

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ  
Физико-технический факультет  
Кафедра Электроники и астрофизики

Алимгазинова Н.Ш.

**Теоретические основы электротехники**

для студентов, обучающихся по специальности  
«Промышленная электроника и системы управления»

Алматы, 2025

## 6 лекция. Трехфазные цепи

**Цель лекции.** Изучить принципы образования и построения многофазных электрических систем, способы соединения элементов трёхфазных цепей, а также особенности симметричных и несимметричных режимов работы трёхфазных систем.

### План

1. Понятия о многофазных источниках и многофазных цепях. Соединение звездой и треугольником.
2. Симметричный режим трехфазной цепи.
3. Несимметричный режим трехфазной цепи.

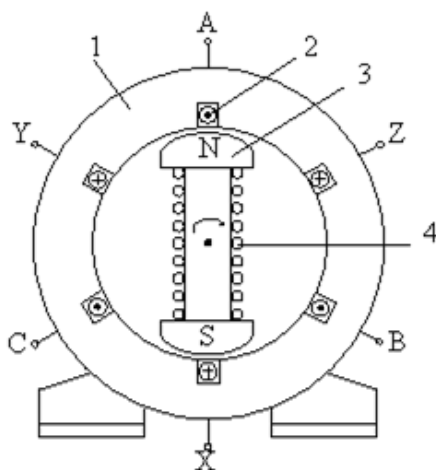
### 1 Понятия о многофазных источниках и многофазных цепях. Соединение звездой и треугольником

*Объединение в одну цепь нескольких подобных по структуре цепей синусоидального тока одной частоты с независимыми источниками энергии создает **многофазную систему**, в которой каждая цепь является **фазой**.*

**Фаза** это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Впервые трехфазный генератор был создан в 1891 году М.О. Доливо-Добровольским. Система, состоящая из трех связанных цепей, получила широкое распространение во всех странах мира. Практически вся электрическая энергия вырабатывается на электростанциях трехфазными генераторами, она передается к местам потребления по трехфазным линиям передачи и основная ее доля используется в трехфазных приемниках. В устройствах выпрямления применяют в основном шести- и двенадцатифазные системы, а в устройствах автоматики и телемеханики используют двухфазные системы.

Преимущества трехфазной системы: экономичность при передаче электрической энергии на большие расстояния и превосходное качество двигателей.



На статоре 1 генератора размещается обмотка 2, состоящая из трех частей или фаз (условно показана из одного витка).

Начала фаз обозначены буквами A, B и C, а концы – X, Y, Z.

Ротор 3 представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4, расположенной на роторе

Рисунок 1 – Трехфазный генератор

На рисунке 1 представлен трехфазный генератор, в статоре которого размещены три электрически изолированные друг от друга обмотки – фазные обмотки. Если ротор генератора двухполюсный, то оси фазных обмоток генератора повернуты в пространстве на  $120^\circ$  относительно друг друга. При вращении ротора в фазных обмотках индуцируются синусоидальные фазные ЭДС. Вследствие симметрии амплитудные  $E_m$  и действующие значения  $E$  равны во всех фазах. Однако линии магнитного поля вращающегося ротора пересекают фазные обмотки не одновременно, поэтому ЭДС обмоток сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $\frac{1}{3}T = \frac{2\pi}{3}$ . Если ротор генератора многополюсный, то каждой паре его полюсов соответствует в статоре 3 изолированные друг от друга катушки трехфазных обмоток. Размещенные вдоль окружности статора отдельные катушки, число которых равно числу пар полюсов каждой фазной обмотки, соединяются между собой последовательно или параллельно.

Фазы обозначаются первыми заглавными буквами латинского алфавита:  $A, B, C$ . Обозначение последовательности фаз не случайно. Они выбираются так, чтобы ЭДС фазы  $A$  достигала максимального значения на  $\frac{1}{3}$  периода раньше, чем ЭДС фазы  $B$  и на  $\frac{2}{3}$  периода раньше, чем ЭДС фазы  $C$ . Эта последовательность *нормальной или прямой* (рисунок 2, а). От последовательности фаз зависит направление вращения трехфазных двигателей. Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз изменится (рисунок 2, б) и будет называться *обратной*.

$$e_A = E_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2)$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (3)$$

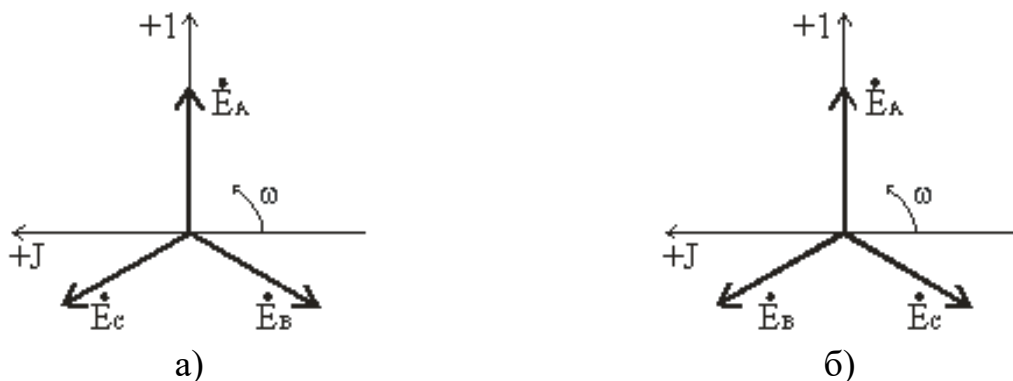


Рисунок 2 – Векторная диаграмма трехфазной цепи

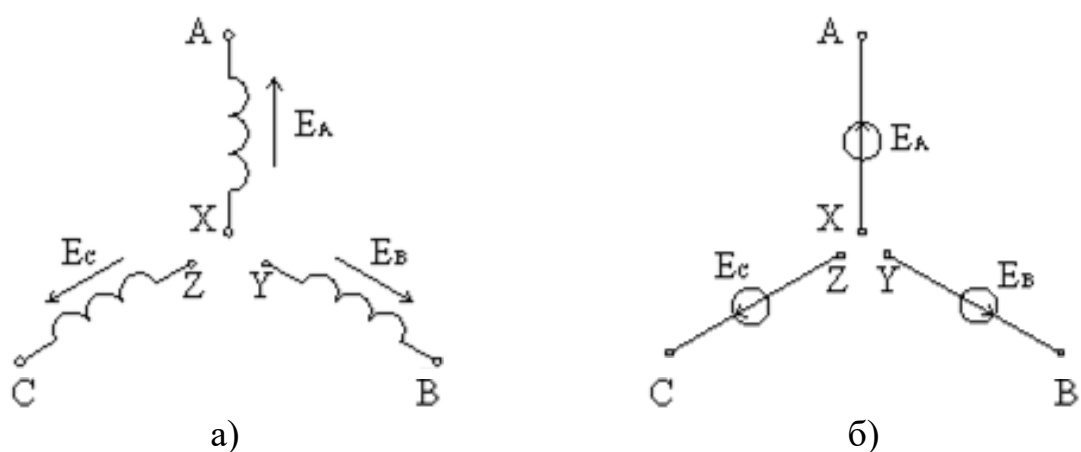


Рисунок 3 – Условно-графическое обозначение фазы источника питания

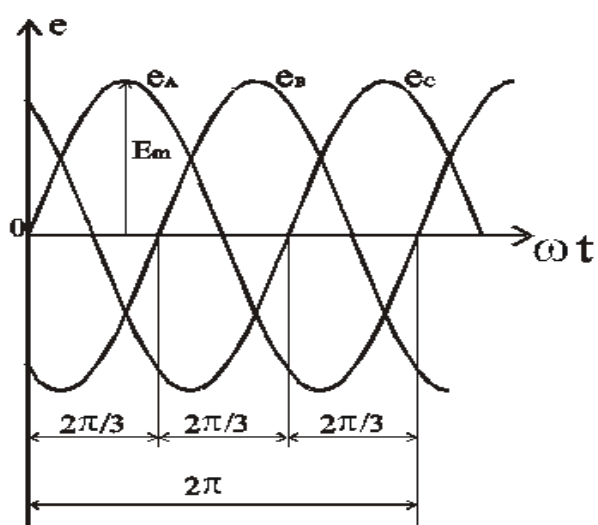


Рисунок 4 – Графики изменений во времени мгновенных значений ЭДС в трехфазной цепи

Представим мгновенные значения в комплексной форме

$$\dot{E}_A = E_m e^{j\varphi_A} = E_m, \quad \varphi_A = 0, \quad (4)$$

$$\dot{E}_B = E_m e^{j\varphi_B} = E_m e^{j\left(\varphi_A - \frac{2\pi}{3}\right)} = E_m e^{-j120^\circ}, \quad \varphi_B = -\frac{2\pi}{3}, \quad (5)$$

$$\dot{E}_C = E_m e^{j\varphi_C} = E_m e^{j\left(\varphi_A + \frac{2\pi}{3}\right)} = E_m e^{j120^\circ}, \quad \varphi_C = \frac{2\pi}{3}. \quad (6)$$

Здесь  $e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a$  - фазный множитель, тогда

$$\dot{E}_A = E_m, \quad (7)$$

$$\dot{E}_B = E_m a^2, \quad (8)$$

$$\dot{E}_C = E_m a. \quad (9)$$

Умножение комплексного значения на  $a$  соответствует повороту изображающего вектора на угол  $\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$  в положительном направлении, т.е. против направления движения часовой стрелки.

При расчете трехфазных цепей ось действительных величин принято направлять вертикально вверх, поэтому на диаграмме рисунка 2,а вектор  $\dot{E}_A$  направлен вертикально.

По второму закону Кирхгофа и из векторных диаграмм рисунка 2 следует, что для трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (10)$$

Докажем равенство (10), для этого используем выражения (4) – (6)

$$\begin{aligned} E_m + E_m e^{-j120^\circ} + E_m e^{j120^\circ} &= \\ &= E_m (1 + \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) + \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)) = \\ &= E_m \left( 1 - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0. \end{aligned}$$

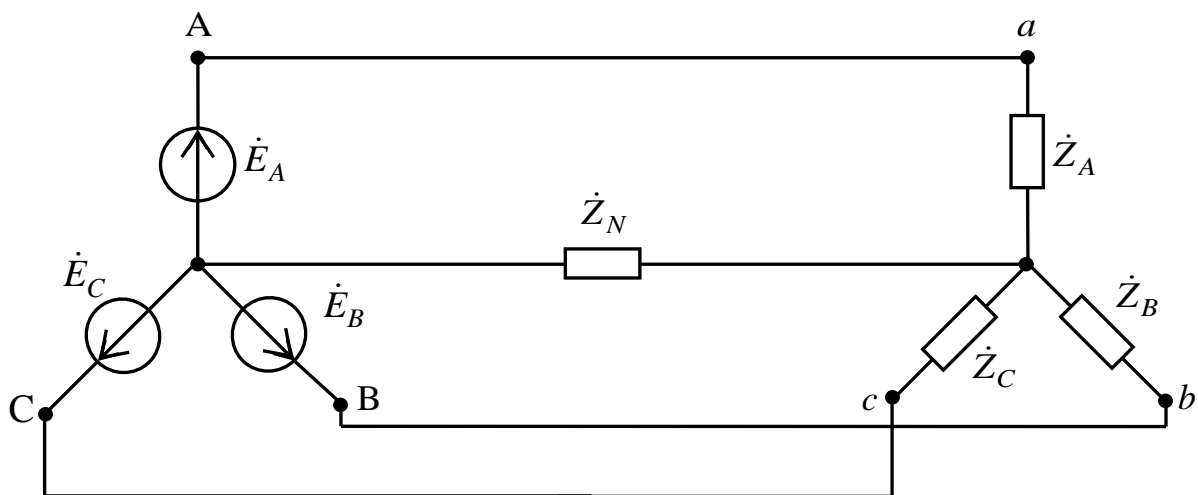
Для получения трехфазной системы необходимо определенным образом соединить фазы источника энергии и фазы приемника: звездой или треугольником.

**Соединение «звездой»** это такое соединение, при котором концы обмоток источника или концы потребителя соединены в одной точке, которая называется нейтралью, нулевой или нейтральной точкой.

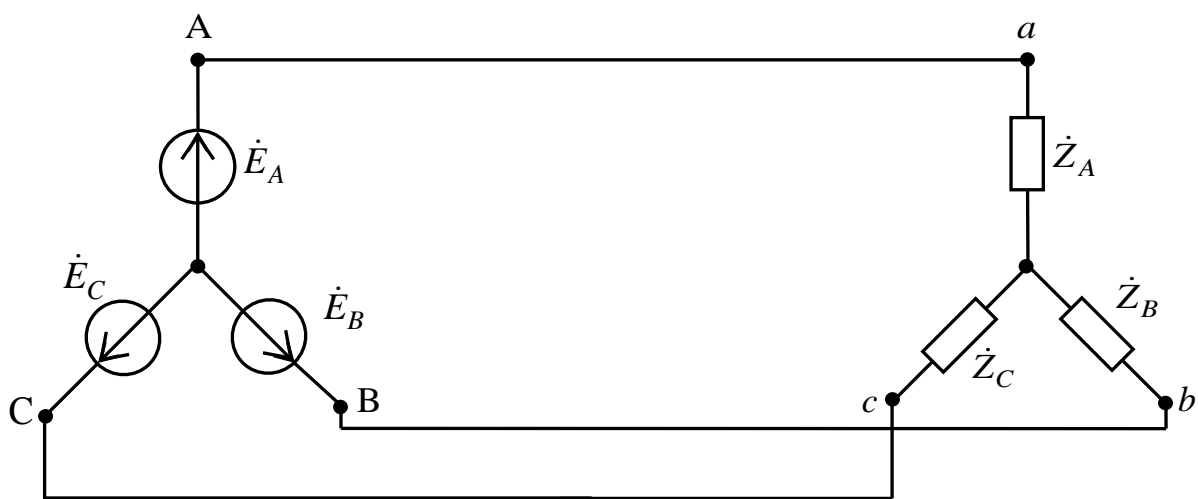
**Соединение «треугольником»** это такое соединение, при котором начало одной фазы соединяется с концом другой фазы.

Существуют пять простых способов соединения трехфазного генератора, которые представлены на рисунке 6.

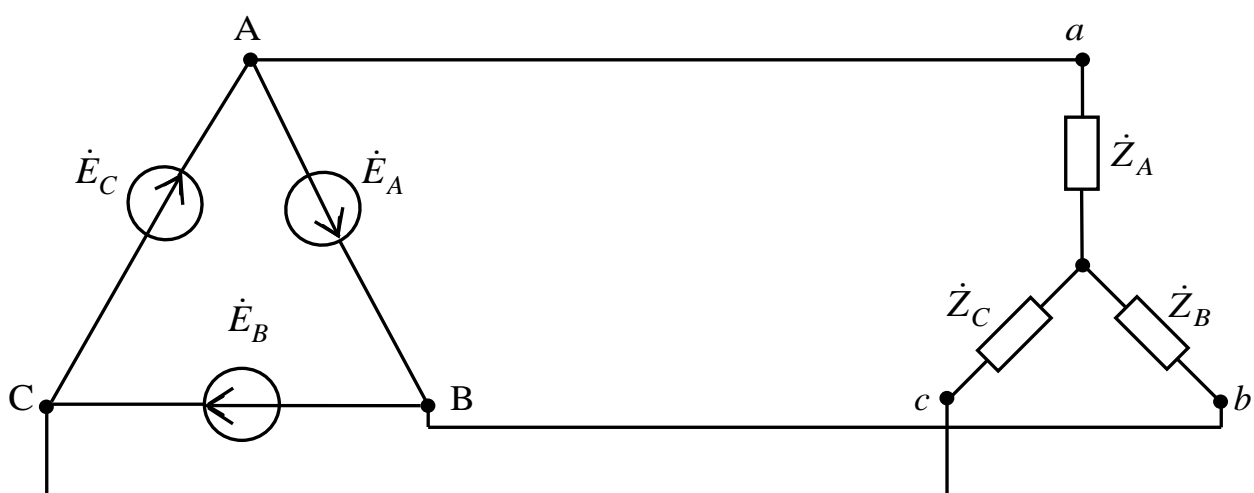
Режим работы трехфазных цепей зависит от амплитудных значений ЭДС источников и от комплексных сопротивлений каждой фазы приемника, поэтому различаются *симметричный и несимметричный режимы*.



а) Звезда-звезда, четырехпроводная

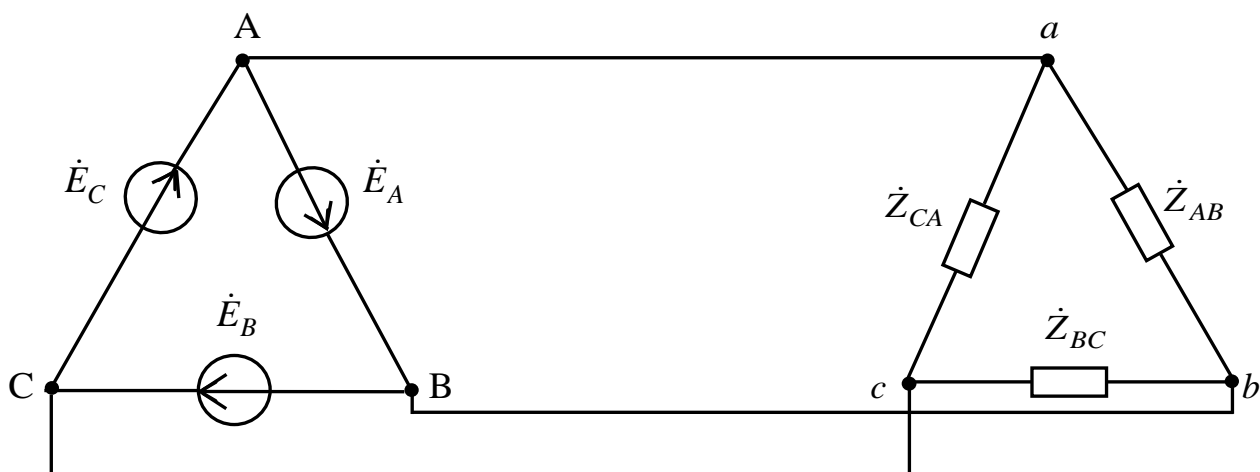


б) Звезда- звезда, трехпроводная (без нейтрального провода)

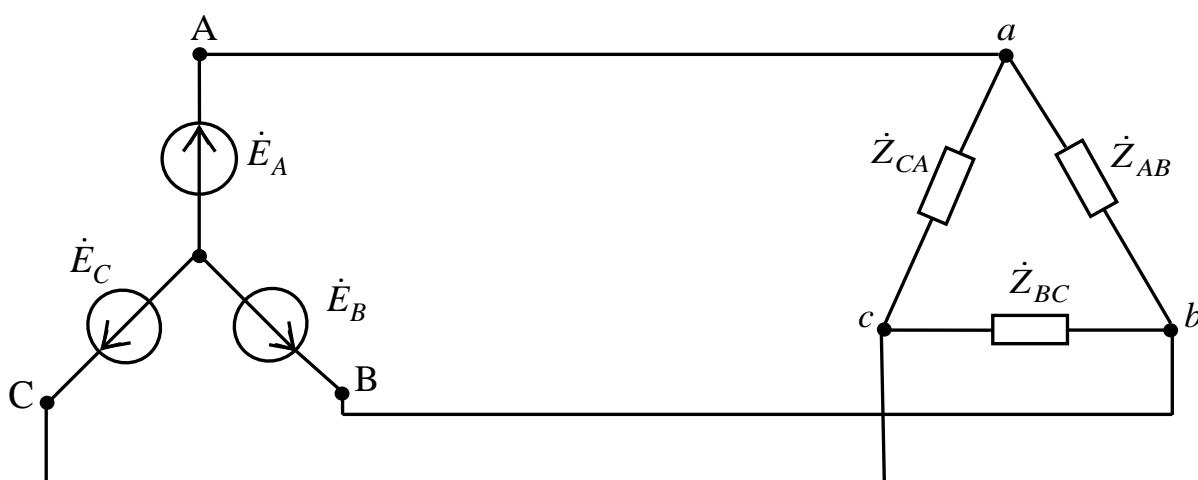


в) Треугольник-звезда

Рисунок 5 – Соединения трехфазной цепи



г) Треугольник-треугольник



д) Звезда-треугольник

Рисунок 5 – Соединения трехфазной цепи



Рисунок 6 – Режимы работы трехфазных цепей

Приемники, которые включаются в трехфазную цепь, могут быть *однофазными* или *трехфазными*. Примером однофазных приемников могут быть электрические лампы накаливания, осветительные приборы, однофазные двигатели, бытовые приборы и т.д.. Трехфазными приемниками являются индукционные печи и трехфазные асинхронные двигатели.

Если комплексные сопротивления фаз трехфазных приемников равны между собой, то их называют *симметричными*

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = Ze^{j\varphi}. \quad (11)$$

Если условие (11) не выполняется, то приемники называют *несимметричными*.

#### **Соединение «звезда-звезда»**

Если концы фаз обмоток генератора  $X, Y, Z$  соединяют в одну общую точку  $N$ , называемую *нейтральной точкой* (или *нейтралью*), и концы фаз приемников соединяют в одну точку  $n$ , то такое соединение называется *«звезда-звезда»* (рисунок 7).

Провода, которые соединяют начала фаз генератора и приемника называются *линейными*:  $A - a, B - b$  и  $C - c$ . Провод, который соединяет точку  $N$  генератора с точкой  $n$  приемника называют *нейтральным*:  $N - n$ . Соединение трехфазной цепи с нейтральным проводом называется *четырёхпроводной звездой*, без нейтрального провода – *трехпроводной звездой*.

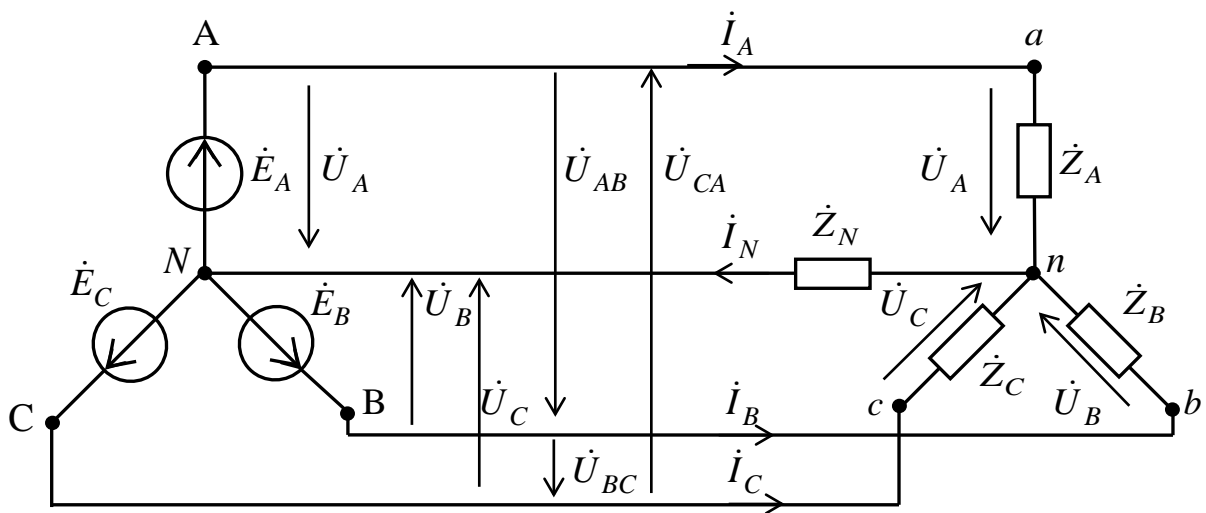


Рисунок 7 – Трехфазная цепь: соединение «звезда-звезда, четырехпроводная»

В случае использования симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  будет равен 0. Это следует из векторной диаграммы токов, представленной на рисунке 8, так как геометрическая сумма трех векторов тока будет равна нулю:  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ . Следовательно, нейтральный провод можно исключить.



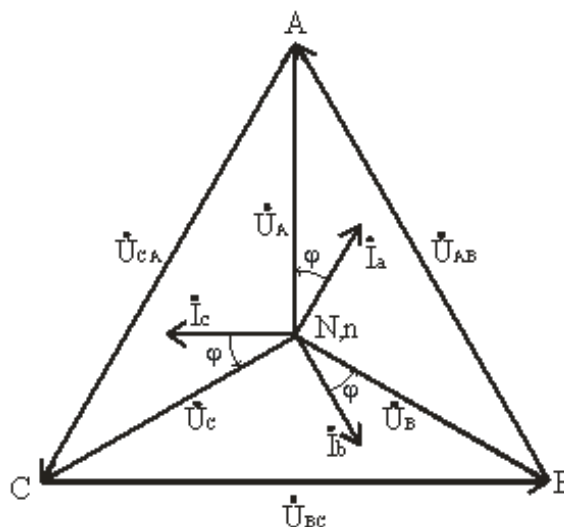


Рисунок 8 – Векторная диаграмма токов для симметричного приемника

В трехфазных цепях различают напряжения и токи двух видов:

✓ *линейные* -

$$\dot{U}_L = \{\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}\}, \quad \dot{I}_L = \{\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}\};$$

✓ *фазные* -

$$\dot{U}_\Phi = \{\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C\}, \quad \dot{I}_\Phi = \{\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C\}.$$

**Фазное напряжение** - это напряжение между любым линейным проводом и нулевым проводом, или же это напряжение, приложенное к обмотке источника или к потребителю. Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз. **Фазный ток** - это ток, протекающий через обмотку источника или через потребитель.

**Линейное напряжение** - это напряжение между двумя линейными проводами или это напряжение между двумя любыми фазами. Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу. **Линейный ток** - это ток, протекающий по линейному проводу.

## 2 Симметричный режим работы трехфазной цепи

Симметричный режим трехфазной цепи будет при симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C,$$

т.е.  $R_A = R_B = R_C = R_\Phi$  и  $x_A = x_B = x_C = x_\Phi$ . Тогда фазные токи и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}, \quad (12)$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi = \arctan \frac{x_\phi}{R_\phi}. \quad (13)$$

Векторная диаграмма, соответствующая трехфазной симметричной системе ЭДС, представлена на рисунке 2,а.

Если пренебрежём сопротивлением проводов и сопротивлением нейтрального провода, то связь между линейными и фазными величинами будет следующая.

При виде соединения «звезда-звезда, трехпроводная» фазные и линейные токи равны

$$\dot{I}_\phi = \dot{I}_L. \quad (14)$$

Фазные напряжения равны

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{E}_A, \\ \dot{U}_B &= \dot{E}_B, \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C. \end{aligned} \quad (15)$$

Из рисунка 7 линейные напряжения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставив в первое уравнение (16) формулы (15), а затем (4)-(6) получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B = E_m - E_m \left( \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) \right) = E_m \left( 1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= E_m \left( 1.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = E_m e^{j \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{1.5}} = E_m e^{j 30^\circ} = E_m \sqrt{3}. \end{aligned}$$

Т.е.  $\dot{U}_{AB} = E_m \sqrt{3}$ , такая же связь будет и для других линейных напряжений. Так как  $\dot{E}_A = E_m$ , следует

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi \quad (17)$$

Формулы (14) и (17) показывают связь между линейными и фазными величинами (ток, напряжение) в симметричной трехфазной цепи при соединении «звезда-звезда, трехпроводная».

### Соединение «треугольник-треугольник»

Если конец каждой фазы обмотки генератора соединить с началом следующей фазы и подключить тремя линейными проводами к нагрузке, соединенной аналогичным образом, то образуется **соединение «треугольник-треугольник»** (рисунок 9).

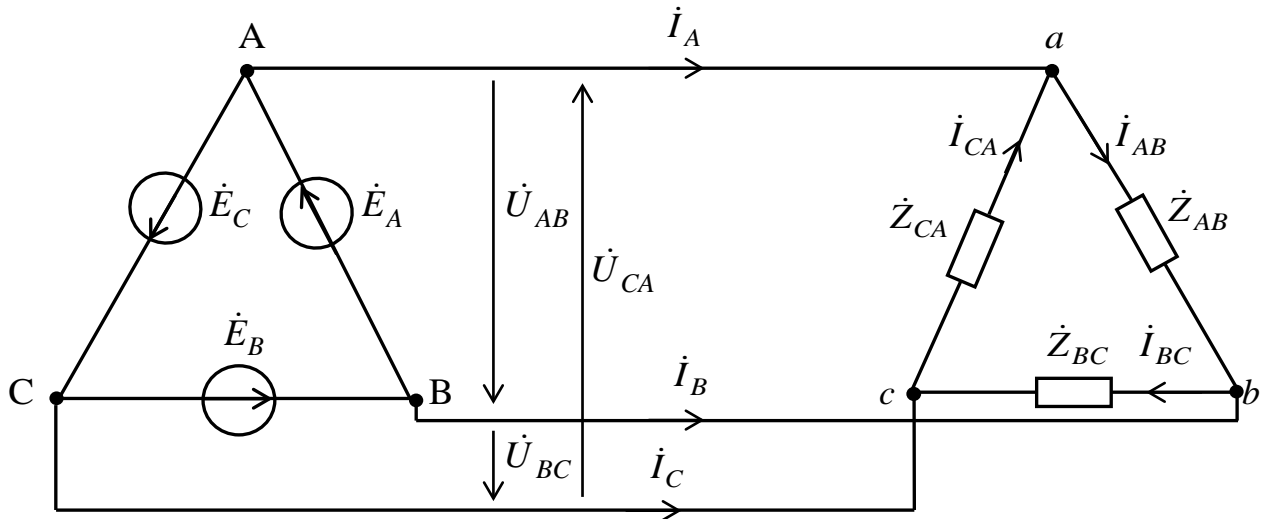


Рисунок 9 – Трехфазная цепь: соединение «треугольник-треугольник»

В симметричной трехфазной цепи, соединенной таким образом, фазные и линейные напряжения одинаковы

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{U}_{AB}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{BC}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{CA},\end{aligned}\tag{18}$$

т.е.

$$\dot{U}_\Phi = \dot{U}_L\tag{19}$$

По первому закону Кирхгофа линейные и фазные токи нагрузки для узлов  $a, b, c$

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.\end{aligned}\tag{20}$$

где

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}}.\tag{21}$$

Подставив в первое уравнение (20) формулы (21) и (18), а также учитывая, что приемник симметричен, т.е.  $\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_{CA} = \dot{Z}$  получим

$$\begin{aligned}
\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} - \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}} - \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}} = \frac{\dot{E}_A}{\dot{Z}} - \frac{\dot{E}_C}{\dot{Z}} = \\
&= \frac{E_m - E_m a}{\dot{Z}} = \frac{E_m}{\dot{Z}} \left( 1 + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\
&= \frac{E_m}{\dot{Z}} \left( 1.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{E_m}{\dot{Z}} e^{j \arctg \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \right)} \left( \frac{1}{1.5} \right) = \\
&= \frac{E_m}{\dot{Z}} e^{-j 30^\circ} = \frac{E_m}{\dot{Z}} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Тогда

$$\dot{I}_\phi = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{\text{Л}} = \sqrt{3} \dot{I}_\phi \tag{23}$$

Формулы (18) и (23) показывают связь между линейными и фазными величинами (ток, напряжение) в симметричной трехфазной цепи при соединении «треугольник-треугольник».

### 3. Несимметричный режим работы трехфазной цепи

Рассмотрим различные варианты несимметричной нагрузки при соединении трехфазной звезды «звезда-звезда»:

1. Общий случай -  $\dot{Z}_A \neq \dot{Z}_B \neq \dot{Z}_C$  и  $\dot{Z}_N \neq 0$ , и при  $\dot{Z}_N = 0$ .
2. Случай, когда  $\dot{Z}_A \in [0, \infty]$ , а  $\dot{Z}_B = \dot{Z}_C$ .
3. Случай, когда каждая фаза приемника состоит из различных по физической природе элементов:  $\dot{Z}_A \rightarrow C, \dot{Z}_B \rightarrow L, \dot{Z}_C \rightarrow R$ .

1. При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда  $\dot{Z}_A \neq \dot{Z}_B \neq \dot{Z}_C$  и  $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$  токи в фазах потребителя различны и будут определяться по закону Ома

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_C}. \tag{24}$$

Рассмотрим несимметричный режим работы трехфазной цепи при соединении «звезда-звезда, четырехпроводная».

Ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  будет равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \tag{25}$$

Между нейтральными точками приемника и источника энергии напряжение смещения нейтрали можно определить по методу двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{Y}_A \dot{U}_A + \dot{Y}_B \dot{U}_B + \dot{Y}_C \dot{U}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}, \quad (26)$$

где  $\dot{Y}_A = \frac{1}{\dot{Z}_A}$ ,  $\dot{Y}_B = \frac{1}{\dot{Z}_B}$ ,  $\dot{Y}_C = \frac{1}{\dot{Z}_C}$ ,  $\dot{Y}_N = \frac{1}{\dot{Z}_N}$  - комплексные проводимости фаз приемника и нейтрального провода. Напряжение смещения нейтрали при симметричной нагрузке отсутствует, т.е.  $\dot{U}_{nN} = 0$ , а при несимметричной нагрузке возникает напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_{nN} \neq 0$ .

Напряжения на фазах приемника отличаются друг от друга, из второго закона Кирхгофа

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \end{aligned} \quad (27)$$

Фазные токи

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}'_A}{\dot{Z}_A} = \dot{U}'_A \cdot \dot{Y}_A, \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}'_B}{\dot{Z}_B} = \dot{U}'_B \cdot \dot{Y}_B, \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}'_C}{\dot{Z}_C} = \dot{U}'_C \cdot \dot{Y}_C. \end{aligned} \quad (28)$$

Векторы фазных напряжений источника питания и  $\dot{U}_{nN}$  представлены на рисунке 1. При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений нагрузки значения  $\dot{U}_{nN}$  меняются. При этом нейтральная точка приемника  $n$  на диаграмме может занимать различные положения, а фазные напряжения приемника  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  будут весьма существенно отличаться друг от друга.

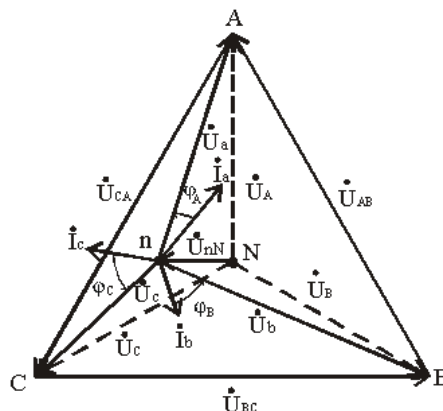


Рисунок 10 - Векторная диаграмма напряжений и токов

При симметричной нагрузке нейтральный провод не принимается во внимание, так как он не повлияет на фазные напряжения приемника. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода фазные напряжения нагрузки уже не связаны жестко с фазными напряжениями генератора, так как на нагрузку воздействуют только линейные напряжения генератора. Несимметричная нагрузка в таких условиях вызывает несимметрию ее фазных напряжений  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  и смещение ее нейтральной точки  $n$  из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).

Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки. Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- ✓ выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- ✓ подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в  $\sqrt{3}$  раз меньше номинального линейного напряжения сети.

При  $Z_N = 0$ , благодаря нейтральному проводу напряжения на обмотках генератора в каждой фазе будут равны напряжениям на приемниках соответствующих фаз (рисунок 11).

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки (примером могут быть электрические лампы накаливания). Режим работы каждой фазы трехфазной нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

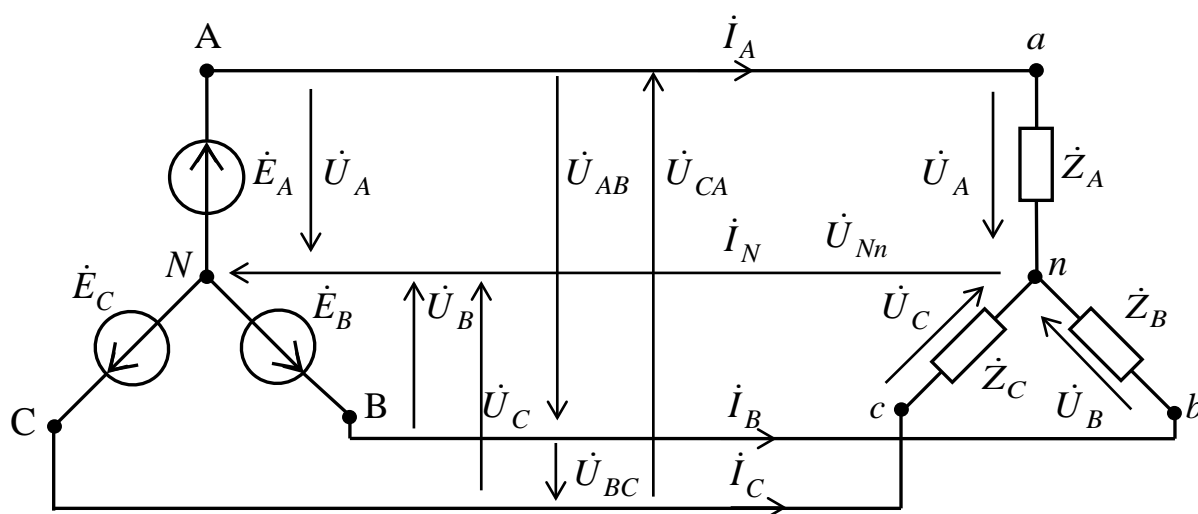


Рисунок 11 – Трехфазная цепь: соединение «звезда-звезда, трехпроводная»

2. При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда имеется в одной фазе переменное сопротивление  $\dot{Z}_A \in [0, \infty]$ , а  $\dot{Z}_B = \dot{Z}_C$  (рисунок 12). Примем, что все фазы приемника имеют резистивный характер

$$Y_A = g_A = \frac{1}{R_A}, \quad Y_B = Y_C = g = \frac{1}{R}.$$

Напряжение смещения нейтрали примет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{g_A \dot{U}_A + g \dot{U}_B + g \dot{U}_C}{g_A + 2g} = \frac{g_A E_m + g E_m a^2 + g E_m a}{g_A + 2g} = \\ &= \frac{E_m}{g_A + 2g} \left( g_A + g \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = \frac{E_m (g_A - g)}{g_A + 2g}. \end{aligned} \quad (29)$$

Введем обозначение  $m = \frac{g_A}{g}$ , тогда (6) примет вид

$$\dot{U}_{nN} = E_m \cdot \frac{m-1}{m+2}. \quad (30)$$

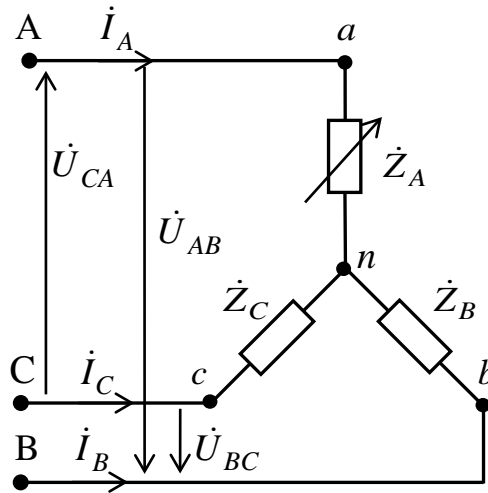


Рисунок 3

Рассмотрим следующие случаи:

1) Если  $R_A = 0$ , тогда  $g_A \rightarrow \infty$  и  $m \neq 0$ . Напряжение смещения нейтрали будет иметь определенную величину, т.е.  $\dot{U}_{nN} \approx E_m$ , в этом случае фазные напряжения:  $\dot{U}_A = 0$ ,  $\dot{U}_B = -\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_C = \dot{U}_{CA}$ . Фазные токи можно определить по вышеописанным формулам (28).

2) Если  $R_A \rightarrow \infty$ , тогда  $g_A \rightarrow 0$  и  $m = 0$ . Напряжение смещения нейтрали будет иметь отрицательную величину, т.е.  $\dot{U}_{nN} \approx -\frac{E_m}{2}$ , в этом случае фазные напряжения и фазные токи определяются по формулам (27) и (28).

3. При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда в фазе  $a$  имеется емкостная нагрузка, в фазе  $b$  – индуктивная, а в фазе  $c$  – активная:  $\dot{Z}_A \rightarrow C$ ,  $\dot{Z}_B \rightarrow L$ ,  $\dot{Z}_C \rightarrow R$  (рисунок 4).

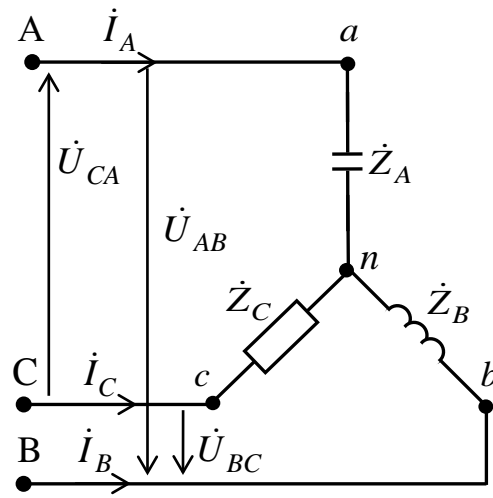


Рисунок 4

Комплексные проводимости фаз приемника

$$\dot{Y}_A = \frac{1}{\dot{Z}_A} = jb_C, \dot{Y}_B = \frac{1}{\dot{Z}_B} = -jb_L, \dot{Y}_C = \frac{1}{\dot{Z}_C} = g. \quad (31)$$

Напряжение смещения нейтрали примет вид

$$\dot{U}_{nN} = \frac{E_m \cdot jb_C + E_m a^2 \cdot (-jb_L) + E_m a \cdot g}{g + jb_C - jb_L}. \quad (32)$$

Если примем что реактивные проводимости одинаковые, т.е.  $b_C = b_L = b$ , тогда

$$\dot{U}_{nN} = \frac{jb \cdot E_m (1 - a^2) + E_m a \cdot g}{g} = \frac{E_m}{g} (jb(1 - a^2) + ga).$$

Фазные напряжения и токи также определяются по формулам (27) и (28). Нас интересует ток в фазе C



$$\begin{aligned} i_C &= (\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}) \dot{Y}_C = \left( E_m a - \frac{E_m}{g} (jb(1-a^2) + ga) \right) g = \\ &= (E_m a g - E_m (jb(1-a^2) + ga)) = -E_m \cdot jb(1-a^2) \end{aligned}$$

Из данной формулы мы видим, что ток в фазе С не зависит от своей активной проводимости при равенстве проводимостей в других фазах.

Аналогичным образом, используя вышеописанные формулы можно рассмотреть соединение приемника «треугольником». *Важной особенностью* такого соединения фаз приемника является то, что *при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным*, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому *схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки*.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение многофазной системе и используемым основным понятиям.
2. Опишите симметричный режим работы трехфазной цепи при соединении «звездой».
3. Опишите симметричный режим работы трехфазной цепи при соединении «треугольником».
4. Опишите различные случаи несимметричного режима работы трехфазной цепи.

### Литература

- 1 Алимгазина Н.Ш. Теория Электрических Цепей. Курс Лекций. – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 8,7 п.л..
- 2 Манаков С.М., Алимгазина Н.Ш., Бурисова Д.Ж., Исимова А.Т. Основы электротехники в упражнениях и задачах. – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 10 п.л..
- 3 Манаков С.М., Алимгазина Н.Ш., Толегенова А.А. Учебно-Методическое Пособие По Курсу "Теория Электрических Цепей". – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 12 п.л.
- 4 Теоретические основы электротехники. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / С. Г. Иванова, В. В. Новиков. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
- 5 Атабеков Г. И. Основы теории цепей : учебник / Г. И. Атабеков . – 2-е изд., испр . – СПб. : Лань, 2006 . – 432 с.
- 6 Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. М: КОРОНА-Век, 2012. - 368 с.

7 Атабеков Г.И. Нелинейные электрические цепи. Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. СПб.: Питер, Лань, 2010. – 432 с.

8 Бессонов Л.А. Электрические цепи. Теоретические основы электротехники. М: Юрайт, 2016. – 701 с.

9 Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для студ. вузов спец. Радиотехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 574 с.