

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические рекомендации для  
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

**Б1.В.ДВ.02.02 Симметричные составляющие несимметричной  
трехфазной системы**

**Направление подготовки (специальность) 35.04.06 Агроинженерия  
Профиль образовательной программы Электротехнологии и электрооборудова-  
ние в сельском хозяйстве  
Форма обучения очная**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>1. Организация самостоятельной работы .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Методические рекомендации по самостояльному изучению вопросов.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Методические рекомендации по подготовке к занятиям .....</b>	<b>14</b>

# 1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы (из табл. 5.1 РПД)				
		подготовка курсового проекта (работы)	подготовка реферата/эссе	индивидуальные домашние задания (ИДЗ)	самостоятельное изучение вопросов (СИВ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие	-	-	-	8	6
2	Степень несимметрии и мощность несимметричной трехфазной системы	-	-	-	9	5
3	Действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии	-	-	-	8	6
4	Нахождение токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах	-	-	-	9	5

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

### 2.1 Экспериментальные методы измерения симметричных составляющих в трехфазной цепи

Для того, чтобы определить токи в симметричной цепи, к которой приложена несимметричная система напряжений (рис.1,а), прежде всего по приведенным выше формулам раскладывают на симметричные составляющие заданную систему напряжений. Далее рассматривают действие каждой из симметричных составляющих напряжения в отдельности. Для этого рассматривают в отдельности схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей. Так как режим каждой из этих схем симметричный, то расчет достаточно произвести для одной фазы, например, фазы А. Сопротивление нулевого провода не оказывает влияния на симметричные системы токов прямой и обратной последовательностей, поэтому оно не показывается в схемах для этих токов (рис.1,б и

рис.1,в). В схеме нулевой последовательности (рис.1,г) включается утроенное значение

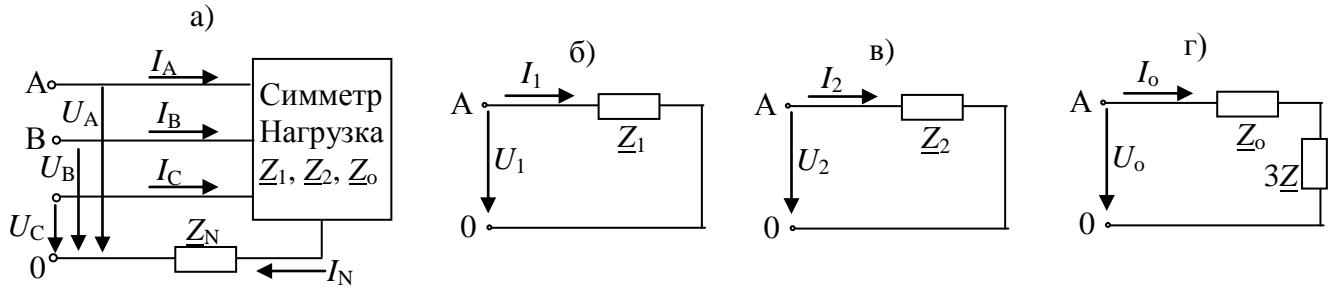


Рис.1

$Z_N$ , поскольку по этому сопротивлению протекает тройной ток нулевой последовательности.

По закону Ома для схем рис. 1 можно записать:  $I_1=U_1/Z_1$ ;  $I_2=U_2/Z_2$ ;  $I_0=U_0/(Z_0+3Z_N)$ .

Фактические токи определяем, суммируя симметричные составляющие:  $I_A=I_1+I_2+I_0$ ;  $I_B=a^2I_1+aI_2+I_0$ ;  $I_C=aI_1+a^2I_2+I_0$ ;  $I_N=3I_0$ .

Если нет нулевого провода, то используют только две схемы – прямой и обратной последовательностей.

Поскольку метод симметричных составляющих основан на принципе наложения, то его можно применять только к линейным цепям.

### Расчет несимметричных цепей методом симметричных составляющих

В симметричных цепях разноименные симметричные составляющие не связаны друг с другом. Совсем иная ситуация в несимметричных цепях, в которых составляющие разных последовательностей оказываются увязанными. Это приводит к значительному усложнению расчета. Однако в нормальных условиях несимметричные режимы в высоковольтных трехфазных цепях с активной нагрузкой (трансформаторы, вращающиеся электрические машины и др.) встречаются относительно редко (дуговые электроплавильные печи, электротяговые двигатели и др.). Обычно несимметричные режимы имеют место в аварийных случаях, например, при КЗ одной или двух фаз на землю, КЗ без соединения с землей, обрыве фазы или двух фаз и т.д. В этих случаях имеет место несимметрия и тогда расчет производится методом симметричных составляющих.

Основы этого метода.

На основании принципа наложения заданный несимметричный режим работы цепи представляется как результат наложения трех симметричных режимов. В первом симметричном режиме все ЭДС, напряжения и токи содержат только составляющие прямой последовательности, а активные элементы представлены их сопротивлениями прямой последовательности. Во втором симметричном режиме все ЭДС, напряжения и токи содержат только составляющие обратной последовательности, а активные элементы представлены их сопротивлениями обратной последовательности. В третьем симметричном режиме все ЭДС, напряжения и токи содержат только составляющие нулевой последовательности, а активные элементы представлены их сопротивлениями нулевой последовательности. Для того, чтобы от исходного несимметричного режима перейти к трем симметричным режимам, поступают следующим образом: в том месте, где появилась несимметрия, в схему вводят систему трех несимметричных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , которая раскладывается на 3 симметричные системы, основные векторы которой  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_0$  подлежат определению. Точно так же в месте аварии в схему вводят систему трех несимметричных токов, которая раскладывается на 3 симметричные системы, основные векторы которых  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  так же подлежат определению. Следовательно, появляется 6 неизвестных величин, для определения которых составляется система из 6

уравнений: по одному для каждого из симметричных режимов, а еще 3 – для того участка, где появилась несимметрия. Вид трех последних уравнений полностью зависит от вида аварии.

Приведем конкретный пример. В схеме рис.2 требуется определить токи и напряжения при однофазном замыкании на землю.

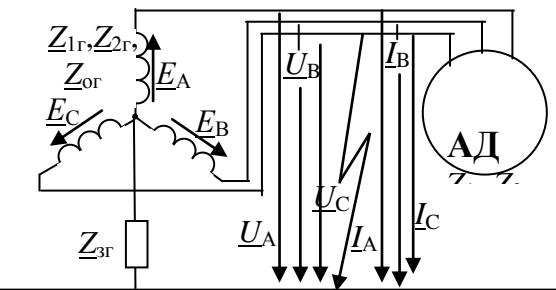


Рис.2

напряжений  $\underline{U}_1$ ,  $a^2\underline{U}_1$ ,  $a\underline{U}_1$ , трех симметричных  $I_1$ ,  $a^2I_1$ ,  $aI_1$  и трех сопротивлений  $Z_{1d}$ , соединенных в звезду. Так как эта схема симметрична, то её расчет можно произвести на одну фазу. Схема прямой последовательности на одну фазу приведена на рис.3,а.

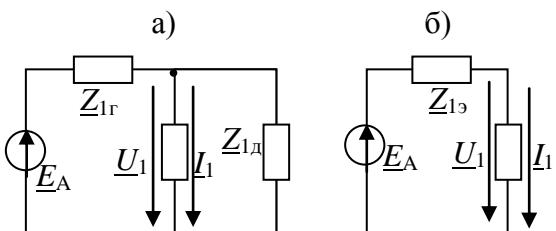


Рис.3

Для схемы рис.3,б имеем  $E_3 = I_1 Z_{13} + U_1$ .

Аналогично составим однофазную схему для обратной последовательности (рис.4,а). Так как генератор создает симметричную систему ЭДС только прямой последовательности, то в этой схеме источник обратной последовательности отсутствует.

Поскольку в симметричной системе ЭДС генератора создает симметричную систему ЭДС только прямой последовательности, то в этой схеме источник обратной последовательности отсутствует. Генератор и АД с этой схеме представлены сопротивлениями  $Z_{2r}$  и  $Z_{2d}$  соответственно. Заменив параллельно включенные  $Z_{2r}$  и  $Z_{2d}$  эквивалентным, получим схему рис.4.44,б, где  $Z_{23} = Z_{2r}Z_{2d}/(Z_{2r}+Z_{2d})$  и для которой  $I_2 Z_{23} + U_2 = 0$ .

Составим схему для нулевой последовательности (рис.5). При составлении

этой схемы следует учесть, что ЭДС нулевой последовательности отсутствуют, а по сопротивлению  $Z_{3r}$  протекает тройной ток нулевой последовательности. Кроме того нулевая точка АД не соединена с землей, поэтому через него не потекут токи нулевой последовательности и ветви с  $Z_{od}$  в схеме не будет. Для этой схемы имеем  $I_o(Z_{or}+3Z_{3r})+U_o=0$ .

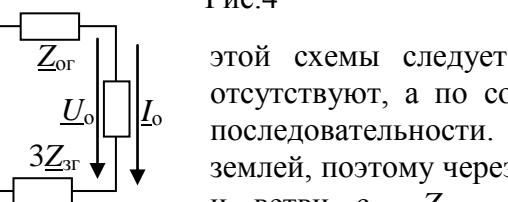


Рис.5

К этим трем уравнениям добавим еще три, характеризующие аварийный участок. Для нашего примера эти уравнения следующие:  $\underline{U}_C=0$ ;  $I_A=0$ ;  $I_B=0$ . Правда их следует переписать через симметричные составляющие:  $a\underline{U}_1+a^2\underline{U}_2+\underline{U}_o=0$ ;  $I_1+I_2+I_o=0$ ;  $a^2I_1+aI_2+I_o=0$ . Совместное решение этих 6 уравнений дает возможность определить  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$ ,  $\underline{U}_o$  и  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_o$ , с помощью которых могут быть определены токи и напряжения на любом участке схемы, например, ток КЗ на землю  $I_C=aI_1+a^2I_2+I_o$ .

Аналогично методом симметричных составляющих производится расчет в случае другой аварии и в любой другой схеме.

## 2.2 Трехфазная цепь с однофазными и трехфазными приемниками

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем электрических цепей, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые общим источником энергии.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть фазой. Таким образом, понятие "фаза" имеет в электротехнике два значения: первое – аргумент синусоидально изменяющейся величины, второе – часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от количества фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными и т.п.

Трехфазные цепи – наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями:

- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно просто получение кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину двух типов: турбогенератор и гидрогенератор. Модель трехфазного генератора схематически изображена на рис. 1.

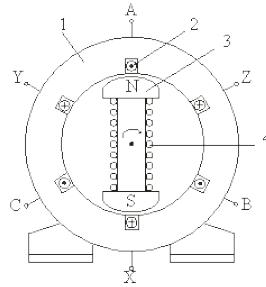


Рис. 1

На статоре 1 генератора размещается обмотка 2, состоящая из трех частей или, как их принято называть, фаз. Обмотки фаз располагаются на статоре таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ , т.е. на  $120^\circ$ . На рис. 1 каждая фаза обмотки статора условно показана состоящей из одного витка. Начала фаз обозначены буквами А, В и С, а концы – Х, Y, Z. Ротор 3 представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4, расположенной на роторе.

При вращении ротора турбиной с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся друг от друга по фазе на  $120^\circ$  вследствие их пространственного смещения.

На схеме обмотку (или фазу) источника питания изображают как показано на рис. 2.

За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу. Обычно индуцированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол  $120^\circ$ . Такая система ЭДС называется симметричной.

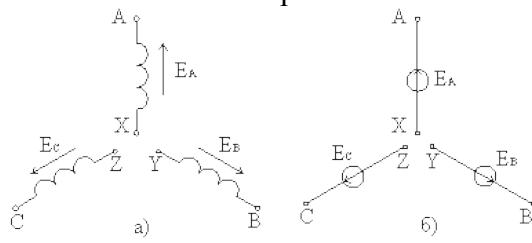


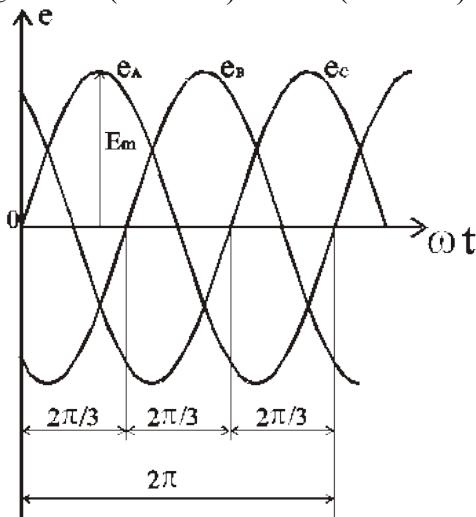
Рис. 2

Трехфазная симметричная система ЭДС может изображаться графиками, тригонометрическими функциями, векторами и функциями комплексного переменного.

Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС показаны на рис. 3.

Если ЭДС одной фазы (например, фазы А) принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС можно записать в виде

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned}$$



Из графика мгновенных значений (рис 3) следует

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

Комплексные действующие ЭДС будут иметь выражения:

$$\dot{E}_A = E_m e^{j0^\circ} = E_m(1+j0),$$

$$\dot{E}_B = E_m e^{-j120^\circ} = E_m(-1/2 - j\sqrt{3}/2),$$

$$\dot{E}_C = E_m e^{+j120^\circ} = E_m(-1/2 + j\sqrt{3}/2).$$

Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС показана на рис. 4а.

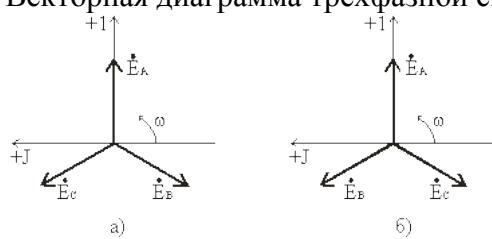


Рис. 4

На диаграмме рис. 4а вектор  $\dot{E}_A$  направлен вертикально, так как при расчете трехфазных цепей принято направлять вертикально вверх ось действительных величин. Из векторных диаграмм рис. 4 следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Систему ЭДС, в которой ЭДС фазы В отстает по фазе от ЭДС фазы А, а ЭДС фазы С по фазе – от ЭДС фазы В, называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз изменится (рис. 4б) и будет называться обратной.

Последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей. Для определения последовательности фаз имеются специальные приборы – фазоуказатели.

В период зарождения трехфазных систем имелись попытки использовать несвязанную систему, в которой фазы обмотки генератора не были электрически соединены между собой и каждая фаза соединялась со своим приемником двумя проводами (рис. 5). Такие системы не получили применения вследствие их неэкономичности: для соединения генератора с приемником требовалось шесть проводов (рис. 5)

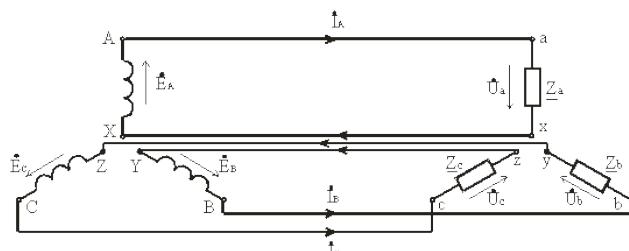


Рис. 3.5

Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения "звезда" и "треугольник". При этом способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены "звездой", фазы потребителей соединяются либо "звездой", либо "треугольником".

### Соединение фаз генератора и приемника звездой

При соединение фаз обмотки генератора (или трансформатора) звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну общую точку N, называемую нейтральной точкой (или нейтралью) (рис. 6). Концы фаз приемников ( $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ ) также соединяют в одну точку n. Такое соединение называется соединение звезды.

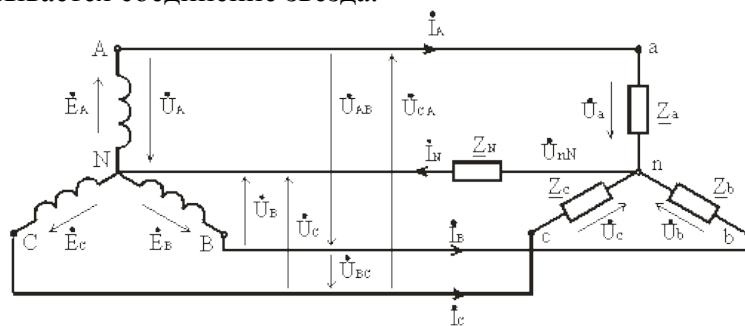


Рис. 6

Провода A–a, B–b и C–c, соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными, провод N–n, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, – нейтральным.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом будет четырехпроводной, без нейтрального провода – трехпроводной.

В трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. Фазное напряжение  $U_F$  – напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  у источника;  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ( $U_A=U_a$ ,  $U_B=U_b$ ,  $U_C=U_c$ ). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

Линейное напряжение ( $U_L$ ) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу (рис. 3.6).

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

- Фазные ( $I_F$ ) – это токи в фазах генератора и приемников.
- Линейные ( $I_L$ ) – токи в линейных проводах.

При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

$$I_F = I_L.$$

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают  $I_N$ .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n (N) имеем в комплексной форме

$$I_N = I_A + I_B + I_C.$$

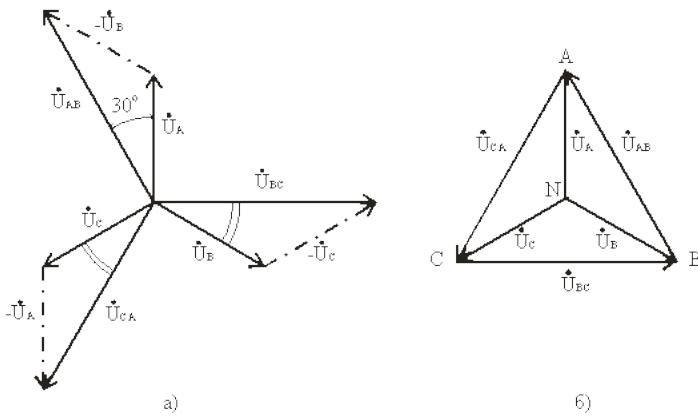


Рис. 7

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений можно записать уравнения по второму закону Кирхгофа.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Согласно этим выражениям на рис. 7а построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична:  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$  (общее обозначение  $U_L$ ), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ , ( $U_F$ ) на угол  $30^\circ$ .

Действующие значения линейных напряжений можно определить графически по векторной диаграмме, которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений:

$$U_L = 2U_\Phi \cos 30^\circ$$

или

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi.$$

Предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны между собой соотношениями:

$$U_L = 660\text{ В}; U_\Phi = 380\text{ В};$$

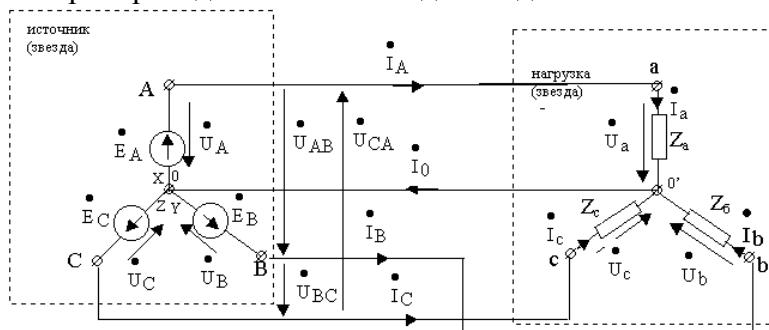
$$U_L = 380\text{ В}; U_\Phi = 220\text{ В};$$

$$U_L = 220\text{ В}; U_\Phi = 127\text{ В}.$$

Векторную диаграмму удобно выполнить топографической (рис. 3.7б), тогда каждой точке цепи соответствует определенная точка на диаграмме. Вектор, проведенный между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжение между одноименными точками цепи.

### 2.3 Расчет несимметричной трехфазной цепи при симметричной системе напряжений источника

Четырехпроводная схема “звезды-звезда”.



Здесь источник и нагрузку связывают не только три линейных провода, но и провод, соединяющий нулевые точки источника и приемника (нулевой провод). Ток в этом проводе называется нулевым и обозначается  $I_0$ .

В этой схеме фазные напряжения источника и приемника одинаковы, т.е.

$$\dot{U}_A = \dot{U}_a, \dot{U}_B = \dot{U}_b, \dot{U}_C = \dot{U}_c.$$

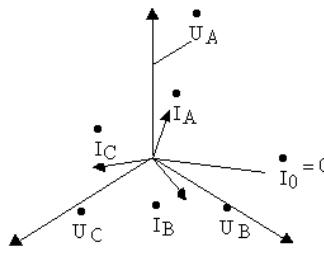
Линейные токи находятся на основании закона Ома как

$$\dot{I}_A = Y_a \dot{U}_A, \dot{I}_B = Y_b \dot{U}_B, \dot{I}_C = Y_c \dot{U}_C.$$

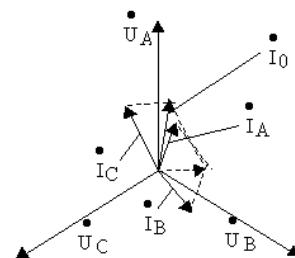
Ток в нулевом проводе находится на основании узлового уравнения Кирхгофа как сумма линейных токов

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

При симметричной нагрузке токи в фазах образуют симметричную систему токов и потому ток в нулевом проводе равен 0, т.е.  $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ . Этому случаю соответствует векторная диаграмма.



б).



в).

Рис. 1

При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен 0, т.е.  $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \neq 0$ . Этому случаю соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 1,в. В этом случае изменение сопротивления одной из фаз нагрузки влияет на ток только данной фазы и ток в нулевом проводе.

Трехпроводная схема “звезды-звезда” (рис. 2,а).

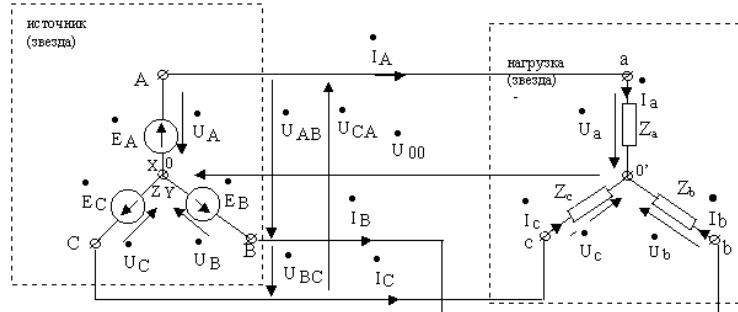


Рис. 2  
а)

В общем случае в этой схеме из-за отсутствия нулевого провода фазные напряжения приемника не равны фазным напряжениям источника и могут быть найдены на основании второго закона Кирхгофа по формулам

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_0, \quad \dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_0, \quad \dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_0,$$

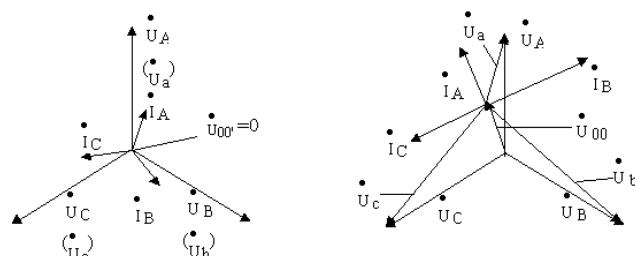
где  $\dot{U}_0$  – напряжение смещения нейтрали. В свою очередь последнее определяется как

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_A Y_a + \dot{E}_B Y_b + \dot{E}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

Фазные и соответствующие им линейные токи, а так же ток в нулевом проводе находим из следующих соотношений

$$\dot{I}_A = Y_a \dot{U}_a, \quad \dot{I}_B = Y_b \dot{U}_b, \quad \dot{I}_C = Y_c \dot{U}_c.$$

При симметричной нагрузке, когда  $Y_a = Y_b = Y_c$  напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_0 = 0$  и фазные напряжения источника и приемника одинаковы, как и в четырехпроводной схеме (см. векторную диаграмму на рис. 2,б).



При несимметричной нагрузке, когда  $Y_a \neq Y_b \neq Y_c$  напряжение смещения нейтрали  $\dot{U}_0 \neq 0$  и фазные напряжения источника и приемника различны.

Как видно при отсутствии нулевого провода изменение сопротивления одной из фаз приемника приводит к изменению напряжения  $\dot{U}_0$  и, как следствие, к изменению фазных напряжений и токов других фаз.

Заметим, что при обрыве нулевого провода в четырехпроводной схеме несимметрия нагрузки приводит к несимметрии фазных напряжений и к взаимовлиянию фаз. Вот почему предохранители никогда не ставят в нулевой провод.

## 2.4 Трехфазная цепь с несколькими приемниками, соединенными звездой

При расчете симметричных режимов трехфазных цепей двигатели можно заменять эквивалентными схемами, состоящими из трех одинаковых сопротивлений, соединенных звездой или треугольником. Падения напряжения в фазах генератора, если это необходимо, могут учитываться как напряжения на трех одинаковых сопротивлениях. Такие простые эквивалентные схемы для двигателей и такой простой учет падений напряжения в генераторах оказываются непригодными для расчета несимметричных режимов. Анализ процессов в трехфазных электрических машинах (двигателях и генераторах) при несимметричных режимах показывает, что для них справедливы более сложные эквивалентные схемы, не удовлетворяющие принципу взаимности. В настоящее время для расчета несимметричных режимов в трехфазных цепях с трехфазными двигателями почти исключительно пользуются специальным методом расчета - методом симметричных составляющих.

В этом параграфе ограничимся исследованием несимметричных режимов цепей при следующих двух условиях:

- 1) имеется только статическая нагрузка (нет электродвигателей);
  - 2) падения напряжения в фазах генератора не учитываются.
- При двух указанных ограничениях расчеты несимметричных режимов трехфазных цепей не содержат ничего принципиально нового и могут выполняться любыми методами, известными из предыдущих глав. Последующее содержание иллюстрирует это положение на ряде частных примеров.

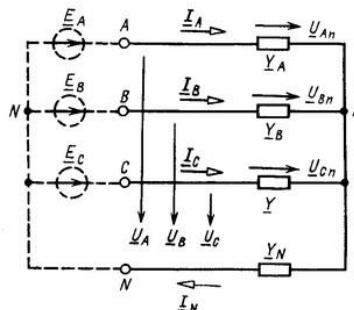


Рис. 16

Пусть заданы несимметричные фазные напряжения  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  на выводах несимметричного приемника (рис. 16). Определим токи. Заданные напряжения можно всегда приписать источникам ЭДС (показаны штриховой линией)

$$\underline{E}_A = \underline{U}_A; \underline{E}_B = \underline{U}_B; \underline{E}_C = \underline{U}_C.$$

В схеме два узла, поэтому целесообразно применить для расчета метод узловых потенциалов.

Обозначив напряжение между нейтральными точками приемника и источника питания через  $\underline{U}_{N^*}$ , найдем смещение нейтрали

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} \quad (10.9)$$

где  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_N$  – проводимости ветвей, и токи

$$\left. \begin{array}{l} \underline{I}_A = \underline{Y}_A (\underline{U}_A - \underline{U}_{nN}); \\ \underline{I}_B = \underline{Y}_B (\underline{U}_B - \underline{U}_{nN}); \\ \underline{I}_C = \underline{Y}_C (\underline{U}_C - \underline{U}_{nN}); \\ \underline{I}_N = \underline{Y}_N \underline{U}_{nN} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \end{array} \right\} \quad (10.10)$$

В предельном случае при  $\underline{Y}_N = \infty$  т.е.  $Z_N = 0$ , имеем  $\underline{U}_{nN} = 0$ , и, следовательно, напряжения на фазах приемника равны фазным напряжениям источника питания. При этом условии ток в каждой фазе может быть вычислен по закону Ома независимо от токов остальных фаз.

При отсутствии нейтрального провода расчет можно вести в таком же порядке. Изменится лишь выражение для напряжения  $\underline{U}_{nN}$ , поскольку  $\underline{Y}_N = 0$ , а именно

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (10.11)$$

Однако обычно при отсутствии нейтрального провода бывают заданы не фазные, а линейные напряжения на выводах цепи. Сумма линейных напряжений равна нулю как сумма напряжений вдоль замкнутого контура, соединяющего выводы А, В и С:  $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$

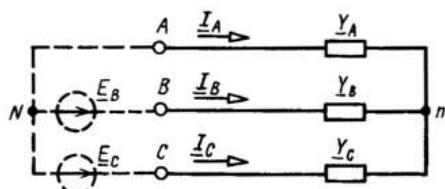


Рис. 17

Учитывая эту связь, достаточно задать два линейных напряжения. Можно, например, их задать двумя источниками напряжения (рис. 17) с ЭДС  $E_B = \underline{U}_{BA}$  и  $E_C = \underline{U}_{CA}$ . Так как в схеме рис. 17 потенциалы точек N и A одинаковы, то

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_B \underline{U}_{BA} + \underline{Y}_C \underline{U}_{CA}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (10.12)$$

$$\underline{I}_A = -\underline{Y}_A \underline{U}_{nN};$$

$$\underline{I}_B = \underline{Y}_B (E_B - \underline{U}_{nN}) = \underline{Y}_B (\underline{U}_{BA} - \underline{U}_{nN});$$

$$\underline{I}_C = \underline{Y}_C (E_C - \underline{U}_{nN}) = \underline{Y}_C (\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{nN}) = -\underline{I}_A - \underline{I}_B.$$

Рассмотрим простейшую схему с несимметричным приемником, соединенным треугольником (рис. 18). Если известны линейные напряжения между выводами А', В', С', к которым присоединены фазы приемника, то задача определения токов элементарно проста. Ток в каждой ветви треугольника определяется по закону Ома, а затем находятся токи в проводах питающей линии.

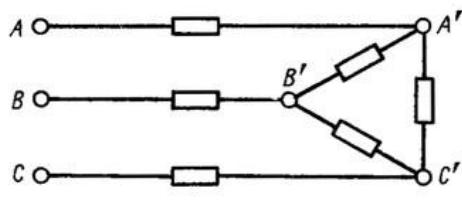


Рис. 18

Однако обычно бывают известны напряжения не на выводах приемника, а на выводах А, В, С источника питания, поэтому расчет несколько усложняется. Проще всего его провести, заменив треугольник сопротивлений эквивалентной звездой. В результате получается схема на рис. 17, и токи в ней рассчитываются, как указано выше. По найденным токам определяются напряжения на выводах треугольника в исходной схеме (рис. 18) и затем токи в ветвях треугольника.

К преобразованию схемы следует прибегать и в случае цепи с несколькими приемниками, имеющими различные схемы соединений. Так, например, при расчете токов в цепи, представленной на рис. 19, звезду 2 следует преобразовать в эквивалентный треугольник, ветви которого будут параллельны ветвям треугольника 3. После замены каждой пары параллельных ветвей треугольников одной ветвью получается рассмотренная выше схема (рис. 18).

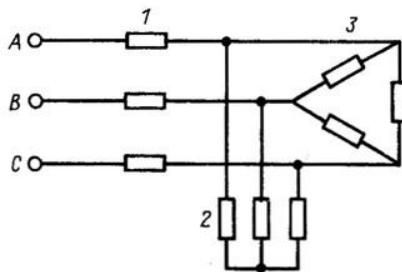


Рис. 19

Заметим, что преобразование треугольника 3 в звезду не дало бы возможности продолжить упрощение схемы. Потенциалы нейтральных точек получившейся звезды и звезды 2 в общем случае различны, и нейтральные точки этих звезд нельзя соединять друг с другом.

Если элементы цепи индуктивно связаны друг с другом, то расчет может быть выполнен, например, путем решения уравнений Кирхгофа, составленных для токов в ветвях или же для контурных токов. В ряде случаев целесообразно исключить индуктивные связи, перейдя к эквивалентным схемам.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

#### 3.1 Практическое занятие №1,2 - Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- уяснить принцип появления несимметрии в трехфазных цепях;
- рассмотреть принцип разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие.

### **3.2 Практическое занятие №3,4 - Степень несимметрии и мощность несимметричной трехфазной системы**

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- рассмотреть принцип оценки степени несимметрии в трехфазных цепях;
- рассмотреть принцип расчета мощности несимметричной трехфазной системы.

### **3.3 Практическое занятие №5,6 - Действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии**

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- рассмотреть действие трехфазной несимметричной системы напряжений на симметричный трехфазный приемник энергии.

### **3.4 Практическое занятие №7 - Нахождение токов короткого замыкания в симметричных трехфазных системах**

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- аварийные режимы в трехфазных сетях;
- виды короткого замыкания в трехфазных цепях;
- расчет токов короткого замыкания в трехфазных цепях.