}_\phi} = \frac{-\underline{U}_A}{2} = \frac{-380}{2} = -190 \text{ В,}$$

поскольку фазные проводимости равны $\underline{Y}_b = \underline{Y}_c$.

Фазные напряжения приемника по (9)

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} = 380 - (-190) = 570 \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = 380 e^{-j120^\circ} - (-190) = 330 e^{-j90^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = 380e^{j120^\circ} - (-190) = 330e^{j90^\circ} \text{ В}$$

Фазные токи приемника по закону Ома (10)

$\underline{I}_a = 0$ по условию;

$$\underline{I}_b = \frac{330e^{-j90^\circ}}{10e^{-j36,86^\circ}} = 33e^{-j53,13^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_c = \frac{330e^{j90^\circ}}{10e^{-j36,86^\circ}} = 33e^{j126,087^\circ} \text{ А}$$

Векторная диаграмма для данного случая показана на рис 3.2. Она строится аналогично рис. 2.3. За исключением того, что фазное напряжение поврежденной фазы нагрузки и ток в ней не изображается.

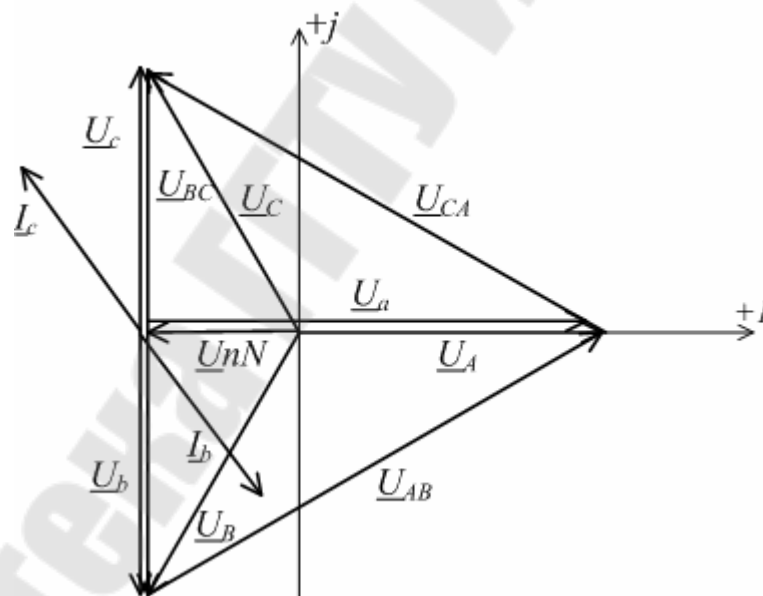


Рис 3.2 Векторная диаграмма к примеру 3.1.

3.1.2 Короткое замыкание одной фазы

Схема поврежденной цепи приведена на рис. 3.3.

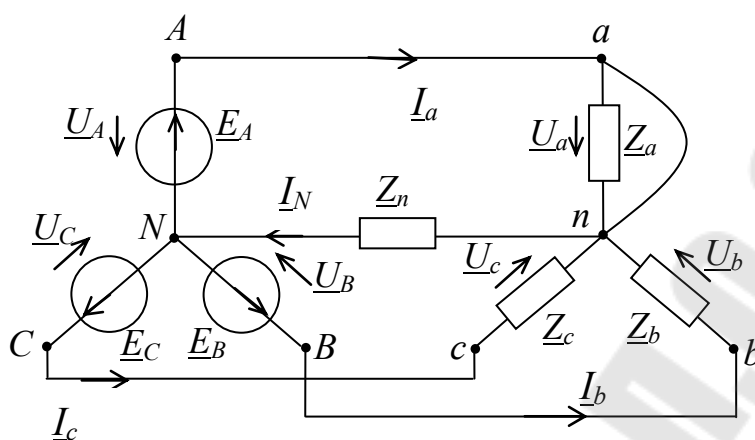


Рис. 3.3. Однофазное короткое замыкание в схеме “звезда-звезда”

Как видно, в этом случае

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A$$

Тогда фазные напряжения в неповрежденных фазах по (9)

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{U}_B - \underline{U}_A = \underline{U}_{BA} \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = \underline{U}_{CA} \end{aligned} \quad (23)$$

Из соотношений (23) и (4)-(5) следует [5]

$$\underline{U}_b = -U_\lambda e^{j\frac{\pi}{6}} \quad \underline{U}_c = U_\lambda e^{j\frac{5\pi}{6}} \quad (24)$$

Фазные токи нагрузки определяются по закону Ома (10). Ток в нейтральном проводе так же определяется по закону Ома (12). Ток в поврежденной фазе вычисляется по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_a = \underline{I}_N - \underline{I}_b - \underline{I}_c \quad (25)$$

Векторная диаграмма для этого случая приведена на рис. 3.4. При построении диаграммы принимаем активно-индуктивный характер нагрузки неповрежденных фаз “b” и “c”. В этом случае точка *n* на диаграмме совпадает с точкой *A*, по (23). Из (24) следует,

что фазные напряжения нагрузки в неповрежденных фазах совпадают по модулю с линейными напряжениями. Векторы тока в неповрежденных фазах строятся с учетом сдвига фаз относительно векторов фазных напряжений нагрузки. Вектор тока в поврежденной фазе строится путем геометрического вычитания из вектора тока нейтрального провода векторов токов неповрежденных фаз.

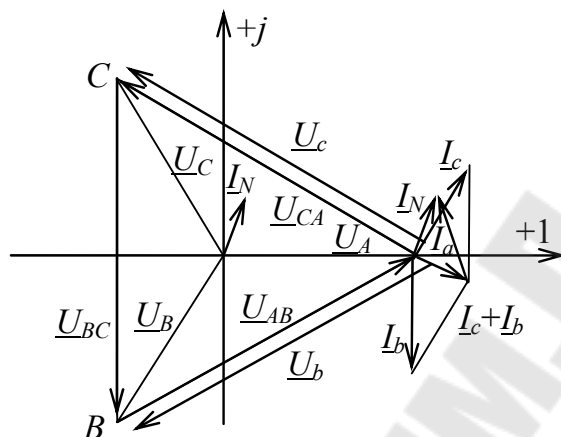


Рис. 3.4 Векторная диаграмма цепи звезда-звезда при коротком замыкании одной из фаз

Читателю рекомендуется самостоятельно построить векторную диаграмму для цепи звезда-звезда без нейтрального провода при коротком замыкании одной из фаз.

Если же сопротивление нейтрального провода пренебрежимо мало, то из схемы на рис. 3.3. видно, что в этом случае между началом и концом фазы генератора A имеется путь с очень малым сопротивлением, то есть происходит короткое замыкание фазы генератора. Этот режим является аварийным.

3.2 Аномальные режимы при соединении «треугольник-треугольник»

3.2.1 Обрыв линейного провода

Схема электрической цепи при обрыве линейного провода в схеме «треугольник-треугольник» приведена на рис. 3.5.

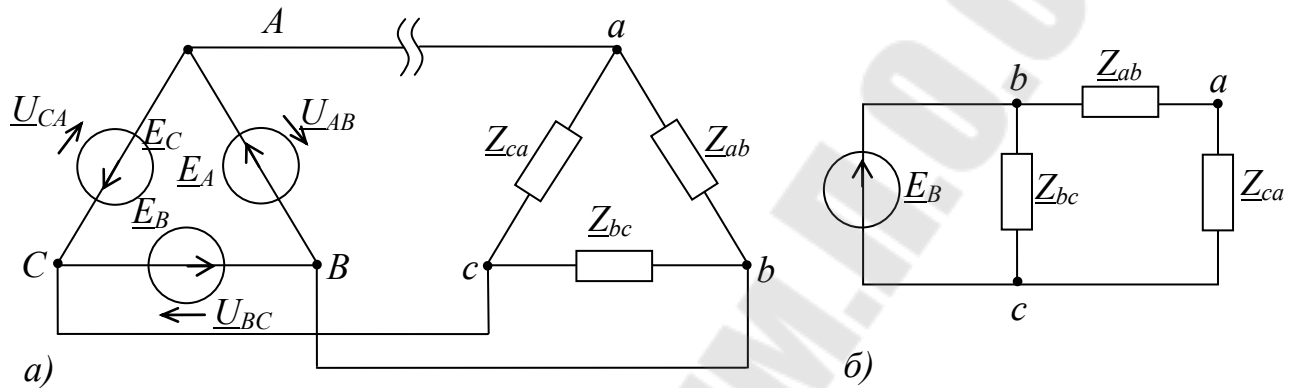


Рис. 3.5. Обрыв линейного провода при соединении «треугольник-треугольник»

Из рисунка ясно, что в этом случае трехфазная цепь преобразуется в однофазную. Расчет такой цепи не вызывает затруднений, поэтому рассмотрим его в примере 3.2.

Пример 3.2

В схеме на рис. 3.5,а $U_{\phi} = 380$ В. Комплексные сопротивления всех фаз приемника $\underline{Z}_{\phi} = 3 + j4 = 5e^{j53,13^{\circ}}$ Ом. Определить фазные и линейные токи [5]

Решение

Согласно разделу 3.2.1. в этом случае необходимо рассчитать однофазную схему, показанную на рис. 3.5, б.

Напряжение на сопротивлении \underline{Z}_{bc} равно

$$\underline{U}_{bc} = 380e^{-j120^{\circ}} \text{ В}$$

Сопротивления \underline{Z}_{ca} и \underline{Z}_{ab} соединены последовательно, и в силу их равенства

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{ca} = \frac{\underline{U}_{bc}}{2} = 190e^{-j120^{\circ}} \text{ В.}$$

Фазные токи нагрузки находим по закону Ома

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380e^{-j120^\circ}}{5e^{53,13^\circ}} = 173e^{-j173,13^\circ} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{bc}}{2 \cdot \underline{Z}_{bc}} = \frac{380e^{-j120^\circ}}{10e^{53,13^\circ}} = 38e^{-j173,13^\circ} \text{ А}$$

Линейные токи вычисляются по формулам (17) и (18), так как направления фазных токов принимаются такими же, как и в неповрежденной цепи (см. рис. 2.4)

$$\underline{I}_c = 38e^{-j173,13^\circ} - 173e^{-173,13^\circ} = -135e^{-173,13^\circ}$$

$$\underline{I}_b = 137e^{-j173,13^\circ} - 38e^{-173,13^\circ} = 135e^{-173,13^\circ}$$

Векторная диаграмма для случая обрыва линейного провода в схеме треугольник-треугольник приведена на рис 3.6

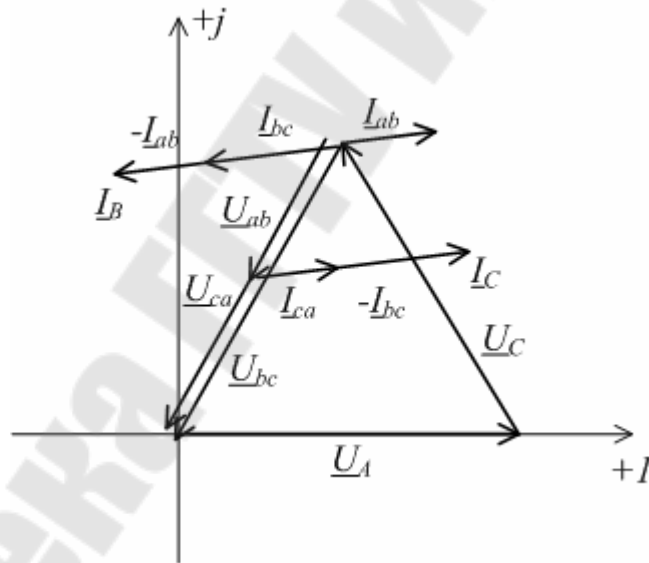


Рис 3.6. Векторная диаграмма при обрыве линейного провода в схеме треугольник-треугольник

3.2.2 Обрыв фазы приемника

Схема, соответствующая цепи при этом режиме, приведена на рис. 3.7.

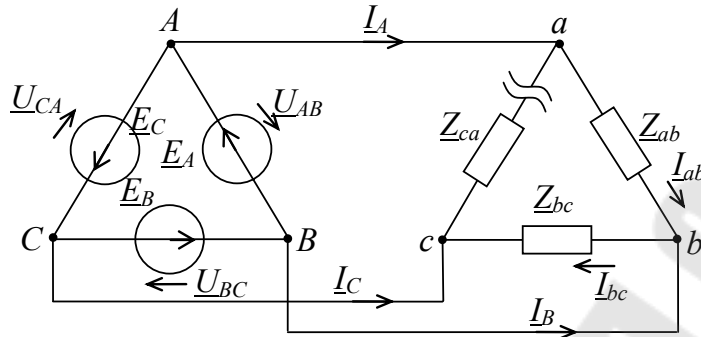


Рис. 3.7. Обрыв фазы приемника при соединении “треугольник-треугольник”

В этом случае токи в неповрежденных фазах не изменяются и могут быть найдены по закону Ома (16). Это следует из того, что фазные напряжения генератора равны фазным напряжениям приемника.

По формулам (17) и (18) получаем выражения для линейных токов, с учетом того, что ток I_{ca} равен нулю.

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} \quad \underline{I}_C = -\underline{I}_{bc} \quad (26)$$

Векторная диаграмма для этого режима изображена на рис. 3.8. Она является частным случаем векторной диаграммы на рис.2.6. Но в

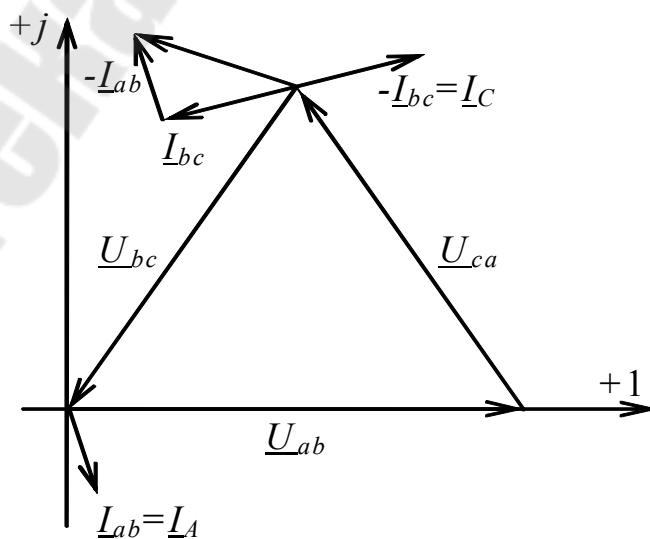


Рис. 3.8. Векторная диаграмма схемы рис. 3.7

этом случае линейные токи строятся на основе (26). Линейный ток \underline{I}_B строится путем сложения векторов токов \underline{I}_{bc} и $-\underline{I}_{ab}$ по правилу треугольника.

3.2.3 Короткое замыкание фазы приемника

Из схемы, на рис. 3.9 следует, что при коротком замыкании фазы приемника, начало и конец одной из фаз генератора, например фазы ab оказывается замкнутой накоротко. Этот режим является аварийным.

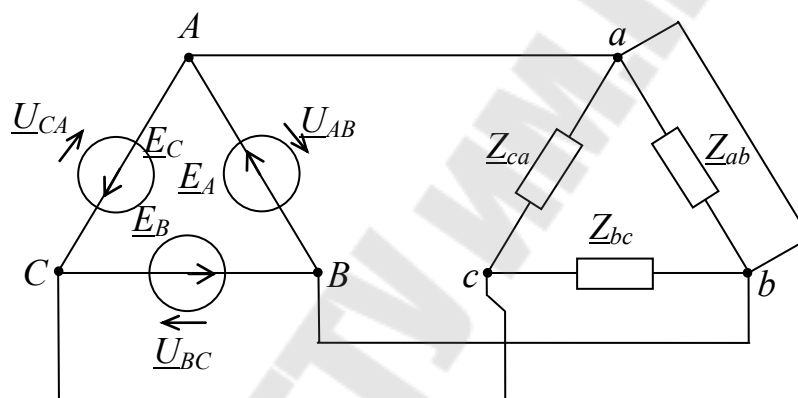


Рис. 3.9. Короткое замыкание фазы приемника при соединении “треугольник-треугольник”

4. МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Для решения вопросов энергоснабжения и для проверки расчетов необходимо вычислять мощности трехфазной цепи.

В данном пособии для составления баланса мощностей применяется вычисление полных мощностей генератора и приемника. Как известно, действительная часть полной комплексной мощности в алгебраической форме – активная мощность, а мнимая – реактивная мощность [2].

В комплексной форме полная мощность приемника электрической энергии при соединении в звезду вычисляется по формуле

$$\underline{S}_{\text{пр}} = I_a^2 \underline{Z}_a + I_b^2 \underline{Z}_b + I_c^2 \underline{Z}_c, \quad (27)$$

а при соединении в треугольник – по формуле

$$\underline{S}_{\text{пр}} = I_{ab}^2 \underline{Z}_{ab} + I_{bc}^2 \underline{Z}_{bc} + I_{ca}^2 \underline{Z}_{ca}. \quad (28)$$

При соединении генератора звездой линейные токи равны фазным токам генератора, поэтому полная мощность генератора вычисляется по формуле

$$\underline{S}_{\text{ген}} = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^*. \quad (29)$$

Если обмотки генератора соединены треугольником, токи фаз генератора не равны линейным. Линейные токи рассчитываются известным способом. Поэтому следует вывести формулу для вычисления полной мощности генератора, соединенного треугольником, через линейные токи.

Заменим генератор, соединенный треугольником, эквивалентным генератором, соединенным в звезду. Линейные напряжения исходного треугольника и эквивалентной звезды равны. Следовательно, линейные напряжения эквивалентной звезды равны фазным напряжениям исходного треугольника, так как в генераторе, соединенном треугольником, фазные напряжения равны линейным. При эквивалентной замене генератора полная мощность не изменяется. [7]

Можно показать [2], что полная мощность генератора, соединенного звездой

$$\underline{S} = \underline{I}_A \underline{U}_{AB}^* + \underline{I}_C \underline{U}_{CB}^*$$

Тогда по свойствам эквивалентной замены соединения генератора формула для полной мощности генератора, соединенного треугольником, имеет вид

$$\underline{S} = \underline{I}_A \underline{U}_{AB}^* - \underline{I}_C \underline{U}_{BC}^* \quad (30)$$

При симметричной нагрузке мощность всех фаз приемника одинакова, поэтому справедливы соотношения для суммарных мощностей трехфазной системы [8]

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} \quad Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} \quad S = 3U_{\phi}I_{\phi} \quad (31)$$

При соединении фаз приемника звездой $U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}$ и $I_{\phi} = I_{л}$. При соединении фаз приемника треугольником $U_{\phi} = U_{л}$ и $I_{\phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}}$. Поэтому для обоих случаев соединения генератора справедливы соотношения

$$P = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi_{л} \quad Q = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin \varphi_{л} \quad S = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \quad (32)$$

Список литературы

1. **Веселовский, О. М.** Доливо-Добровольский: [монография]/ О. М. Веселовский – М.: Изд-во Ан СССР, 1963. – 86 с.
2. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи – 9-е изд., перераб. и доп./ Л. А. Бессонов – М.: Высшая школа, 1996. – 631 с.
3. **Попов В. С.** Теоретическая электротехника / В. С. Попов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
4. **Каминский Е. А.** Звезда, треугольник, зигзаг. 5е изд. перераб. / Е. А. Каминский – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 106 с.
5. **Волынский Б. А.** Электротехника: учеб. пособие / Б. А. Волынский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 525 с.
6. **Новгородцев А. Б.** Теоретические основы электротехники/ А. Б. Новгородцев – СПб.: Питер, 2006. – 575 с.
7. **Атабеков Г. И.** Теоретические основы электротехники. Ч. 1. Линейные электрические цепи. / Г. И. Атабеков – М.: Энергия, 1970. – 592 с.
8. **Основы теории цепей** / Зевеке Т. В. [и др.] – 5-е. изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 572 с.

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ СО СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

**Пособие
по курсу «Теоретические основы электротехники»
для студентов электротехнических специальностей
дневной и заочной форм обучения**

Составители: **Грачев** Станислав Анатольевич
Комнатный Дмитрий Викторович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 22.10.08.

Пер. № 5Е.

E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>