

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»
Кафедра теоретической и общей электротехники

Н.Ю.УШАКОВА, Л.В.БЫКОВСКАЯ

ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ СО СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНСУЛЬТАЦИИ
К САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛА КУРСА ТОЭ
И К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Оренбург 2007

УДК 621.3.011.7
ББК 31.21я73
Б 95

Рецензент

кандидат технических наук, доцент Ю.А.Дормидонов

Б 95 **Ушакова Н.Ю.**

**Трёхфазные цепи со статической нагрузкой. [Текст]:
методические указания и консультации к самостоятельному
изучению раздела курса ТОЭ и к выполнению расчетно-
графического задания / Н.Ю.Ушакова, Л.В.Быковская. –
Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 48 с.**

ББК 31.21я73

© Ушакова Н.Ю., Быковская Л.В., 2007

© ГОУ ОГУ, 2007

Содержание

1 Основные сведения о трехфазных цепях.....	4
2 Расчетные соотношения для трехфазных цепей при различных схемах соединения.....	10
3 Задание к выполнению РГЗ.....	19
4 Пример расчета.....	22
5 Вопросы для самоконтроля.....	44
Список использованных источников.....	47

1 Основные сведения о трехфазных цепях

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют **фазой**, т.е. фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Совокупности ЭДС (напряжений, токов) в трехфазных цепях называют **трёхфазной системой ЭДС** (напряжений, токов).

Под **трёхфазной симметричной системой ЭДС** (напряжений, токов) понимают совокупность трёх синусоидальных ЭДС (напряжений, токов) одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° .

Мгновенные значения симметричной системы трёхфазных ЭДС можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} e_A = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ e_B = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{cases} \quad (1)$$

График мгновенных значений e_A , e_B , e_C представлен на рисунке 1.1.

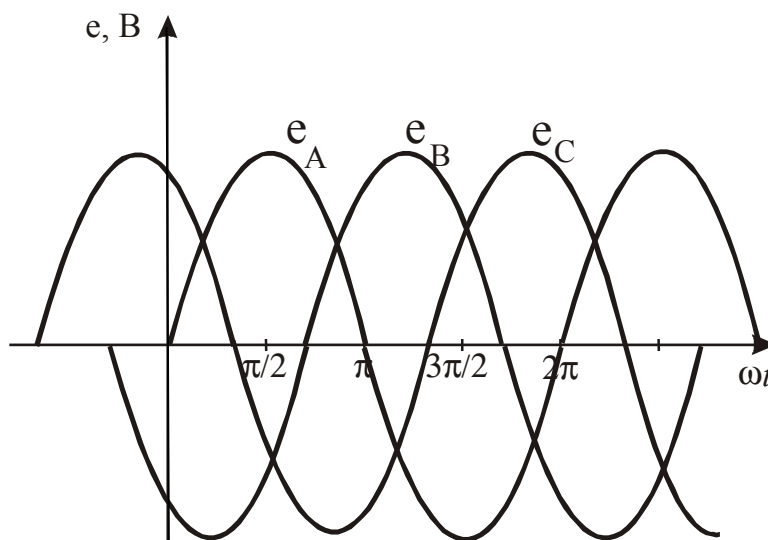


Рисунок 1.1

Комплексные действующие значения симметричной системы трёхфазных ЭДС

$$\dot{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot 0^\circ}, \quad \dot{E}_B = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}, \quad \dot{E}_C = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j \cdot 120^\circ} \quad (2)$$

Векторная диаграмма ЭДС представлена на рисунке 1.2.

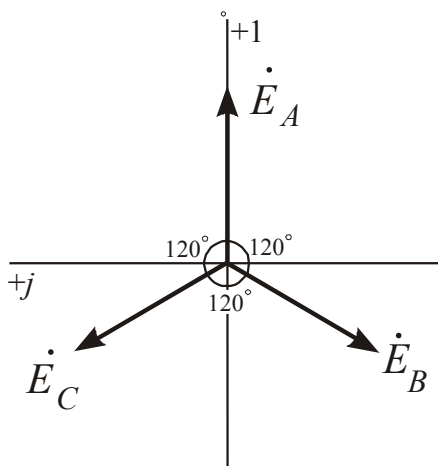


Рисунок 1.2

Для симметричной системы ЭДС (напряжений, токов) справедливо соотношение

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 \quad (3)$$

Основные схемы соединения обмоток генераторов, обмоток трансформаторов, нагрузки в трехфазных цепях – звезда и треугольник.

Каждую обмотку генератора называют **фазой генератора**, напряжения на них – **фазными напряжениями генератора**, токи в них – **фазными токами генератора**.

Каждую нагрузку называют **фазой нагрузки**, напряжения на них – **фазными напряжениями нагрузки**, токи в них – **фазными токами нагрузки**.

Провода, соединяющие генератор и нагрузку называются **линейными проводами**. Токи, текущие по линейным проводам называются **линейными**. **Линейное напряжение** – это напряжение между линейными проводами.

При соединении звездой точку, в которой объединены три обмотки генератора называют **нулевой точкой генератора**, точку в которой объединены три конца трёхфазной нагрузки - **нулевой точкой нагрузки**.

Провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки называется **нулевым или нейтральным проводом**, ток в нем – **током нулевого провода**. Напряжение между нулевыми точками называется **смещением нейтрали**.

Трехфазная цепь и трехфазная нагрузка называются **симметричными**, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы. В противном случае их называют несимметричными.

Если к симметричной трехфазной цепи приложена симметричная трехфазная система напряжений генератора, то в ней будет иметь место симметричная система токов. Режим работы трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны называется **симметричным режимом**.

На рисунке 1.3 приведена схема трехфазной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом.

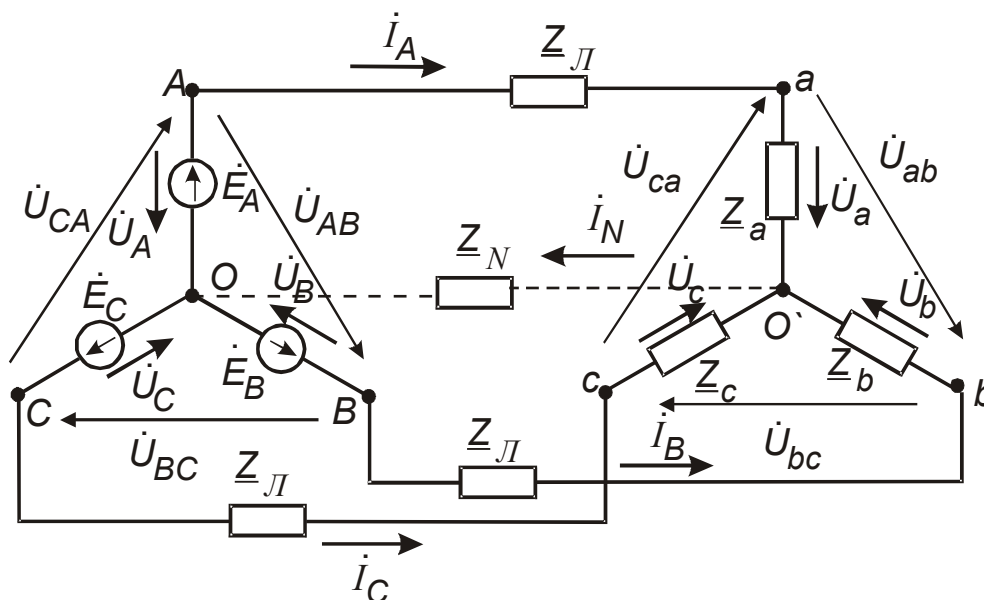


Рисунок 1.3

В схеме обозначены следующие **напряжения**, характеризующие работу трехфазной цепи при схемах соединения «звезда - звезда» и «звезда – звезда с нулевым проводом»:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;
- фазные напряжения нагрузки $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$;
- линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;
- линейные напряжения нагрузки $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$;
- $\dot{U}_{o'o}$ - смещение нейтрали.

Между собой линейные и фазные напряжения генератора связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \quad (4)$$

При симметричной системе напряжений генератора **модули** линейного и фазного напряжений отличаются друг от друга в $\sqrt{3}$ раз

$$U_{\ell} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \quad (5)$$

Таковыми же соотношениями связаны между собой линейные и фазные напряжения нагрузки.

Токи, обозначенные на рисунке 1.3:

- фазные (линейные) токи I_A, I_B, I_C ;
- ток нулевого провода I_N .

При соединении фаз звездой фазные токи равны соответствующим линейным токам:

$$I_{\phi} = I_{\ell} \quad (6)$$

На рисунке 1.4 приведена схема трехфазной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки треугольником

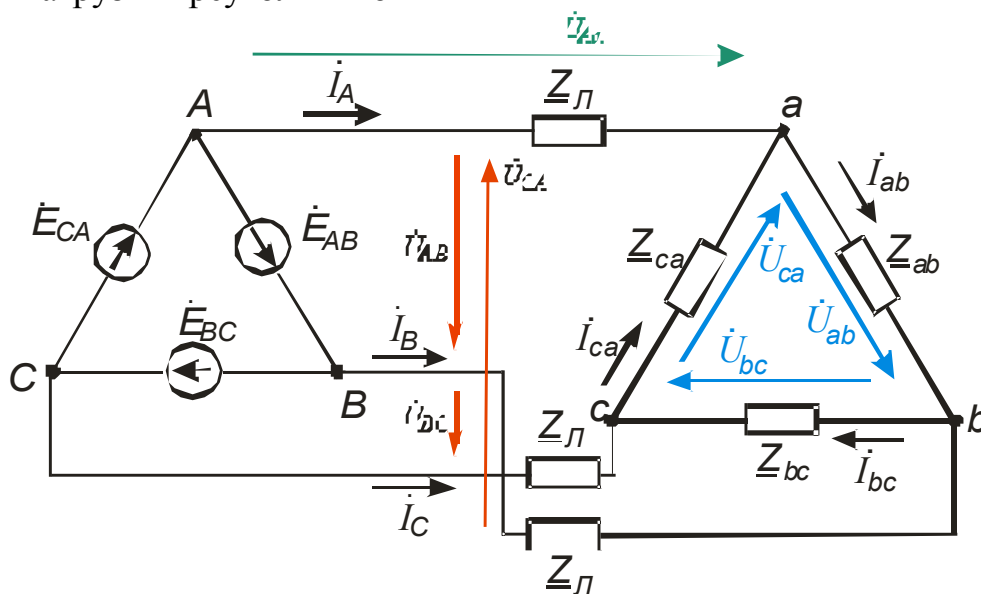


Рисунок 1.4

Работу трехфазной цепи в схеме соединения «треугольник – треугольник» характеризуют следующие **напряжения**, обозначенные на рисунке 1.4:

- фазные (линейные) напряжения генератора U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ;
- фазные (линейные) напряжения нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ;
- падения напряжения в линейных проводах U_{Aa}, U_{Bb}, U_{Cc} .

При соединении фаз треугольником соответствующие фазные и линейные напряжения равны:

$$\dot{U}_{\bar{e}} = \dot{U}_{\delta} \quad (7)$$

Токи в схеме соединения «треугольник – треугольник», обозначенные на рисунке 1.4:

- фазные токи генератора \dot{I}_{AB} , \dot{I}_{BC} , \dot{I}_{CA} ;
- фазные токи нагрузки \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} ;
- линейные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C .

Между собой линейные и фазные токи связаны соотношениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для симметричного режима работы трехфазной цепи **модули** линейного и фазного токов отличаются друг от друга в $\sqrt{3}$ раз

$$I_{\bar{e}} = \sqrt{3} \cdot I_{\delta} \quad (9)$$

Активная мощность трёхфазной цепи равна сумме активных мощностей фаз и активной мощности в сопротивлении, включенном в нулевой провод

$$P = P_{\dot{A}} + P_{\dot{A}} + P_{\dot{N}} + P_0 \quad (10)$$

Реактивная мощность трёхфазной цепи представляет собой сумму реактивных мощностей фаз и реактивной мощности в сопротивлении, включенном в нулевой провод

$$Q = Q_{\dot{A}} + Q_{\dot{A}} + Q_{\dot{N}} + Q_0 \quad (11)$$

Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (12)

Активная и реактивная мощности любой из фаз (например, фазы A) определяются как

$$P_{\dot{A}} = U_{\dot{A}} I_{\dot{A}} \cos \varphi_{\dot{A}} \quad (13)$$

$$Q_{\dot{A}} = U_{\dot{A}} I_{\dot{A}} \sin \varphi_{\dot{A}} \quad (14)$$

Для симметричного режима работы

$$P_0 = Q_0 = 0, \quad P_A = P_B = P_C \quad (15)$$

Следовательно

$$P = 3 \cdot P_{\delta} = 3 \cdot U_{\delta} \cdot I_{\delta} \cdot \cos \varphi_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{e}} \cdot I_{\bar{e}} \cdot \cos \varphi_{\delta} \quad (16)$$

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3 \cdot Q_{\delta} = 3 \cdot U_{\delta} \cdot I_{\delta} \cdot \sin \varphi_{\delta} = Q = \sqrt{3} \cdot U_{\varepsilon} \cdot I_{\varepsilon} \cdot \sin \varphi_{\delta} . \quad (17)$$

Полная мощность при симметричном режиме работы

$$S = 3 \cdot U_{\delta} \cdot I_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\varepsilon} \cdot I_{\varepsilon} . \quad (18)$$

При проверке правильности расчета токов целесообразно составлять баланс комплексных мощностей источника и потребителя.

Для симметричного режима работы полная комплексная мощность источника будет рассчитываться как

$$\tilde{S}_{\varepsilon\dot{\delta}} = 3 \cdot \dot{U}_{\delta} \cdot I_{\delta}^* , \quad (19)$$

где I_{δ}^* - сопряженный комплекс фазного тока.

Полная комплексная мощность потребителя

$$\tilde{S}_{\dot{\delta}\delta} = 3 |\dot{I}_{\delta}|^2 \cdot \underline{z}_{\delta} . \quad (20)$$

Для несимметричного режима работы:

- в четырехпроводной сети полная комплексная мощность источника

$$\tilde{S}_{\varepsilon\dot{\delta}} = \dot{U}_{A'} \cdot I_{A'}^* + \dot{U}_{B'} \cdot I_{B'}^* + \dot{U}_{C'} \cdot I_{C'}^* + \dot{U}_{O'O} \cdot I_N^* ; \quad (21)$$

- в четырехпроводной сети полная комплексная мощность потребителя

$$\tilde{S}_{\dot{\delta}\delta} = |\dot{I}_{A'}|^2 \cdot \underline{z}_{A'} + |\dot{I}_{B'}|^2 \cdot \underline{z}_{B'} + |\dot{I}_{C'}|^2 \cdot \underline{z}_{C'} + |\dot{I}_N|^2 \cdot \underline{z}_N ; \quad (22)$$

- в трехпроводной сети полная комплексная мощность источника

$$\tilde{S}_{\varepsilon\dot{\delta}} = \dot{U}_{A'} \cdot I_{A'}^* + \dot{U}_{B'} \cdot I_{B'}^* + \dot{U}_{C'} \cdot I_{C'}^* ; \quad (23)$$

- в трехпроводной сети полная комплексная мощность потребителя

$$\tilde{S}_{\dot{\delta}\delta} = |\dot{I}_{A'}|^2 \cdot \underline{z}_{A'} + |\dot{I}_{B'}|^2 \cdot \underline{z}_{B'} + |\dot{I}_{C'}|^2 \cdot \underline{z}_{C'} . \quad (24)$$

2 Расчетные соотношения для трехфазных цепей при различных схемах соединения

Таблица 2.1 – Расчетные соотношения для трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой

Величина или выполняемое действие	Критерий выбора алгоритма расчета для трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой	
	Симметричный режим работы	Несимметричный режим работы
Характеристика режима работы трехфазной цепи	<p><i>Симметричным называется режим работы трехфазной цепи, при котором трехфазные системы напряжений и токов симметричны. Имеет место в цепях, у которых:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Система напряжений на входе симметрична; 2. Комплексные сопротивления всех фаз одинаковы $\underline{z}_A = \underline{z}_B = \underline{z}_C = \underline{z}$. 	<p><i>Несимметричный режим работы трехфазной цепи возникает в трехфазной цепи в любом из перечисленных случаев:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Система напряжений на входе несимметрична; 2. Комплексные сопротивления всех фаз различны $\underline{z}_A \neq \underline{z}_B \neq \underline{z}_C$; 2. Система напряжений на входе несимметрична и сопротивления всех фаз различны
Смещение нейтрали	<p>При симметричном режиме работы смещение нейтрали равно нулю</p> $\dot{U}_{O'O} = 0$	<p>При несимметричном режиме работы в цепи появляется смещение нейтрали:</p> $\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}$ <p>где $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{z}_A}$, $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{z}_B}$, $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{z}_C}$.</p>

Величина или выполняемое действие	Симметричный режим работы	Несимметричный режим работы
<p align="center">Фазные и линейные токи</p>	$\dot{I}_{\delta} = \dot{I}_{\varepsilon} = \frac{\dot{E}_{\delta\tilde{a}}}{z_{\delta}} \quad \text{или} \quad \dot{I}_{\delta} = \dot{I}_{\varepsilon} = \frac{\dot{U}_{\delta\tilde{a}}}{z_{\delta}},$ <p>где $z_{\delta} = z_{\delta\tilde{a}} + z_{\varepsilon} + z_{\delta i}$,</p> <p>то есть</p> $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A},$ $\dot{I}_{\hat{A}} = \frac{\dot{U}_{\hat{A}}}{z_{\hat{A}}} = \dot{I}_A \cdot e^{-j120^{\circ}},$ $\dot{I}_{\tilde{N}} = \frac{\dot{U}_{\tilde{N}}}{z_{\tilde{N}}} = \dot{I}_A \cdot e^{j120^{\circ}}.$	$\dot{I}_{\delta} = \dot{I}_{\varepsilon} = \frac{\dot{E}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}}{z_{\delta}} = (\dot{E}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}) \cdot \underline{Y}_{\delta}$ <p>или</p> $\dot{I}_{\delta} = \dot{I}_{\varepsilon} = \frac{\dot{U}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}}{z_{\delta}} = (\dot{U}_{\delta} - \dot{U}_{O'O}) \cdot \underline{Y}_{\delta},$ <p>то есть</p> $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{z_A} = (\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}) \cdot \underline{Y}_A;$ $\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{z_B} = (\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}) \cdot \underline{Y}_B;$ $\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{z_C} = (\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}) \cdot \underline{Y}_C.$
<p align="center">Проверка правильности расчета токов</p>	$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$	$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

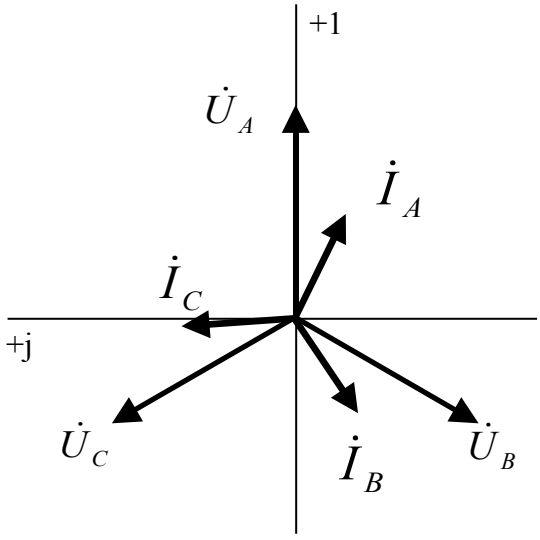
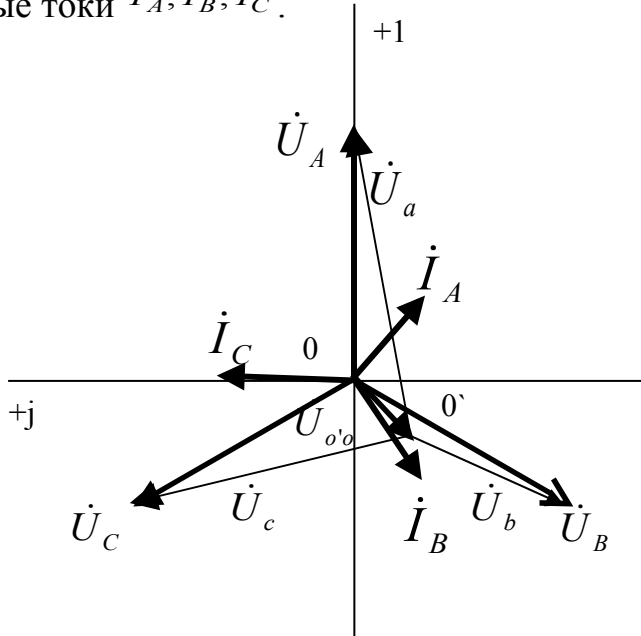
Величина или выполняемое действие	Симметричный режим работы	Несимметричный режим работы
<p>Последовательность построения векторной диаграммы</p>	<p>1) Фазные напряжения (или ЭДС) генератора: $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$; 2) Фазные токи $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$.</p> 	<p>1) Фазные напряжения (или ЭДС) генератора: $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$; 2) Смещение нейтрали $\dot{U}_{o'o}$; 3) Фазные напряжения нагрузки: $\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{o'o}$; $\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{o'o}$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{o'o}$; 4) Фазные токи $\dot{I}_A; \dot{I}_B; \dot{I}_C$.</p> 

Таблица 2.2 – Расчетные соотношения для трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом

Величина или выполняемое действие	Критерии выбора алгоритма расчета для трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом	
	Схема без сопротивления в нулевом проводе ($z_N = 0$)	Схема с сопротивлением в нулевом проводе ($z_N \neq 0$)
Смещение нейтрали	<p>При любом режиме работы цепи (симметричном или несимметричном) для схемы без сопротивления в нулевом проводе смещение нейтрали отсутствует:</p> $\dot{U}_{O'O} = 0.$	Симметричный режим работы
		<p>$\dot{U}_{O'O} = 0$. В целом алгоритм расчета такой же, как для схемы без сопротивления в нулевом проводе,</p> <p style="text-align: center;">←</p>
		Несимметричный режим работы
		<p>При несимметричном режиме работы появляется смещение нейтрали:</p> $\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$ <p>где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ - комплексные проводимости фаз</p> $\underline{Y}_A = \frac{1}{z_A}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{z_B}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{z_C},$ <p>\underline{Y}_N - комплексная проводимость нулевого провода</p> $\underline{Y}_N = \frac{1}{z_N}.$

Величина или выполняемое действие	Схема без сопротивления в нулевом проводе ($Z_N = 0$)	Схема с сопротивлением в нулевом проводе ($Z_N \neq 0$)
<p>Фазные и линейные токи</p>	$\dot{I}_\delta = \dot{I}_\varepsilon = \frac{\dot{E}_{\delta\tilde{a}}}{Z_\delta} \quad \text{или} \quad \dot{I}_\delta = \dot{I}_\varepsilon = \frac{\dot{U}_{\delta\tilde{a}}}{Z_\delta},$ <p>где $Z_\delta = Z_{\delta\tilde{a}} + Z_\varepsilon + Z_{oi}$,</p> <p>то есть</p> $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}, \quad \dot{I}_N = \frac{\dot{U}_N}{Z_N}.$	$\dot{I}_\delta = \dot{I}_\varepsilon = \frac{\dot{E}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}}{Z_\delta} = (\dot{E}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}) \cdot Y_\delta$ <p>или</p> $\dot{I}_\delta = \dot{I}_\varepsilon = \frac{\dot{U}_{\delta\tilde{a}} - \dot{U}_{O'O}}{Z_\delta} = (\dot{U}_\delta - \dot{U}_{O'O}) \cdot Y_\delta,$ <p>то есть</p> $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{Z_A} = (\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}) \cdot Y_A;$ $\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{Z_B} = (\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}) \cdot Y_B;$ $\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{Z_C} = (\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}) \cdot Y_C.$
<p>Ток в нулевом проводе</p>	$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$ <p>При симметричном режиме работы ток в нулевом проводе отсутствует</p> $\dot{I}_N = 0.$	$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{O'O}}{Z_N}.$ <p>При симметричном режиме работы ток в нулевом проводе отсутствует</p> $\dot{I}_N = 0.$

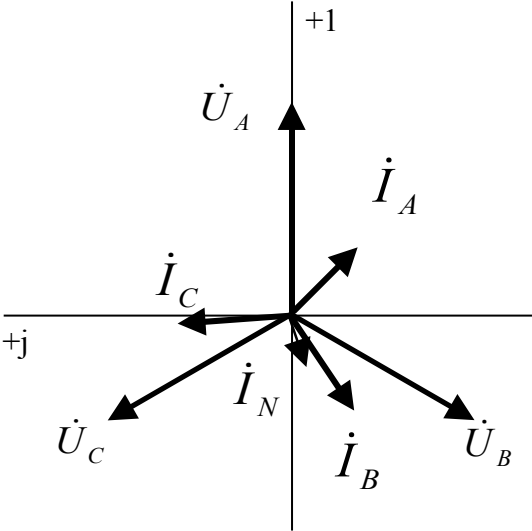
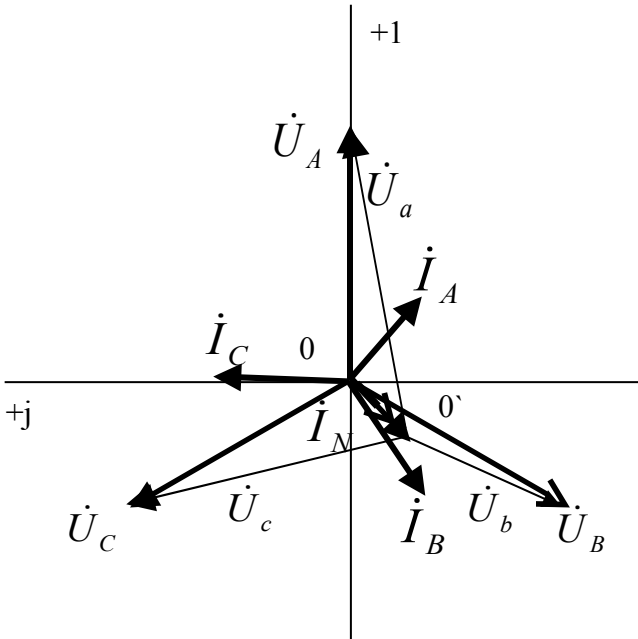
Величина или выполняемое действие	Схема без сопротивления в нулевом проводе ($Z_N = 0$)	Схема с сопротивлением в нулевом проводе ($Z_N \neq 0$)
<p>Последовательность построения векторной диаграммы</p>	<p>1) Фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;</p> <p>2) Фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$;</p> <p>3) Ток нулевого провода $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.</p> 	<p>1) Фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;</p> <p>2) Смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O}$;</p> <p>3) Фазные напряжения нагрузки $\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}$; $\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}$.</p> <p>4) Фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$;</p> <p>5) Ток нулевого провода $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.</p> 

Таблица 2.3 – Расчетные соотношения для трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

Критерии выбора алгоритма расчета для трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником	
Схема без сопротивления в линии ($z_{\dot{e}} = 0$)	Схема с сопротивлением в линии ($z_{\dot{e}} \neq 0$)
<p>При отсутствии сопротивления линии к фазам нагрузки приложены соответствующие линейные напряжения генератора</p> $\dot{I}_{\dot{o}i} = \frac{\dot{U}_{\dot{e}\dot{a}}}{z_{\dot{o}i}},$ <p>то есть $\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{\dot{A}\dot{A}}}{z_{ab}}; \dot{I}_{b\dot{n}} = \frac{\dot{U}_{\dot{A}\dot{N}}}{z_{b\dot{n}}}; \dot{I}_{\dot{n}a} = \frac{\dot{U}_{\dot{N}\dot{A}}}{z_{\dot{n}a}}.$</p> <p>Токи в линиях (линейные токи)</p> $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca};$ $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab};$ $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$	<p>При наличии сопротивления линии традиционно применяют следующий алгоритм расчёта:</p> <p>1) Преобразуют треугольник сопротивлений нагрузки в эквивалентную звезду</p> $z_a = \frac{z_{ab} z_{ca}}{z_{ab} + z_{bc} + z_{ca}}, \quad z_b = \frac{z_{bc} z_{ab}}{z_{ab} + z_{bc} + z_{ca}}, \quad z_c = \frac{z_{ca} z_{bc}}{z_{ab} + z_{bc} + z_{ca}}.$ <p>Для симметричной нагрузки $z_Y = \frac{z_{\Delta}}{3}.$</p> <p>2) В преобразованной схеме с нагрузкой, соединённой звездой, рассчитывают фазные (линейные) токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ (см. расчётные формулы в таблице 2.1);</p> <p>3) Определяют комплексные потенциалы ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c точек a, b, c, к которым присоединен треугольник сопротивлений нагрузки</p> $\phi_a = \dot{U}_A - \dot{I}_A z_E, \quad \phi_b = \dot{U}_B - \dot{I}_B z_E, \quad \phi_c = \dot{U}_C - \dot{I}_C z_E.$

Схема без сопротивления в линии ($z_l = 0$)	Схема с сопротивлением в линии ($z_l \neq 0$)
<p>При симметричном режиме работы</p> $I_l = \sqrt{3} \cdot I_\phi$	<p>4) Рассчитывают фазные токи в нагрузке</p> $\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b}{z_{ab}} ; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c}{z_{bc}} ; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a}{z_{ca}}$ <p>Для симметричной нагрузки</p> $I_{\phi n} = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$
<p>Последовательность построения векторной диаграммы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$; 2) Фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$; 3) Линейные токи (как разность соответствующих фазных токов) $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} ;$ $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} ;$ $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} .$	<p>Последовательность построения векторной диаграммы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Фазные напряжения (или ЭДС) генератора: $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$; 2) Потенциалы $\dot{\varphi}_a, \dot{\varphi}_b, \dot{\varphi}_c$; 3) Линейные напряжения на нагрузке $\dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a,$ <ol style="list-style-type: none"> 4) Фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$; 5) Линейные токи (как разность соответствующих фазных токов) $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} ;$ $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} ; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} .$

Схема без сопротивления в линии ($z_{л}=0$)

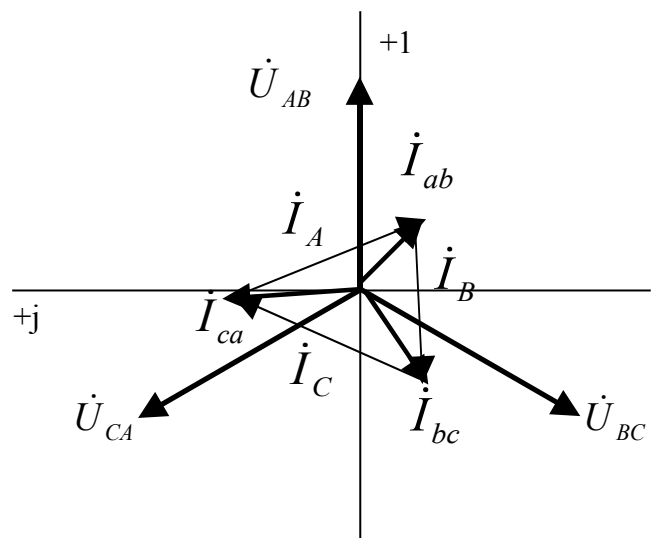
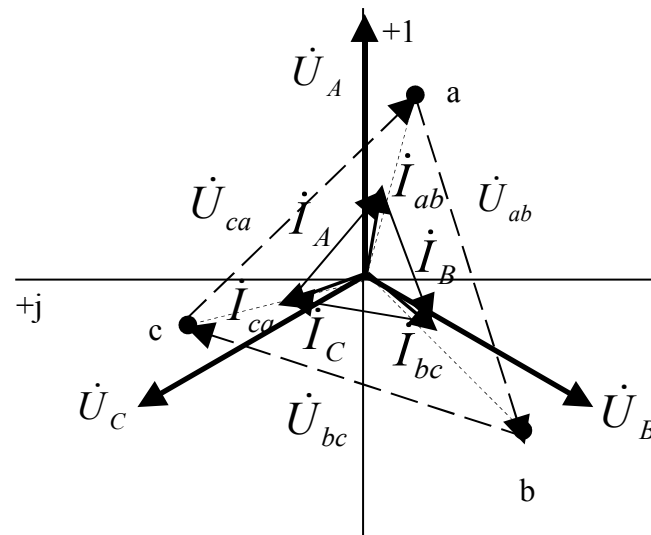


Схема с сопротивлением в линии ($z_{л} \neq 0$)



3 Задание к выполнению РГЗ

Для каждой из указанных в таблице 3.1 схем соединения трехфазной цепи с заданной симметричной системой напряжений на входе выполнить следующее:

- рассчитать токи в линии и фазные токи в нагрузке, ток нейтрального провода;
- проверить баланс комплексной мощности;
- построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Обмотки генератора соединены звездой. Известны фазное напряжение генератора $U_{\text{фг}}$, сопротивление линии $z_{\text{л}}$, сопротивления фаз нагрузки, сопротивление нейтрального провода z_{N} .

Параметры схемы выбираются из таблицы 3.2 по номеру студента в списке группы.

$U_{\text{фг}}$, $z_{\text{л}}$, z_{N} выбирается из таблицы 3.3 по номеру группы, который устанавливает преподаватель.

Таблица 3.1 - Схемы соединения трехфазной цепи:

№ с х е м ы	Схема соединения нагрузки	Характеристика нагрузки	Сопротивление нейтрального провода	Сопротивление линии
1	Звезда с нулевым проводом	Нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно z_{H}	$z_{\text{N}} = 0$	$z_{\text{л}} = 0$
2	Звезда с нулевым проводом	Нагрузка несимметричная, в указанной фазе сопротивление z_{H} заменяется на z_{H1}	$z_{\text{N}} = 0$	$z_{\text{л}} = 0$
3	Звезда с нулевым проводом	Обрыв указанной фазы нагрузки	$z_{\text{N}} = 0$	$z_{\text{л}} = 0$
4	Звезда с нулевым проводом	Нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно z_{H}	$z_{\text{N}} \neq 0$	$z_{\text{л}} = 0$
5	Звезда с нулевым проводом	Нагрузка несимметричная, в указанной фазе сопротивление z_{H} заменяется на z_{H1}	$z_{\text{N}} \neq 0$	$z_{\text{л}} = 0$

№ с х е м ы	Схема соединения нагрузки	Характеристика нагрузки	Сопротивление нейтрального провода	Сопротивление линии
6	Звезда	Нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно Z_H	-	$Z_L = 0$
7	Звезда	Нагрузка несимметричная, в указанной фазе сопротивление Z_H заменяется на Z_{H1}	-	$Z_L = 0$
8	Звезда	Обрыв указанной фазы нагрузки	-	$Z_L = 0$
9	Звезда	Короткое замыкание в указанной фазе сопротивления нагрузки	-	$Z_L = 0$
10	Треугольник	Нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно Z_H	-	$Z_L = 0$
11	Треугольник	Нагрузка несимметричная, в указанной фазе сопротивление Z_H заменяется на Z_{H1}	-	$Z_L = 0$
12	Треугольник	Обрыв указанной фазы нагрузки	-	$Z_L = 0$
13	Треугольник	Обрыв указанного линейного провода	-	$Z_L = 0$
14	Треугольник	Нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно Z_H	-	$Z_L \neq 0$
15	Треугольник	Нагрузка несимметричная, в указанной фазе сопротивление Z_H заменяется на Z_{H1}	-	$Z_L \neq 0$

Таблица 3.2 – Параметры схемы

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
\underline{Z}_H	R	jx_L	$-jx_C$	$R+jx_L$	$R-jx_C$	R	$j2x_L$	$-jx_C$	$R+jx_L$	$R-jx_C$	R	jx_L	$-jx_C$	$R+jx_L$
$R, x_L, x_C, \text{ Ом}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Фаза (для звезды)	A	B	C	A	B	B	C	A	B	C	C	A	B	C
\underline{Z}_{H1}	jx_L	R	R	$3R$	$3R$	$-jx_C$	$-jx_C$	$j2x_L$	$2R$	$2R$	$R+jx_L$	$2R$	$j3x_L$	R
Фаза (для треугольника)	ab	bc	ca	ab	bc	bc	ca	ab	bc	ca	ca	ab	bc	ca
Линейный провод	Aa	Bb	Cc	Aa	Bb	Bb	Cc	Aa	Bb	Cc	Cc	Aa	Bb	Cc

Вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
\underline{Z}_H	$R-jx_C$	R	jx_L	$-jx_C$	$R+jx_L$	$R-jx_C$	R	jx_L	$-jx_C$	$R+jx_L$	$R-jx_C$	R
$R, x_L, x_C, \text{ Ом}$	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Фаза (для звезды)	A	A	B	C	A	B	B	C	A	B	C	C
\underline{Z}_{H1}	R	$R-jx_C$	$-j3x_C$	$2R$	$-jx_C$	jx_L	$j2x_L$	$R-jx_C$	$R+jx_L$	$-j2x_C$	$j2x_L$	$-j2x_C$
Фаза (для треугольника)	ab	ab	bc	ca	ab	bc	bc	ca	ab	bc	ca	ca
Линейный провод	Aa	Aa	Bb	Cc	Aa	Bb	Bb	Cc	Aa	Bb	Cc	Cc

Таблица 3.3 – Расчетные параметры

	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа	6 группа	7 группа	8 группа	9 группа	10 группа
$U_{\phi z}, \text{ В}$	127	220	380	660	127	220	380	660	220	380
$\underline{Z}_N = R_N, \text{ Ом}$	5	7	9	10	12	14	15	16	18	20
$\underline{Z}_L = R_L + jx_L, \text{ Ом}$	10+10j	10+5j	5+10j	15+10j	15+15j	10+15j	12+8j	20+10j	10+18j	7+16j

4 Пример расчета

Исходные данные: $U_{\phi\epsilon} = 1000 \text{ В}$; $z_H = R + jx_L - jx_C$;
 $R = 100 \text{ Ом}$; $x_L = 100 \text{ Ом}$; $x_C = 50 \text{ Ом}$;
 $z_N = R_N = 120 \text{ Ом}$;
 $z_{II} = R_{II} + jx_{II} = 10 + j10 \text{ Ом}$;
 $z_{HI} = R + jx_L$;
 фаза (для звезды) – А;
 фаза (для треугольника) – ab;
 линейный провод – А.

4.1 Схема нагрузки – звезда с нулевым проводом (рисунок 4.1), нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно z_H , $z_N = 0$

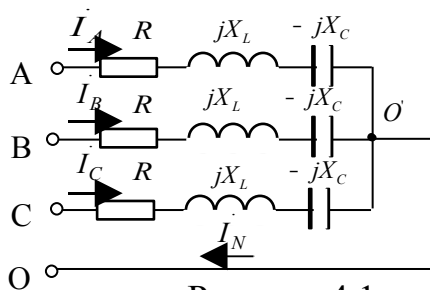


Рисунок 4.1

Смещение нейтрали отсутствует $\dot{U}_{O'O} = 0$.

Фазные токи равны линейным токам:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000}{100 + 50j} = 8,944e^{-j26,565^\circ} \text{ А} ;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_B} = \frac{\dot{U}_B}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{-j146,565^\circ} \text{ А} ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_C} = \frac{\dot{U}_C}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{j93,435^\circ} \text{ А} .$$

При симметричном режиме работы ток в нулевом проводе отсутствует $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\epsilon\tilde{n}\delta} = 3\dot{U}_A \cdot \bar{I}_A = 3 \cdot 1000 \cdot 8,944e^{-j26,565^\circ} = 24000 + 12000j \text{ АА} ;$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\tilde{n}\delta\delta} = 3|\dot{I}_A|^2 \cdot z_A = 3 \cdot 8,944^2 \cdot (100 + 50j) = 24000 + 12000j \text{ АА} .$$

$$\bar{S}_{\epsilon\tilde{n}\delta} = \bar{S}_{\tilde{n}\delta\delta} .$$

Порядок построения векторной диаграммы (рисунок 4.2):

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;
- фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_N$.

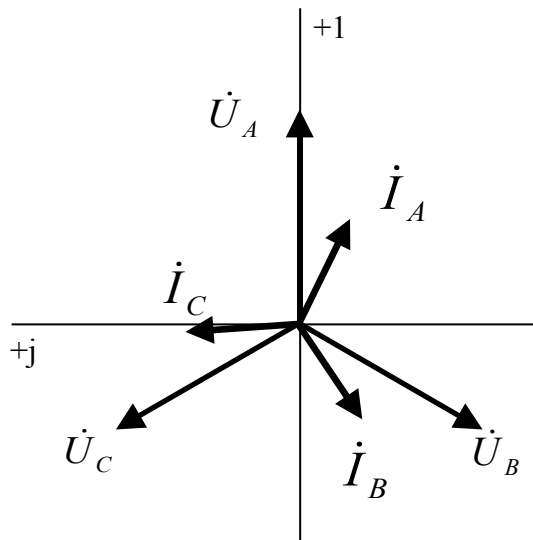
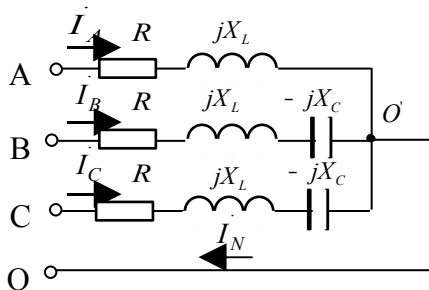


Рисунок 4.2

4.2 Схема нагрузки – звезда с нулевым проводом (рисунок 4.3), нагрузка несимметричная, в фазе A сопротивление z_H заменяется на $z_{H1}, z_N = 0$



Смещение нейтрали отсутствует $\dot{U}_{O'O} = 0$.

Фазные токи равны линейным токам :

Рисунок 4.3

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{R + jX_L} = \frac{1000}{100 + 100j} = 7,0771e^{-j45^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_B} = \frac{\dot{U}_B}{R + jX_L - jX_C} = \frac{1000e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{-j146,565^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_C} = \frac{\dot{U}_C}{R + jX_L - jX_C} = \frac{1000e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{j93,435^\circ} A$$

Ток нулевого провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3,162e^{-j161,565^\circ} A$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \dot{U}_A \cdot \bar{I}_A + \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = 1000 \cdot 7,0771e^{j45^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 8,944e^{j146,565^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 8,944e^{-j93,435^\circ} = 21000 + 13000j \text{ } \dot{A}\dot{A};$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\dot{i}\dot{o}\dot{o}} = |\dot{I}_A|^2 \cdot \underline{z}_A + |\dot{I}_B|^2 \cdot \underline{z}_B + |\dot{I}_C|^2 \cdot \underline{z}_C = 7,0771^2 \cdot (100 + 100j) + 8,944^2 \cdot (100 + 50j) + 8,944^2 \cdot (100 + 50j) = 21000 + 13000j \text{ } \dot{B}\dot{A}.$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{i}\dot{o}\dot{o}}.$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$;

- ток нулевого провода (строится как сумма фазных токов) $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

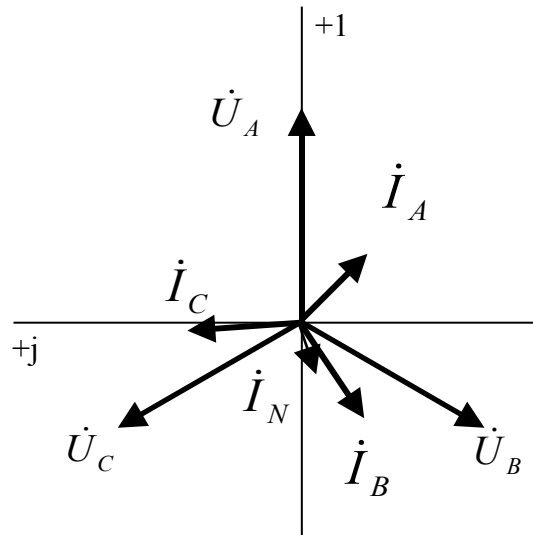
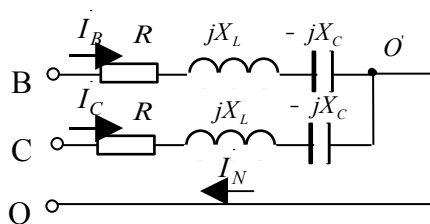


Рисунок 4.4

4.3 Схема нагрузки – звезда с нулевым проводом (рисунок 4.5), несимметричный режим, обрыв фазы А, $\underline{z}_N = 0$



Смещение нейтрали отсутствует $\dot{U}_{O'O} = 0$.

Фазные токи равны линейным токам:

Рисунок 4.5

$$\dot{I}_A = 0;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{z}_B} = \frac{\dot{U}_B}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{-j146,565^\circ} A;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{z}_C} = \frac{\dot{U}_C}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 8,944e^{j93,435^\circ} A.$$

Ток нулевого провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_B + \dot{I}_C = 8,944e^{j153,435^\circ} A.$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\text{ген}} &= \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = \\ &+ 1000e^{-j120^\circ} \cdot 8,944e^{j146,565^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 8,944e^{-j93,435^\circ} = 16000 + 8000j \text{ ВА}; \end{aligned}$$

- мощность потребителей

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\text{пот}} &= |\dot{I}_B|^2 \cdot \underline{z}_B + |\dot{I}_C|^2 \cdot \underline{z}_C = 7,0771^2 \cdot (100 + 100j) + \\ &+ 8,944^2 \cdot (100 + 50j) + 8,944^2 \cdot (100 + 50j) = 16000 + 8000j \text{ ВА}. \end{aligned}$$

$$\bar{S}_{\text{ген}} = \bar{S}_{\text{пот}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- фазные токи \dot{I}_A, \dot{I}_N ;

- ток нулевого провода (строится как сумма фазных токов) $\dot{I}_N = \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

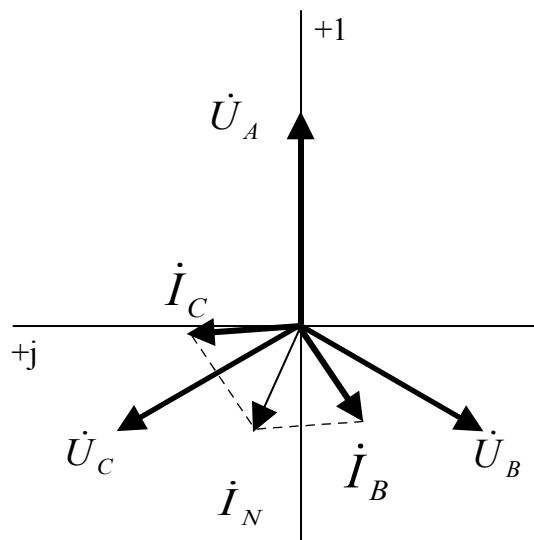


Рисунок 4.6

4.4 Схема нагрузки – звезда с нулевым проводом (рисунок 4.7), нагрузка несимметричная, в фазе А сопротивление \underline{z}_H заменяется на \underline{z}_{H1} , \underline{z}_N # 0

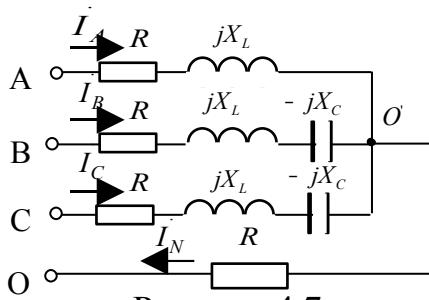


Рисунок 4.7

Смещение нейтрали

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

где $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{z}_A} = 0,007071e^{-j45^\circ} \text{ Ci}$; $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{z}_B} = 0,008944e^{-j26,565^\circ} \text{ Ci}$;

$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{z}_C} = 0,008944e^{-j26,565^\circ} \text{ Ci}$;

$\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{z}_N} = 0,00833\tilde{N}i$.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{O'O} &= \frac{1000 \cdot 0,0070e^{-j45^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ}}{0,0070e^{-j45^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,00833} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ 1000e^{j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ}}{0,0070e^{-j45^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,00833} = 98,56e^{-j137,663^\circ} \text{ В} . \end{aligned}$$

Фазные токи равны линейным токам:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_A} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L} = \frac{1000 - 98,56e^{-j137,663^\circ}}{100 + 100j} = 7,601e^{-j41,46^\circ} \text{ A}$$
 ;

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ} - 98,56e^{-j137,663^\circ}}{100 + 50j} = 8,109e^{-j144,675^\circ} \text{ A}$$
 ;

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_C} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ} - 98,56e^{-j137,663^\circ}}{100 + 50j} = 9,173e^{j88,048^\circ} \text{ A}$$
 .

Ток нулевого провода

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,821e^{-j137,663^\circ} \text{ A}$$
 .

Проверка $\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_N} = 0,821e^{-j137,663^\circ} \text{ A}$.

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\text{ген}} &= \dot{U}_A \cdot \bar{I}_A + \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_c + \dot{U}_{O'O} \cdot \bar{I}_N = 1000 \cdot 7,601 e^{j41,46^\circ} + \\ &+ 1000 e^{-j120^\circ} \cdot 8,109 e^{j144,675^\circ} + 1000 e^{j120^\circ} \cdot 9,173 e^{-j88,048^\circ} \\ &+ 98,56 e^{-j137,663^\circ} \cdot 0,821 e^{j137,663^\circ} = 20850 + 13270 j \text{ ВА}; \end{aligned}$$

- мощность потребителей

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\text{пот}} &= |\dot{I}_A|^2 \cdot \underline{z}_A + |\dot{I}_B|^2 \cdot \underline{z}_B + |\dot{I}_C|^2 \cdot \underline{z}_C + |\dot{I}_N|^2 \cdot \underline{z}_N = 7,601^2 \cdot (100 + 100j) + \\ &+ 8,109^2 \cdot (100 + 50j) + 9,173^2 \cdot (100 + 50j) + 0,821^2 \cdot 120 = 20850 + 13270 j \text{ ВА}. \quad \bar{S}_{\text{ген}} = \bar{S}_{\text{пот}} \end{aligned}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O}$;

- фазные напряжения нагрузки

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}.$$

- фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$;

- ток нулевого провода $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

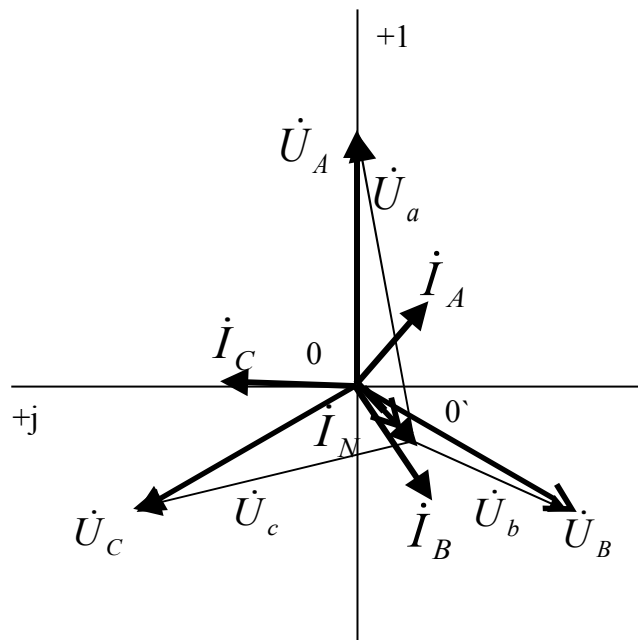
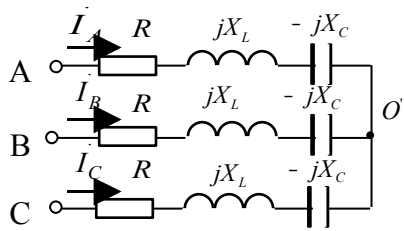


Рисунок 4.8

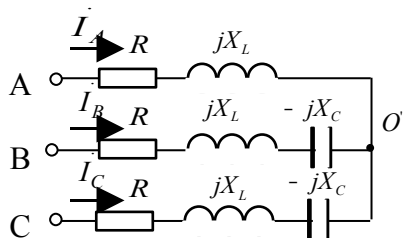
4.5 Схема нагрузки – звезда (рисунок 4.9), нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно z_H



Расчет и векторная диаграмма такие же, как в п.4.1

Рисунок 4.9

4.6 Схема нагрузки – звезда (рисунок 4.10), нагрузка несимметричная, в фазе А сопротивление z_H заменяется на z_{H1}



Смещение нейтрали

Рисунок 4.10

$$\begin{aligned} \dot{U}_{O'O} &= \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ &= \frac{1000 \cdot 0,0070e^{-j45^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ} +}{0,0070e^{-j45^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ}} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ 1000e^{j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ}}{0,0070e^{-j45^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ}} = 128,037e^{-j129,806^\circ} \text{ В} . \end{aligned}$$

Фазные токи равны линейным токам:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{z_A} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L} = \frac{1000 - 128,037e^{-j129,806^\circ}}{100 + 100j} = 7,682e^{-j39,806^\circ} \text{ А} ;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{z_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ} - 128,037e^{-j129,806^\circ}}{100 + 50j} = 7,818e^{-j145,136^\circ} \text{ А} ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{z_C} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ} - 128,037e^{-j129,806^\circ}}{100 + 50j} = 9,401e^{j86,87^\circ} \text{ А} .$$

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

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\text{ген}} = \dot{U}_A \cdot \bar{I}_A + \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = 1000 \cdot 7,682 e^{j39,806^\circ} + \\ + 1000 e^{-j120^\circ} \cdot 7,818 e^{j145,136^\circ} + 1000 e^{j120^\circ} \cdot 9,401 e^{-j86,87^\circ} = 20850 + 13380j \text{ ВА};$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\text{пот}} = |\dot{I}_A|^2 \cdot \underline{Z}_A + |\dot{I}_B|^2 \cdot \underline{Z}_B + |\dot{I}_C|^2 \cdot \underline{Z}_C = 7,682^2 \cdot (100 + 100j) + \\ + 7,818^2 \cdot (100 + 50j) + 9,401^2 \cdot (100 + 50j) = 20850 + 13380j \text{ ВА}. \quad \bar{S}_{\text{ген}} = \bar{S}_{\text{пот}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O}$;

- фазные напряжения нагрузки

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}.$$

- фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$;

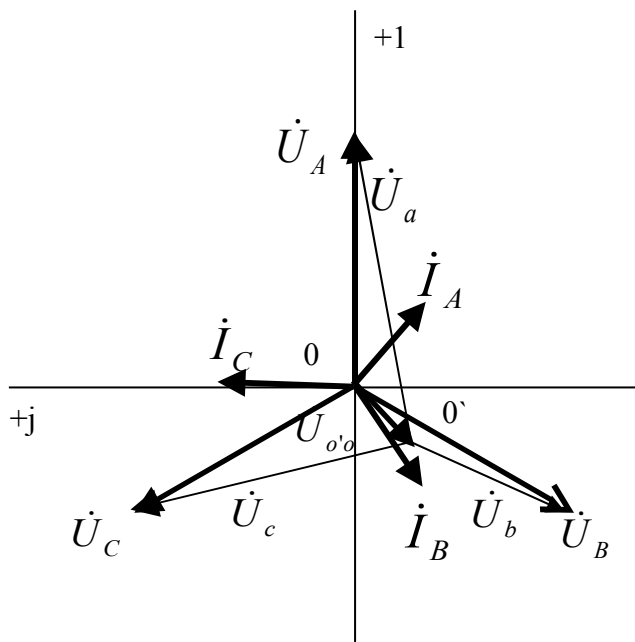


Рисунок 4.11

4.7 Схема нагрузки – звезда (рисунок 4.12), несимметричный режим, обрыв фазы А

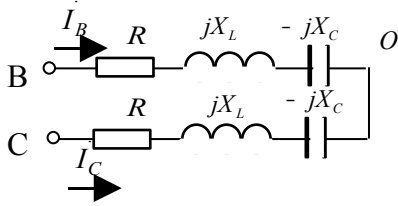


Рисунок 4.12

Смещение нейтрали

$$\begin{aligned} \dot{U}_{O'O} &= \frac{\dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ &= \frac{1000e^{-j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 0,0089e^{-j26,565^\circ}}{0,0089e^{-j26,565^\circ} + 0,0089e^{-j26,565^\circ}} = 500e^{j180^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

Фазные токи равны линейным токам:

$$\dot{I}_A = 0 \text{ А,}$$

$$\dot{I}_B = \frac{U_B - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ} - 500e^{j180^\circ}}{100 + 50j} = 7,746e^{-j116,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{U_C - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_C} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ} - 500e^{j180^\circ}}{100 + 50j} = 7,746e^{j63,435^\circ} \text{ А}$$

Проверка $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$.

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} &= \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = 1000e^{-j120^\circ} \cdot 7,746e^{-j116,565^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 7,746e^{-j63,435^\circ} = \\ &= 12000 + 6000j \text{ ВА}; \end{aligned}$$

- мощность потребителей

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\dot{n}\dot{o}\dot{o}} &= \dot{I}_B^2 \cdot \underline{z}_B + \dot{I}_C^2 \cdot \underline{z}_C = 7,746^2 \cdot (100 + 50j) + 7,746^2 \cdot (100 + 50j) = \\ &= 12000 + 6000j \text{ ВА.} \end{aligned}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{n}\dot{o}\dot{o}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

-фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O}$;
- фазные напряжения нагрузки $\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}$.
- фазные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B .

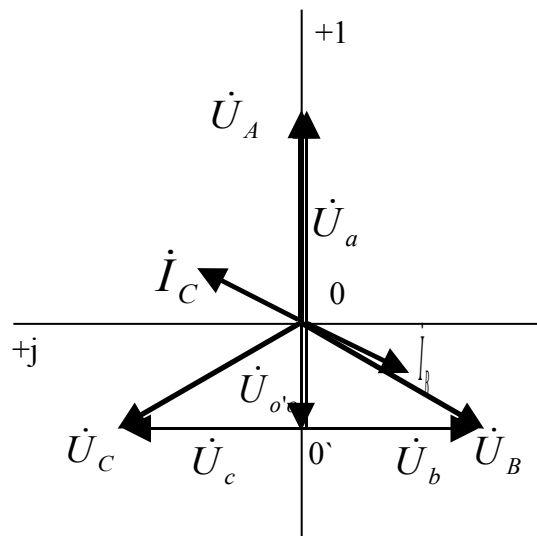
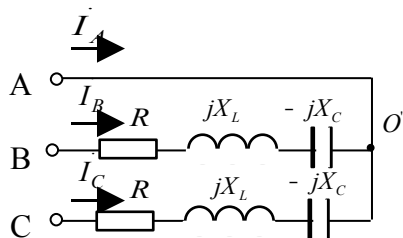


Рисунок 4.13

4.8 Схема нагрузки – звезда (рисунок 4.14), несимметричный режим, короткое замыкание нагрузки фазы А



Смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O} = \dot{U}_A$

Рисунок 4.14

Фазные токи равны линейным токам:

$$\dot{I}_B = \frac{U_B - \dot{U}_{O'O}}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_A}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{-j120^\circ} - 1000}{100 + 50j} = 15,492e^{-j176,565^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{U_C - \dot{U}_{O'O}}{Z_C} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_A}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1000e^{j120^\circ} - 1000}{100 + 50j} = 15,492e^{j123,435^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_A = -(\dot{I}_B - \dot{I}_C) = 26,833e^{-j26,565^\circ} A .$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\text{вн}} &= \dot{U}_A \cdot \bar{I}_A + \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = 1000 \cdot 26,833e^{j26,565^\circ} + \\ &+ 1000e^{-j120^\circ} \cdot 15,492e^{j176,565^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 15,492e^{-j123,435^\circ} = 48000 + 24000j \hat{A}\hat{A}; \end{aligned}$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\dot{i}\dot{o}\dot{o}} = |I_B|^2 \cdot Z_B + |I_C|^2 \cdot Z_C = 15,492^2 \cdot (100 + 50j) + 15,492^2 \cdot (100 + 50j) = 48000 + 24000j \text{ VA}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{i}\dot{o}\dot{o}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения генератора $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$;

- смещение нейтрали $\dot{U}_{O'O}$;

- фазные напряжения нагрузки $\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}$;

- фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$.

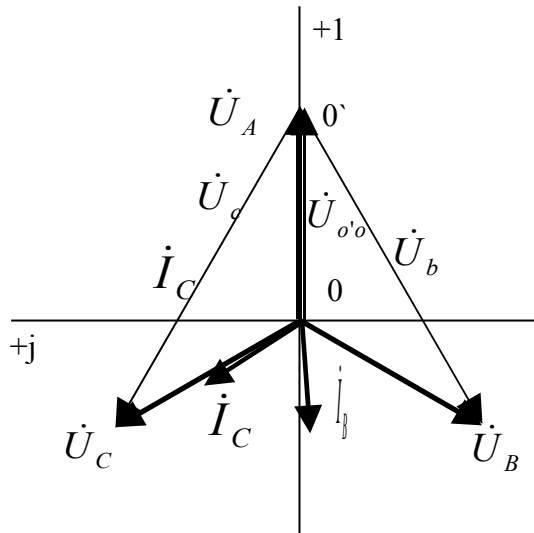


Рисунок 4.15

4.9 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.16), нагрузка симметричная, сопротивление каждой фазы нагрузки равно Z_H , $Z_{II} = 0$

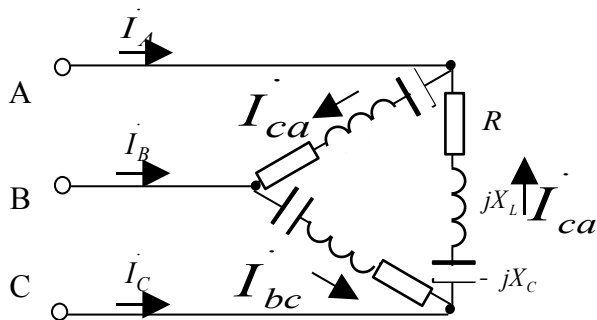


Рисунок 4.16

Линейное напряжение
Фазные токи нагрузки:

$$U_E = \sqrt{3} \cdot U_E = \sqrt{3} \cdot 1000 = 1732 \text{ В}$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{z}_{ab}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732}{100 + 50j} = 15,492e^{-j26,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{z}_{bc}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{-j146,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{z}_{ca}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{j93,435^\circ} \text{ А}$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 15,492e^{-j26,565^\circ} - 15,492e^{j93,435^\circ} = 26,833e^{-j56,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 15,492e^{-j146,565^\circ} - 15,492e^{-j26,565^\circ} = 26,833e^{-j176,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 15,492e^{j93,435^\circ} - 15,492e^{-j146,565^\circ} = 26,833e^{-j63,435^\circ} \text{ А}$$

Проверка $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\text{енд}} = 3\dot{U}_{AB} \cdot \bar{I}_{ab} = 3 \cdot 1732 \cdot 15,492e^{j26,565^\circ} = 72000 + 36000j \text{ ВА};$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\text{пдд}} = 3|\dot{I}_{ab}|^2 \cdot \underline{z}_{ab} = 3 \cdot 15,492^2 \cdot (100 + 50j) = 72000 + 36000j \text{ ВА}$$

$$\bar{S}_{\text{енд}} = \bar{S}_{\text{пдд}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;
- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$;
- линейные токи (как разность соответствующих фазных токов)
 $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$.

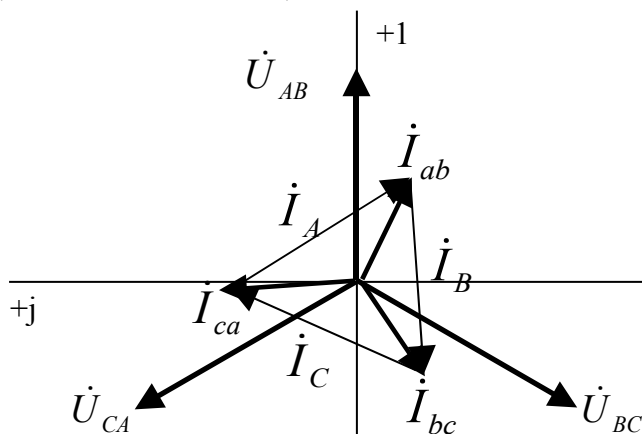
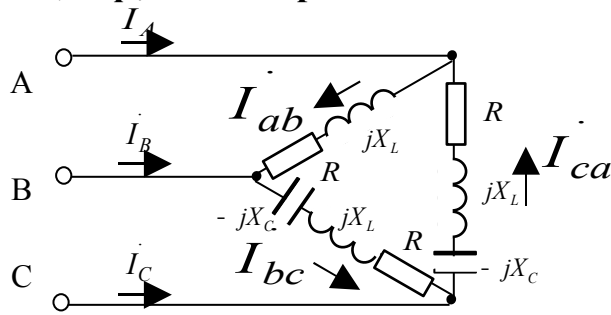


Рисунок 4.17

4.10 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.18), несимметричный режим, в фазе аб сопротивление z_H заменяется на z_{H1} , $z_L = 0$



Линейное напряжение
 $U_E = \sqrt{3} \cdot U_E = \sqrt{3} \cdot 1000 = 1732 \text{ В}$

Рисунок 4.18

Фазные токи нагрузки

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{z_{ab}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{R + jx_L} = \frac{1732}{100 + 100j} = 12,247e^{-j45^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{z_{bc}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{-j146,565^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{z_{ca}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{j93,435^\circ} \text{ A}$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 12,247e^{-j45^\circ} - 15,492e^{j93,435^\circ} = 25,96e^{-j68,324^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 15,492e^{-j146,565^\circ} - 12,247e^{-j45^\circ} = 21,589e^{-j179,67^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 15,492e^{j93,435^\circ} - 15,492e^{-j146,565^\circ} = 26,833e^{-j63,435^\circ} \text{ A}$$

Проверка $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \dot{U}_{AB} \cdot \bar{I}_{ab} + \dot{U}_{BC} \cdot \bar{I}_{bc} + \dot{U}_{CA} \cdot \bar{I}_{ca} = 1732 \cdot 12,247e^{j45^\circ} + 1732e^{-j120^\circ} \cdot 15,492e^{j146,565^\circ} + 1732e^{j120^\circ} \cdot 15,492e^{-j93,435^\circ} = 63000 + 39000j \text{ ВА}$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\dot{i}\dot{i}\dot{o}} = |\dot{I}_{ab}|^2 \cdot z_{ab} + |\dot{I}_{bc}|^2 \cdot z_{bc} + |\dot{I}_{ca}|^2 \cdot z_{ca} = 12,247^2 \cdot (100 + 100j) + 15,492^2 \cdot (100 + 50j) + 15,492^2 \cdot (100 + 50j) = 63000 + 39000j \text{ ВА}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{i}\dot{i}\dot{o}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;

- фазные токи нагрузки \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bn} , \dot{I}_{na} ;
- линейные токи (как разность соответствующих фазных токов)
 $\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$.

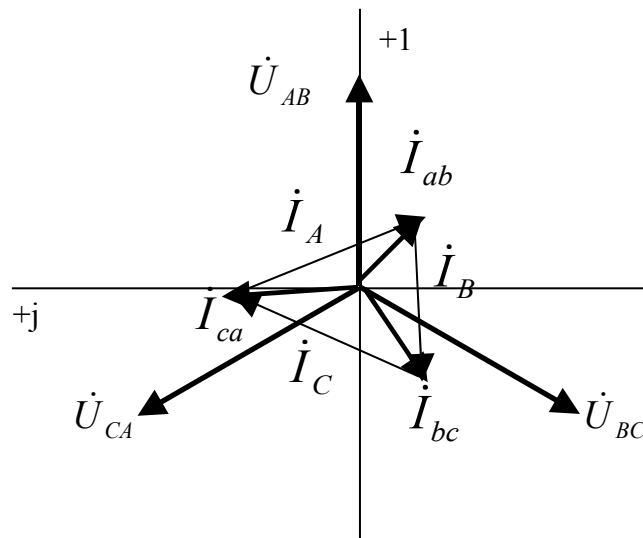
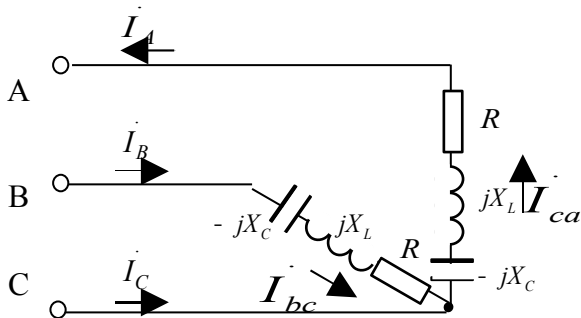


Рисунок 4.19

4.11 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.20), несимметричный режим, обрыв фазы нагрузки ab , $Z_{I} = 0$



Линейное напряжение

$$U_E = \sqrt{3} \cdot U_E = \sqrt{3} \cdot 1000 = 1732 \text{ В}$$

Рисунок 4.20

Фазные токи нагрузки:

$$\dot{I}_{ab} = 0 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{bc}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R + jX_L - jX_C} = \frac{1732e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{-j146,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{ca}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{R + jX_L - jX_C} = \frac{1732e^{j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{j93,435^\circ} \text{ А}$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ca} = 15,492e^{j93,435^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} = 15,492e^{-j146,565^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 15,492e^{j93,435^\circ} - 15,492e^{-j146,565^\circ} = 26,833e^{-j63,435^\circ} \text{ А}$$

Проверка $-I_A + I_B + I_C = 0$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\text{ген}} = \dot{U}_{AB} \cdot \bar{I}_{ab} + \dot{U}_{BC} \cdot \bar{I}_{bc} + \dot{U}_{CA} \cdot \bar{I}_{ca} = 1732 \cdot 0 + 1732e^{-j120^\circ} \cdot 15,492e^{j146,565^\circ} + 1732e^{j120^\circ} \cdot 15,492e^{-j93,435^\circ} = 48000 + 24000j \text{ ВА};$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\text{наг}} = |I_{bc}|^2 \cdot Z_{bc} + |I_{ca}|^2 \cdot Z_{ca} = 15,492^2 \cdot (100 + 50j) + 15,492^2 \cdot (100 + 50j) = 48000 + 24000j \text{ ВА}.$$

$$\bar{S}_{\text{ген}} = \bar{S}_{\text{наг}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;
- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{bn}, \dot{I}_{na}$;
- линейные токи $I_A = I_{ca}$; $I_B = I_{bc}$; $I_C = I_{ca} - I_{bc}$.

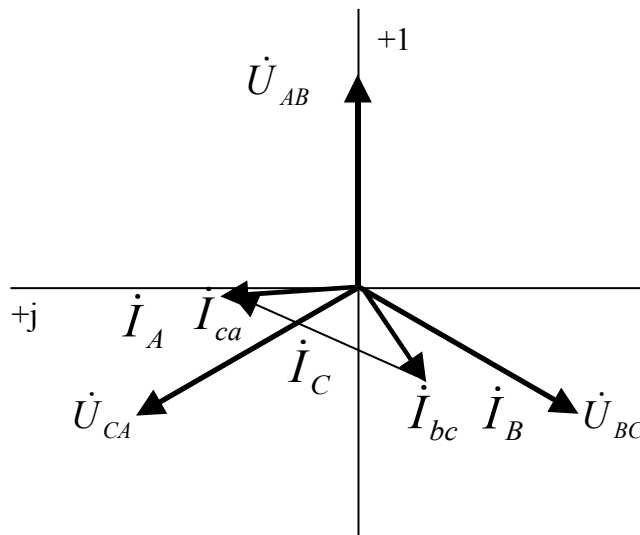
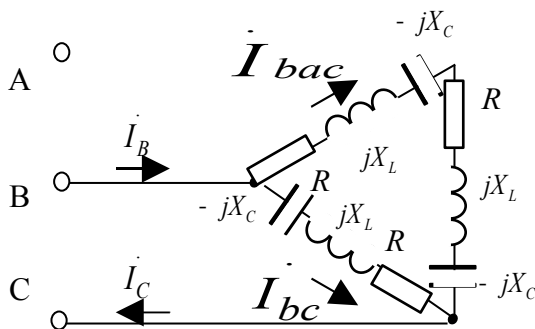


Рисунок 4.21

4.12 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.22), несимметричный режим, обрыв линейного провода а, $Z_L = 0$



Линейное напряжение
 $U_E = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}} = \sqrt{3} \cdot 1000 = 1732 \text{ В}$

Рисунок 4.22

Фазные токи нагрузки:

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{z}_{bc}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{R + jx_L - jx_c} = \frac{1732e^{-j120^\circ}}{100 + 50j} = 15,492e^{-j146,565^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{bac} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{z}_{ab} + \underline{z}_{ca}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{2R + j2x_L - j2x_c} = \frac{1732e^{j120^\circ}}{200 + 100j} = 7,746e^{-j146,565^\circ} \text{ A}$$

Линейные токи

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{bac} = 15,492e^{-j146,565^\circ} + 7,746e^{-j146,565^\circ} = 23,238e^{-j146,565^\circ} \text{ A}$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} &= \dot{U}_{BC} \cdot \bar{I}_{bc} + \dot{U}_{BC} \cdot \bar{I}_{bac} = 1732e^{-j120^\circ} \cdot 15,492e^{j146,565^\circ} + 1732e^{j120^\circ} \cdot 7,746e^{j146,565^\circ} = \\ &= 36000 + 18000j \text{ ВА}; \end{aligned}$$

- мощность потребителей

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\dot{i}\dot{i}\dot{o}} &= |\dot{I}_{bc}|^2 \cdot \underline{z}_{bc} + |\dot{I}_{bac}|^2 \cdot (\underline{z}_{ca} + \underline{z}_{ab}) = 15,492^2 \cdot (100 + 50j) + 7,746^2 \cdot (200 + 100j) = \\ &= 36000 + 18000j \text{ ВА}. \end{aligned}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{i}\dot{i}\dot{o}}$$

Порядок построения векторной диаграммы:

- линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$;
- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ba\dot{n}}, \dot{I}_{bc}$;
- линейные токи $\dot{I}_A = \dot{I}_c = \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{bac}$;

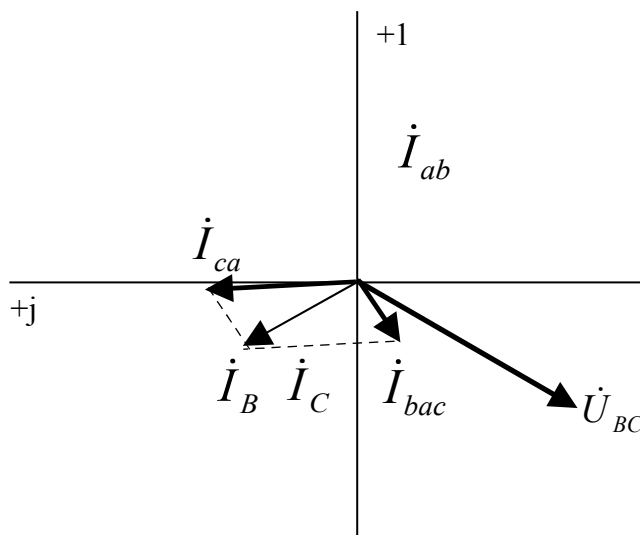


Рисунок 4.23

4.13 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.24), симметричный режим, $\underline{z}_I \neq 0$

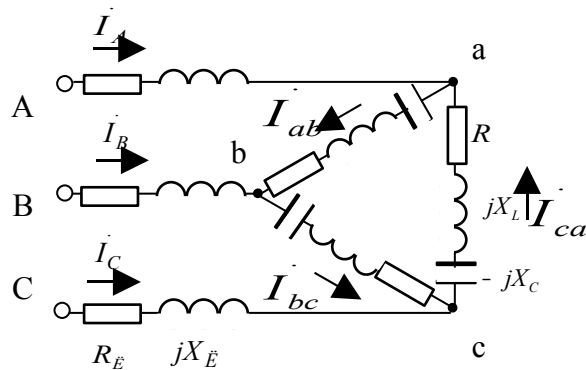


Рисунок 4.24

Преобразуем треугольник сопротивлений нагрузки в звезду (рисунок 4.25):

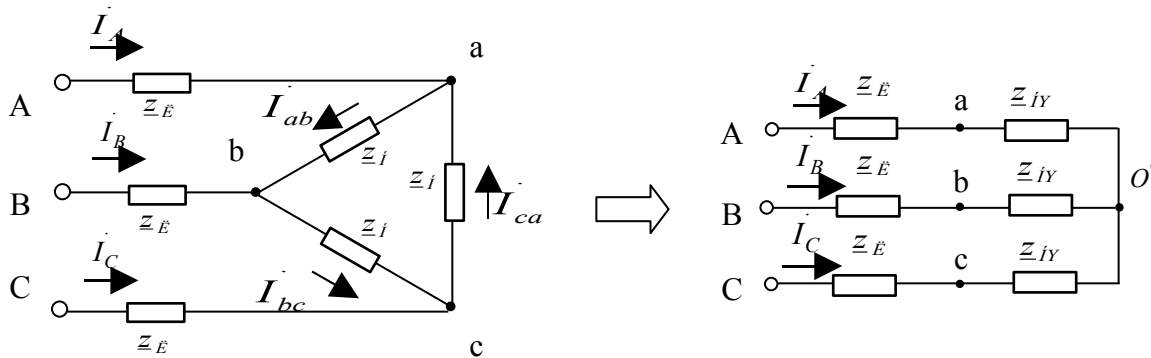


Рисунок 4.25

Так как сопротивления треугольника одинаковые

$$z_{iY} = \frac{z_i}{3} = \frac{100 + 50j}{3} = 33,333 + 16,667j \hat{\Omega}$$

Линейные токи в звезде:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_E + z_{iY}} = \frac{1000}{10 + 10j + 33,333 + 16,667j} = 19,654e^{-j31,608^\circ} A$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_E + z_{iY}} = \frac{1000e^{-j120^\circ}}{10 + 10j + 33,333 + 16,667j} = 19,654e^{-j151,608^\circ} A;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_E + z_{iY}} = \frac{1000e^{j120^\circ}}{10 + 10j + 33,333 + 16,667j} = 19,654e^{j88,392^\circ} A$$

Проверка $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

Потенциалы точек a, b, c :

$$\dot{\varphi}_a = \dot{U}_A - \dot{I}_A \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000 - 19,654e^{-j31,608^\circ} \cdot (10 + 10j) = 732,448e^{-j5,042^\circ} B ;$$

$$\dot{\varphi}_b = \dot{U}_B - \dot{I}_B \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000e^{-j120^\circ} - 19,654e^{-j151,608^\circ} \cdot (10 + 10j) = 732,448e^{-j125,042^\circ} B ;$$

$$\dot{\varphi}_c = \dot{U}_C - \dot{I}_C \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000e^{j120^\circ} - 19,654e^{j88,392^\circ} \cdot (10 + 10j) = 732,448e^{j114,958^\circ} B$$

Проверка $\dot{\varphi}_A + \dot{\varphi}_B + \dot{\varphi}_C = 0$

Фазные токи в треугольнике :

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b}{\underline{z}_{ab}} = \frac{732,448e^{-j5,042^\circ} - 732,448e^{-j125,042^\circ}}{100 + 50j} = 11,347e^{-j1,608^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c}{\underline{z}_{bc}} = \frac{732,448e^{-j125,042^\circ} - 732,448e^{j114,958^\circ}}{100 + 50j} = 11,347e^{-j121,608^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a}{\underline{z}_{ca}} = \frac{732,448e^{j114,958^\circ} - 732,448e^{-j5,042^\circ}}{100 + 50j} = 11,347e^{j118,322^\circ} A$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = 3\dot{U}_A \cdot \bar{I}_A = 3 \cdot 1000 \cdot 19,654e^{j31,608^\circ} = 50210 + 30900 BA ;$$

- мощность потребителей

$$\begin{aligned} \bar{S}_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}} &= 3|\dot{I}_A|^2 \cdot (\underline{z}_{jY} + \underline{z}_{\dot{E}}) = 3 \cdot 19,654e^{-j31,608^\circ} \cdot (10 + 10j + 33,333 + 16,667j) = \\ &= 50210 + 30900j BA. \end{aligned}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{i}\dot{n}\dot{o}}$$

Последовательность построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения (или ЭДС) генератора $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$;

- потенциалы $\dot{\varphi}_a; \dot{\varphi}_b; \dot{\varphi}_c$;

- линейные напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a,$$

- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{b\bar{n}}, \dot{I}_{\bar{n}a}$;

- линейные токи (как разность соответствующих фазных токов)

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

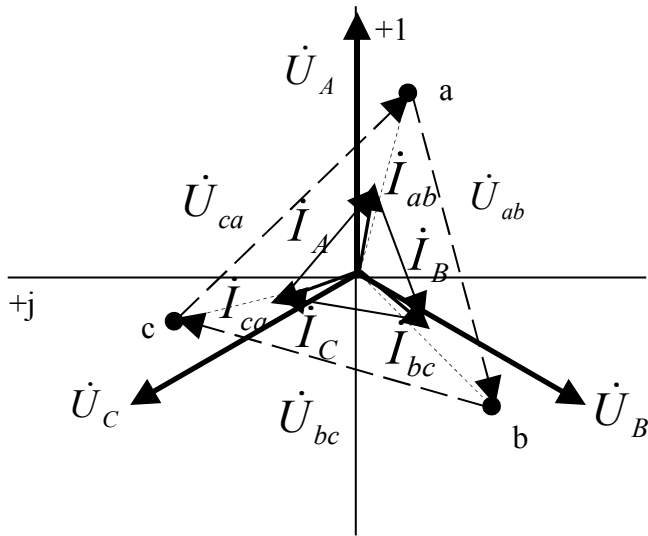


Рисунок 4.26

4.14 Схема нагрузки – треугольник (рисунок 4.27), несимметричный режим, в фазе нагрузки ab сопротивление z_H заменяется на z_{H1} , $z_L \neq 0$

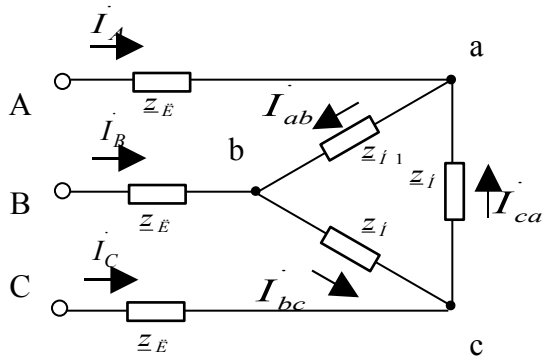


Рисунок 4.27

Преобразуем треугольник сопротивлений нагрузки в звезду (рисунок 4.28):

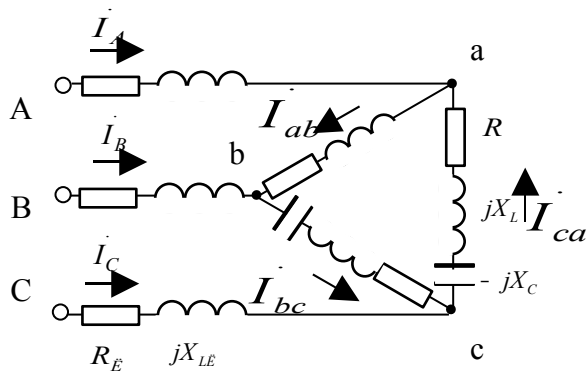


Рисунок 4.28

$$\underline{z}_a = \frac{\underline{z}_{ab} \cdot \underline{z}_{ca}}{\underline{z}_{ab} + \underline{z}_{bc} + \underline{z}_{ca}} = \frac{(100 + 100j) \cdot (100 + 50j)}{100 + 100j + 100 + 50j + 100 + 50j} = 45,853e^{j37,875^\circ} \hat{i} ;$$

$$\underline{z}_b = \frac{\underline{z}_{bc} \cdot \underline{z}_{ab}}{\underline{z}_{ab} + \underline{z}_{bc} + \underline{z}_{ca}} = \frac{(100 + 100j) \cdot (100 + 50j)}{100 + 100j + 100 + 50j + 100 + 50j} = 45,853e^{j37,875^\circ} \hat{i} ;$$

$$\underline{z}_c = \frac{\underline{z}_{bc} \cdot \underline{z}_{ca}}{\underline{z}_{ab} + \underline{z}_{bc} + \underline{z}_{ca}} = \frac{(100 + 50j) \cdot (100 + 50j)}{100 + 100j + 100 + 50j + 100 + 50j} = 34,669e^{j19,44^\circ} \hat{i} .$$

Проводимости фаз:

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{z}_a + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1}{45,853e^{j37,875^\circ} + 14,2e^{j45^\circ}} = 0,017e^{-j39,611^\circ} \tilde{N}\hat{i} ;$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{z}_b + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1}{45,853e^{j37,875^\circ} + 14,2e^{j45^\circ}} = 0,017e^{-j39,611^\circ} \tilde{N}\hat{i} ;$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{z}_c + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1}{34,669e^{j19,44^\circ} + 14,2e^{j45^\circ}} = 0,021e^{-j26,771^\circ} \tilde{N}\hat{i} .$$

Смещение нейтрали

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} =$$

$$= \frac{1000 \cdot 0,00170e^{-j39,611^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 0,00170e^{-j39,611^\circ} +$$

$$+ 1000e^{j120^\circ} \cdot 0,0021e^{-j26,771^\circ}}{0,00170e^{-j39,611^\circ} + 0,00170e^{-j39,611^\circ} + 0,0021e^{-j26,771^\circ}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1000e^{-j39,611^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 0,00170e^{-j39,611^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 0,0021e^{-j26,771^\circ}}{0,00170e^{-j39,611^\circ} + 0,00170e^{-j39,611^\circ} + 0,0021e^{-j26,771^\circ}} = 101,572e^{j171,267^\circ} B.$$

Линейные токи в звезде:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_a + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1000 - 101,572e^{j171,267^\circ}}{34,615 + 26,923j + 10 + 10j} = 19,003e^{-j40,414^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_b + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1000e^{-j120^\circ} - 101,572e^{j171,267^\circ}}{34,615 + 26,923j + 10 + 10j} = 16,711e^{-j153,998^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{O'O}}{\underline{z}_c + \underline{z}_{\tilde{E}}} = \frac{1000e^{j120^\circ} - 101,572e^{j171,267^\circ}}{32,692 + 11,538j + 10 + 10j} = 19,654e^{j88,392^\circ} A .$$

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

Потенциалы точек a, b, c :

$$\dot{\varphi}_a = \dot{U}_A - \dot{I}_A \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000 - 19,003e^{-j40,414^\circ} \cdot (10 + 10j) = 732,434e^{-j1,681^\circ} B ;$$

$$\dot{\varphi}_b = \dot{U}_B - \dot{I}_B \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000e^{-j120^\circ} - 16,711e^{-j153,998^\circ} \cdot (10 + 10j) = 769,332e^{-j123,361^\circ} B ;$$

$$\dot{\varphi}_c = \dot{U}_C - \dot{I}_C \cdot \underline{z}_{\dot{E}} = 1000e^{j120^\circ} - 19,654e^{j88,392^\circ} \cdot (10 + 10j) = 732,448e^{j114,958^\circ} B$$

Проверка $\dot{\varphi}_a + \dot{\varphi}_b + \dot{\varphi}_c = 0$

Фазные токи в треугольнике:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b}{\underline{z}_{ab}} = \frac{732,434e^{-j1,681^\circ} - 769,332e^{-j123,361^\circ}}{100 + 100j} = 9,274e^{-j16,736^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c}{\underline{z}_{bc}} = \frac{769,332e^{-j123,361^\circ} - 732,448e^{-j114,958^\circ}}{100 + 50j} = 11,731e^{-j121,552^\circ} A ;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a}{\underline{z}_{ca}} = \frac{732,448e^{-j114,958^\circ} - 732,434e^{-j1,681^\circ}}{100 + 50j} = 11,15e^{-j120,073^\circ} A$$

Баланс мощности:

- мощность источника

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \dot{U}_A \cdot \bar{I}_A + \dot{U}_B \cdot \bar{I}_B + \dot{U}_C \cdot \bar{I}_C = 1000 \cdot 19,003e^{-j40,414^\circ} + 1000e^{-j120^\circ} \cdot 16,711e^{j153,998^\circ} + 1000e^{j120^\circ} \cdot 19,654e^{-j88,392^\circ} = 45060 + 31960j \text{ ВА};$$

- мощность потребителей

$$\bar{S}_{\dot{n}\dot{o}\dot{o}} = |\dot{I}_A|^2 \cdot (\underline{z}_a + \underline{z}_{\dot{E}}) + |\dot{I}_B|^2 \cdot (\underline{z}_b + \underline{z}_{\dot{E}}) + |\dot{I}_C|^2 \cdot (\underline{z}_c + \underline{z}_{\dot{E}}) = 19,003^2 \cdot (100 + 100j) + 16,711^2 \cdot (100 + 50j) + 19,654^2 \cdot (100 + 50j) = 45060 + 31960j \text{ ВА}$$

$$\bar{S}_{\dot{e}\dot{n}\dot{o}} = \bar{S}_{\dot{n}\dot{o}\dot{o}}$$

Последовательность построения векторной диаграммы:

- фазные напряжения (или ЭДС) генератора $\dot{U}_A; \dot{U}_B; \dot{U}_C$;

- потенциалы $\dot{\varphi}_a; \dot{\varphi}_b; \dot{\varphi}_c$;

- линейные напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_c, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_a,$$

- фазные токи нагрузки $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{b\dot{n}}, \dot{I}_{\dot{n}a}$;

- линейные токи (как разность соответствующих фазных токов)

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

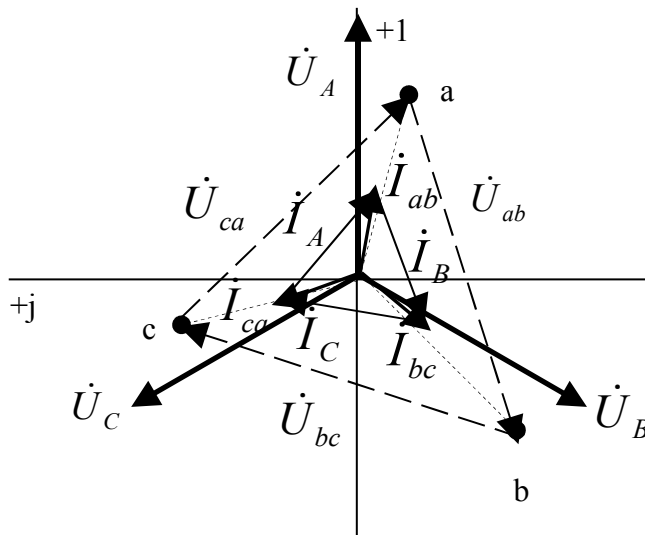


Рисунок 4.29

5 Вопросы для самоконтроля

1 Какое из определений трехфазной симметричной системы ЭДС является правильным?

Ответы:

- 1) Это совокупность трех ЭДС, равных по величине.
- 2) Это совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой амплитуды, частоты которых отличаются на 120 Гц.
- 3) Это совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120 градусов.

2 Какое соотношение справедливо для симметричной системы ЭДС?

Ответы:

- 1) $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$.
- 2) $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \sqrt{3}$.

3 Какое чередование фаз называется прямым?

Ответы:

- 1) ABC.
- 2) ACB.

4 Какое напряжение покажет вольтметр, включенный между точками А и О генератора, обмотки которого соединены звездой?

Ответы:

- 1) Фазное напряжение нагрузки.
- 2) Линейное напряжение генератора.
- 3) Фазное напряжение генератора.

5 Дайте правильное определение для линейного напряжения?

Ответы:

- 1) Это напряжение между линейными проводами.
- 2) Это напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки
- 3) Это падение напряжения в линии.

6 Укажите правильное определение для смещения нейтрали.

Ответы:

- 1) Это напряжение между линейными проводами.
- 2) Это напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки.
- 3) Это падение напряжения в фазе генератора.

7 Какое соотношение между фазными и линейными напряжениями является верным для генератора с соединением обмоток звездой?

Ответы:

- 1) $U_{\bar{\epsilon}} = U_{\delta}$.
- 2) $U_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{\epsilon}}$.
- 3) $U_{\bar{\epsilon}} = \sqrt{3} \cdot U_{\delta}$.
- 4) $U_{\bar{\epsilon}} = U_{\delta} / \sqrt{3}$.

8 Какое соотношение между фазными и линейными токами является верным для генератора с соединением обмоток звездой?

Ответы:

- 1) $I_{\bar{\epsilon}} = I_{\delta}$.
- 2) $I_{\delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\bar{\epsilon}}$.
- 3) $I_{\bar{\epsilon}} = \sqrt{3} \cdot I_{\delta}$.
- 4) $I_{\bar{\epsilon}} = I_{\delta} / \sqrt{3}$.

9 Какое соотношение между фазными и линейными напряжениями является верным для генератора с соединением обмоток треугольником?

Ответы:

- 1) $U_{\bar{\epsilon}} = U_{\phi}$.
- 2) $U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{\epsilon}}$.
- 3) $U_{\bar{\epsilon}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}$.
- 4) $U_{\bar{\epsilon}} = U_{\phi} / \sqrt{3}$.

10 Какое соотношение между фазными и линейными токами является верным для генератора с соединением обмоток треугольником?

Ответы:

- 1) $I_l = I_\phi$. 2) $I_\phi = \sqrt{3} \cdot I_l$.
3) $I_l = \sqrt{3} \cdot I_\phi$ 4) $I_l = I_\phi / \sqrt{3}$.

11 В каком из случаев в схеме звезда-звезда с нулевым проводом ток в нулевом проводе будет равен нулю?

Ответы:

- 1) При симметричном режиме работы схемы.
- 2) При обрыве фазы.
- 3) При несимметричном режиме работы схемы.

12 В каком из случаев в схеме звезда-звезда с нулевым проводом появится смещение нейтрали?

Ответы:

- 1) При симметричном режиме работы схемы и отсутствии сопротивления в нулевом проводе ($z_N = 0$).
- 2) При симметричном режиме работы схемы и наличии сопротивления в нулевом проводе ($z_N \neq 0$).
- 3) При несимметричном режиме работы схемы и отсутствии сопротивления в нулевом проводе ($z_N = 0$).
- 4) При несимметричном режиме работы схемы и наличии сопротивления в нулевом проводе ($z_N \neq 0$).

13 В каком из случаев в схеме звезда-звезда появится смещение нейтрали?

Ответы:

- 1) При несимметричном режиме работы схемы.
- 2) При включении вольтметра.
- 3) При симметричном режиме работы схемы.

14 В каком из случаев в схеме звезда-звезда фазный ток рассчитывается

$$I_\phi = I_l = \frac{\dot{E}_\phi - \dot{U}_{OO}}{z_\phi} \quad ?$$

по формуле

Ответы:

- 1) При симметричном режиме работы схемы.
- 2) При несимметричном режиме работы схемы.
- 3) При включении между нулевыми точками генератора и приемника нулевого провода ($z_N = 0$).

15 Выберите формулу для расчета тока в фазе ab нагрузки в трехфазной схеме при соединении нагрузки треугольником без сопротивления в нулевом проводе ($z_{л}=0$) ?

ОТВЕТЫ:

$$1) \dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB}}{z_{ab}} \quad . \quad 2) \dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{OO}}{z_{ab}} \quad .$$

16 Какая из формул расчета активной мощности справедлива для симметричного режима работы трехфазной цепи?

ОТВЕТЫ:

$$1) P = \sqrt{3} U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi \quad .$$
$$2) P = \sqrt{2} \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi \quad .$$
$$3) P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \varphi \quad .$$

Список использованных источников

1 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учеб. для вузов / Л. А. Бессонов.- 11-е изд., испр. и доп. - М. : Гардарики, 2006. - 701 с.

2 Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. для вузов / А.Н. Горбунов [и др.].- 2-е изд., перераб. и испр. - М. : ТРИАДА, 2005. - 304 с. : ил.