

Электротехника и промышленная электроника

Трёхфазные электрические цепи

1 Общие положения и определения

Трёхфазной электрической цепью или трёхфазной системой цепей называют такую систему, в которой действуют три синусоидальные ЭДС, одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые друг относительно друга по фазе на угол 120° и создаваемые общим источником энергии. Этим источником является трёхфазный синхронный генератор.

Часть трёхфазной системы, в которой может протекать один из ее токов, называется фазой. В каждой фазе следует различать начало (А, В, С) и конец (Х, Y, Z).

Обмотки трёхфазных генераторов, как правило, соединяются по схеме “звезда” (рисунок 4.1). Соединением в “звезду” называется такое, при котором три начала или три конца фаз соединяются в общую точку, называемую нулевой или нейтральной.

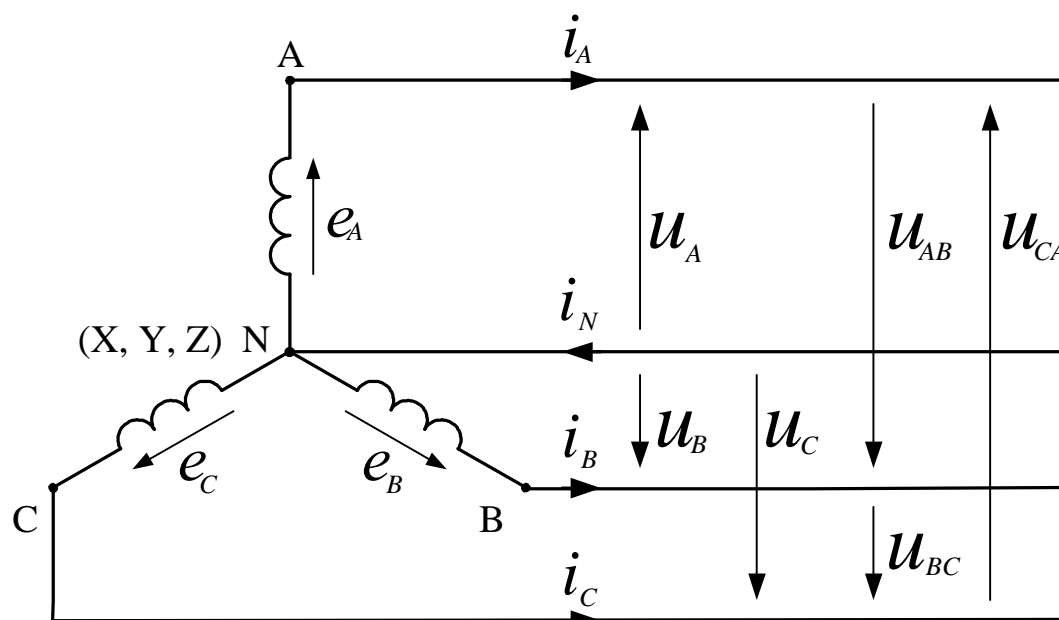


Рисунок 4.1 - Схема соединения обмоток трёхфазного генератора “звезда”

От начала обмоток А, В, С, и нейтральной точки N выводят провода, по которым энергия передается приемникам (потребителям). Провода,

соединяющие начала обмоток источника и приемника называют линейными, а провод, соединяющий нейтральные точки источника питания и приемника - нейтральным проводом или нейтралью.

Напряжения u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} между линейными проводами (рисунок 4.1), называют - линейными напряжениями, а токи i_A, i_B, i_C в линейных проводах - линейными токами. Напряжения u_A, u_B, u_C между нейтральным проводом и соответствующими линейными проводами называют фазными напряжениями.

Положительное направление токов в линейных проводах принято в сторону потребителей, а в нейтральном проводе в сторону источника.

Приемниками электрической энергии могут быть включены в трехфазную сеть двумя способами: “звездой” или “треугольником”. На рисунке 4.2 представлена схема соединения генератора и нагрузки по схеме “звезда - звезда” с нейтральным проводом.

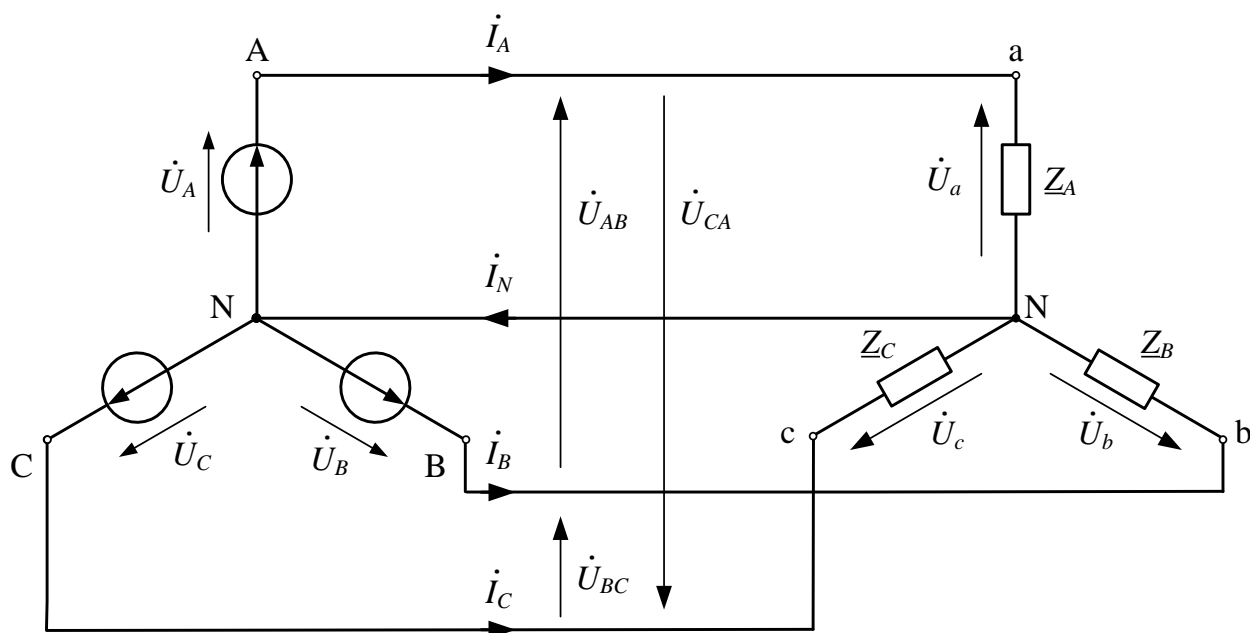


Рисунок 4.2 - Соединение генератора и нагрузки по схеме “звезда - звезда”

Напряжения $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ - фазные напряжения приемника, $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазные напряжения генератора. Из схемы видно, что

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A, \dot{U}_b = \dot{U}_B, \dot{U}_c = \dot{U}_C. \quad (4.1)$$

Соотношения между линейными и фазными напряжениями определяются в общем случае по второму закону Кирхгофа (в геометрической или комплексной форме):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\tag{4.2}$$

Для нагрузки:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b, \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_b - \dot{U}_c, \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_c - \dot{U}_a.\end{aligned}\tag{4.3}$$

При соединении потребителей “звездой”, когда $|\dot{U}_A| = |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = U_L$, а $|\dot{U}_a| = |\dot{U}_b| = |\dot{U}_c| = U_\Phi$ справедливо соотношение

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi.\tag{4.4}$$

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.\tag{4.5}$$

При симметричной нагрузке $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z_\Phi$, ток в нейтральном проводе отсутствует, поэтому необходимость в нем отпадает.

При несимметричной нагрузке $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ токи в фазах различны, но за счет нейтрального провода напряжения на каждой фазе приемника с изменением нагрузки остаются практически постоянными по величине и равными фазному напряжению генератора. Таким образом, **нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.**

Генератор и потребитель могут быть соединены по схеме “звезда - треугольник” (рисунок 4.3).

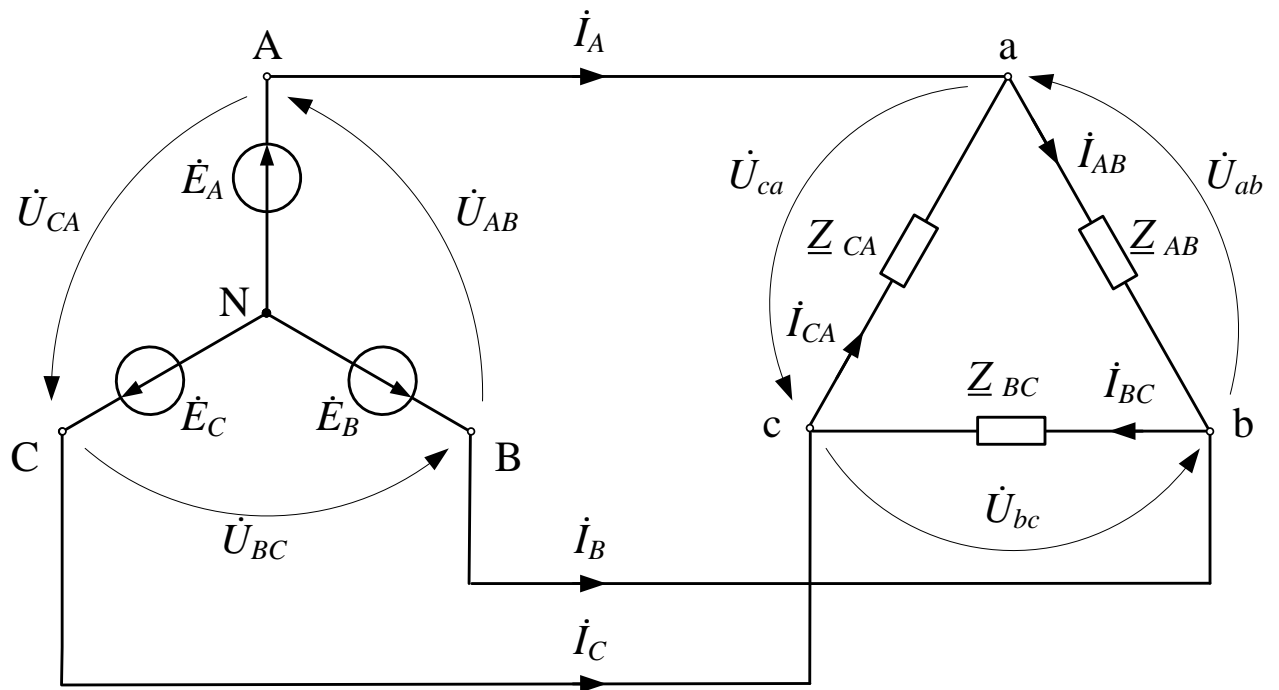


Рисунок 4.3 - Соединение генератора и нагрузки по схеме “звезда-треугольник”

При соединении потребителя “треугольником” фазные напряжения всегда равны соответствующим линейным:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{AB}, \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_{BC}, \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_{CA}. \end{aligned} \tag{4.6}$$

Фазные и линейные токи не равны между собой, соотношения между ними можно получить по первому закону Кирхгофа (в геометрической или комплексной форме):

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned} \tag{4.7}$$

Независимо от характера нагрузки геометрическая сумма линейных токов равна нулю.

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \tag{4.8}$$

При симметричной нагрузке соотношение между модулями фазных I_ϕ и линейных токов I_L определяется выражением

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \tag{4.9}$$

Рассмотрим несколько примеров расчета трехфазных цепей.

2 Примеры расчетов трехфазных цепей

Задача № 1

К зажимам четырехпроводной сети, линейное напряжение которой равно 380 В, подключен несимметричный приемник, рисунок 4.4. Сопротивления нагрузки соответственно равны $R_A = 40 \text{ Ом}$, $X_A = 21 \text{ Ом}$, $R_B = 0 \text{ Ом}$, $X_C = 0 \text{ Ом}$.

Определить токи в линейных и нулевом проводах, построить векторную диаграмму, сделать проверку на баланс мощности.

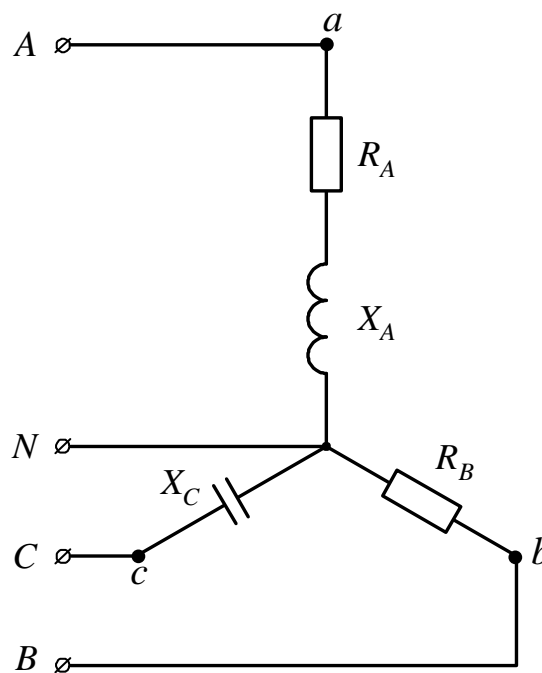


Рисунок 4.4 - Схема цепи

Решение

1. Определяем фазные напряжения приемников. Так как нейтральный провод не имеет сопротивления, он выравнивает потенциалы нейтралей источника и приемника. Поэтому фазные напряжения приемника будут равны фазным напряжением генератора, они имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты на углы 120° :

$$\begin{aligned}\dot{U}_A = \dot{U}_a = U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}, \\ \dot{U}_B = \dot{U}_b = U_\Phi \cdot \dot{a}^2 = 220 \cdot (-0,5 - j0,866) = (-110 - j190,52) \text{ В}, \\ \dot{U}_C = \dot{U}_c = U_\Phi \cdot \dot{a} = 220 \cdot (-0,5 + j0,866) = (-110 + j190,52) \text{ В}.\end{aligned}\quad (4.10)$$

где $\dot{a} = (-0,5 + j0,866)$, $\dot{a}^2 = (-0,5 - j0,866)$ - операторы поворота вектора напряжения в положительном направлении на 120° и 240° соответственно.

2. Определяем комплексы полных сопротивлений нагрузки.

В общем виде

$$\underline{Z} = R \pm jX, \quad (4.11)$$

где «+» для индуктивности, «-» для емкости.

Полное комплексное сопротивление фазы А равно

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_A = (40 + j21) \text{ Ом}.\quad (4.12)$$

Аналогично определяем полные комплексные сопротивления фаз В и С, так как сопротивления X_B и R_C отсутствуют, их значения принимаем равными нулю.

$$\underline{Z}_B = 50 + j0 = 50 \text{ Ом},\quad (4.13)$$

$$\underline{Z}_C = 0 - j40 = -j40 \text{ Ом}.\quad (4.14)$$

3. Определяем токи, которые при соединении потребителей «звездой» являются и фазными и линейными токами:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220}{40 + j21} = (4,31 - j2,21) \text{ А}, \\ \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{-110 - j190,52}{50} = (-2,2 - j3,81) \text{ А}, \\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{-110 + j190,52}{-j40} = (-4,76 + j2,75) \text{ А}.\end{aligned}\quad (4.15)$$

4. Находим ток в нулевом проводе по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (-2,65 - j8,82) \text{ А}.\quad (4.16)$$

5. Определяем модули токов:

$$\begin{aligned}
I_A &= |\dot{I}_A| = \sqrt{4,31^2 + 2,21^2} = 4,87 \text{ A}, \\
I_B &= |\dot{I}_B| = \sqrt{2,2^2 + 3,81^2} = 4,4 \text{ A}, \\
I_C &= |\dot{I}_C| = \sqrt{4,76^2 + 2,75^2} = 5,5 \text{ A}, \\
I_N &= |\dot{I}_N| = \sqrt{2,65^2 + 8,82^2} = 9,21 \text{ A}.
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

6. Проверяем расчет на баланс мощности.

Находим комплекс полной мощности нагрузки

$$\begin{aligned}
\underline{S}_H &= \underline{Z}_A I_A^2 + \underline{Z}_B I_B^2 + \underline{Z}_C I_C^2 = \\
&= (40 + j21) \cdot 4,87^2 + 50 \cdot 4,4^2 + (-j40) \cdot 5,5^2 = (1915,6 - j711,33) \text{ ВА}.
\end{aligned}
\tag{4.18}$$

Определяем комплекс полной мощности генератора

$$\begin{aligned}
\underline{S}_G &= \dot{U}_A \hat{I}_A + \dot{U}_B \hat{I}_B + \dot{U}_C \hat{I}_C = 220 \cdot (4,31 + j2,21) + \\
&+ (-110 - j190,52) \cdot (-2,2 + j3,81) + \\
&+ (-110 + j190,52) \cdot (-4,76 + j2,75) = (1915,75 - j712,18) \text{ ВА},
\end{aligned}
\tag{4.19}$$

где $\hat{I}_A, \hat{I}_B, \hat{I}_C$ - сопряженные комплексные значения токов.

Условие баланса мощности $\underline{S}_G = \underline{S}_H$ с погрешностью менее 1%.

Сходимость баланса мощности можно определить таким образом:

$$\Delta S_{\%} = \frac{|S_G - S_H|}{S_G} \cdot 100\%,
\tag{4.20}$$

$$S_H = |\underline{S}_H| = \sqrt{1915,6^2 + 711,33^2} = 2043,4 \text{ ВА},$$

$$S_G = |\underline{S}_G| = \sqrt{1915,75^2 + 712,18^2} = 2043,84 \text{ ВА},$$

$$\Delta S_{\%} = \frac{|2043,84 - 2043,4|}{2043,84} \cdot 100\% = 0,02\% < 1\%.$$

Условия баланса мощности выполнены, следовательно, токи найдены правильно.

7. Строим векторную топографическую диаграмму. Делаем это в следующей последовательности:

а) выбираем масштабы для токов $m_I = 0,1 \text{ А/мм}$ и напряжения $m_U = 5 \text{ В/мм}$;

б) строим векторы фазных напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ в соответствии с полученными значениями (4.10). Данные векторы должны быть равны по величине и углы между ними должны составлять 120° ;

в) согласно второму закону Кирхгофу, линейные напряжения равны (4.2). Направления векторов линейных напряжений должны соответствовать этим уравнениям;

г) по выражениям (4.15) и (4.16) строим в масштабе диаграмму токов.

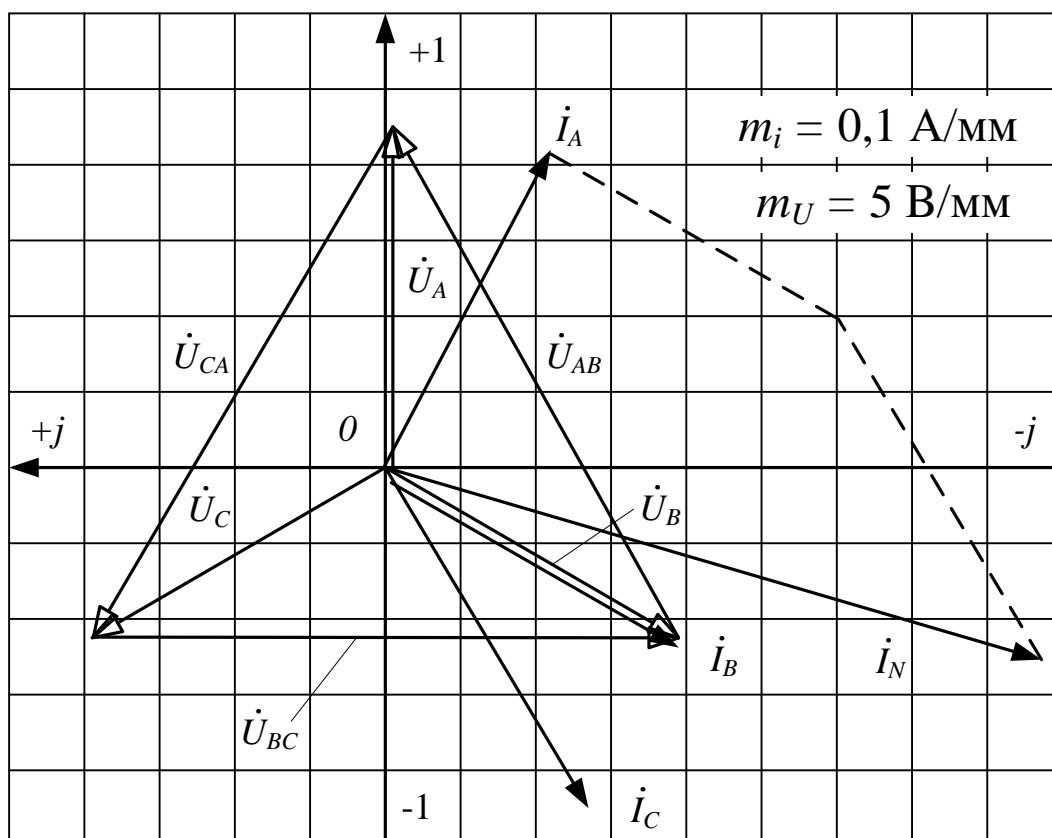


Рисунок 4.5 - Векторная диаграмма

Задача № 2

В трехфазную сеть с линейным напряжением 120 В включена нагрузка, соединенная “треугольником”, рисунок 4.6. Сопротивления нагрузки соответственно равны $R_{AB} = 5 \text{ Ом}$, $R_{BC} = 2 \text{ Ом}$, $X_{BC} = 4 \text{ Ом}$, $R_{CA} = 4 \text{ Ом}$, $X_{CA} = 8 \text{ Ом}$.

Определить фазные и линейные токи, сделать проверку на баланс мощности, построить векторную топографическую диаграмму.

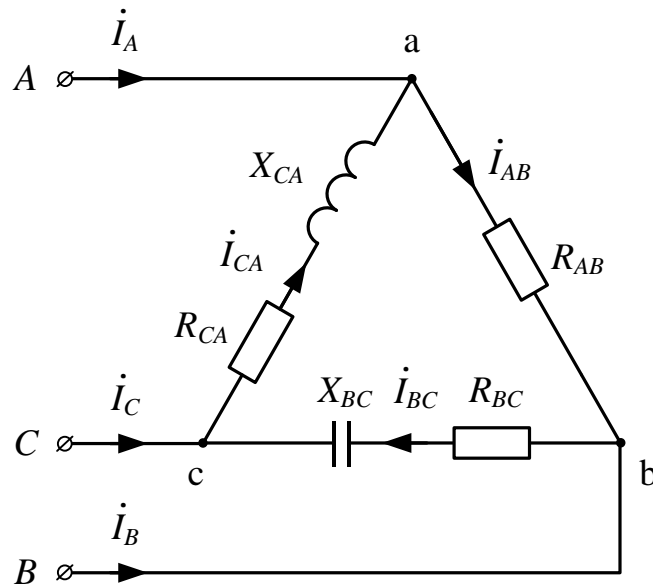


Рисунок 4.6 - Схема цепи

Решение

1. Определяем комплексные сопротивления фаз нагрузки согласно (4.11):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{AB} &= R_{AB} = 5 \text{ Ом}, \\ \underline{Z}_{BC} &= R_{BC} - jX_{BC} = (2 - j4) \text{ Ом}, \\ \underline{Z}_{CA} &= R_{CA} + jX_{CA} = (4 + j8) \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (4.21);$$

Видим, что $\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$ - нагрузка несимметричная.

2. Находим комплексы напряжений на фазах нагрузки, учитывая, что для «треугольника» фазные и соответствующие линейные напряжения равны между собой. Получаем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= U_{Л} = 120 \text{ В}, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_{AB} \cdot \dot{a}^2 = 120 \cdot (-0,5 - j0,866) = (-60 - j104) \text{ В}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{AB} \cdot \dot{a} = 120 \cdot (-0,5 + j0,866) = (-60 + j104) \text{ В}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

По закону Ома находим величину фазных токов:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{120}{5} = 24 \text{ А}, \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{-60 - j104}{2 - j4} = (14,78 - j22,4) \text{ А}, \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{-60 + j104}{4 + j8} = (7,4 + j11,2) \text{ А}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

4. Определяем линейные токи по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 24 - (7,4 + j11,2) = (16,6 - j11,2) \text{ A}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = (14,78 - j22,4) - 24 = (-9,22 - j22,4) \text{ A}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = (7,4 + j11,2) - (14,78 - j22,4) = (-7,4 + j33,6) \text{ A}. \end{aligned} \quad (4.24)$$

5. Проверка на баланс мощности.

Для определения мощности генератора потребуются комплексные значения фазных напряжений генератора, обмотки которого соединены в «звезду».

Поскольку

$$\dot{U}_{AB} = U_{Л} = 120 \text{ В}, \text{ то } \dot{U}_C = j \frac{\dot{U}_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{120}{\sqrt{3}} = j69,4 \text{ В}. \quad (4.25)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_C \cdot \dot{a}^2 = j69,4 \cdot (-0,5 - j0,866) = (60 - j34,7) \text{ В}, \\ \dot{U}_B &= U_C \cdot \dot{a} = j69,4 \cdot (-0,5 + j0,866) = (-60 + j34,7) \text{ В}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Определяем мощность генератора, используя формулу (4.19)

$$\begin{aligned} \underline{S}_Г &= \dot{U}_A \hat{I}_A + \dot{U}_B \hat{I}_B + \dot{U}_C \hat{I}_C = (60 - j34,7) \cdot (16,6 + j11,2) + \\ &+ (-60 - j34,7) \cdot (-9,2 + j22,4) + \\ &+ (j69,4) \cdot (-7,4 - j33,6) = (5040 - j1440) \text{ ВА}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для расчета мощности нагрузки найдем модули фазных токов:

$$\begin{aligned} I_{AB} &= |\dot{I}_{AB}| = \sqrt{24^2} = 24 \text{ А}, \\ I_{BC} &= |\dot{I}_{BC}| = \sqrt{14,78^2 + 22,4^2} = 26,83 \text{ А}, \\ I_{CA} &= |\dot{I}_{CA}| = \sqrt{7,4^2 + 11,2^2} = 13,42 \text{ А}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Определяем мощность нагрузки

$$\begin{aligned} \underline{S}_H &= \underline{Z}_{AB} I_{AB}^2 + \underline{Z}_{BC} I_{BC}^2 + \underline{Z}_{CA} I_{CA}^2 = \\ &= 5 \cdot 24^2 + (2 - j4) \cdot 26,83^2 + (4 + j8) \cdot 13,42^2 = (5039,9 - j1439,9) \text{ ВА}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Условие баланса мощности $R_0 = \frac{R_7 \cdot R_6}{R_7 + R_6} = \frac{6 \cdot 12}{6 + 12} = 4 \text{ Ом}$. Сходимость баланса мощности

можно определить по формуле (4.20):

$$S_H = |\underline{S}_H| = \sqrt{5039,9^2 + 1439,9^2} = 5241,57 \text{ ВА},$$

$$S_T = |\underline{S}_T| = \sqrt{5040^2 + 1440^2} = 5241,68 \text{ ВА},$$

$$\Delta S_{\%} = \frac{|5241,68 - 5241,57|}{5241,68} \cdot 100\% = 0,002\% < 1\%. \quad (4.30)$$

Условия баланса мощности выполнены, следовательно, токи найдены правильно.

б. Строим топографическую векторную диаграмму (рисунок 4.7) в следующем порядке:

- а) выбираем масштабы для токов $m_I = 0,2 \text{ А/мм}$ и для напряжений $m_U = 20 \text{ В/мм}$;
- б) в масштабе строим векторную диаграмму напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ в соответствии с (4.22);
- в) по выражениям (4.23) строим векторы фазных токов $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$;
- г) векторы линейных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ строим согласно выражению (4.24).

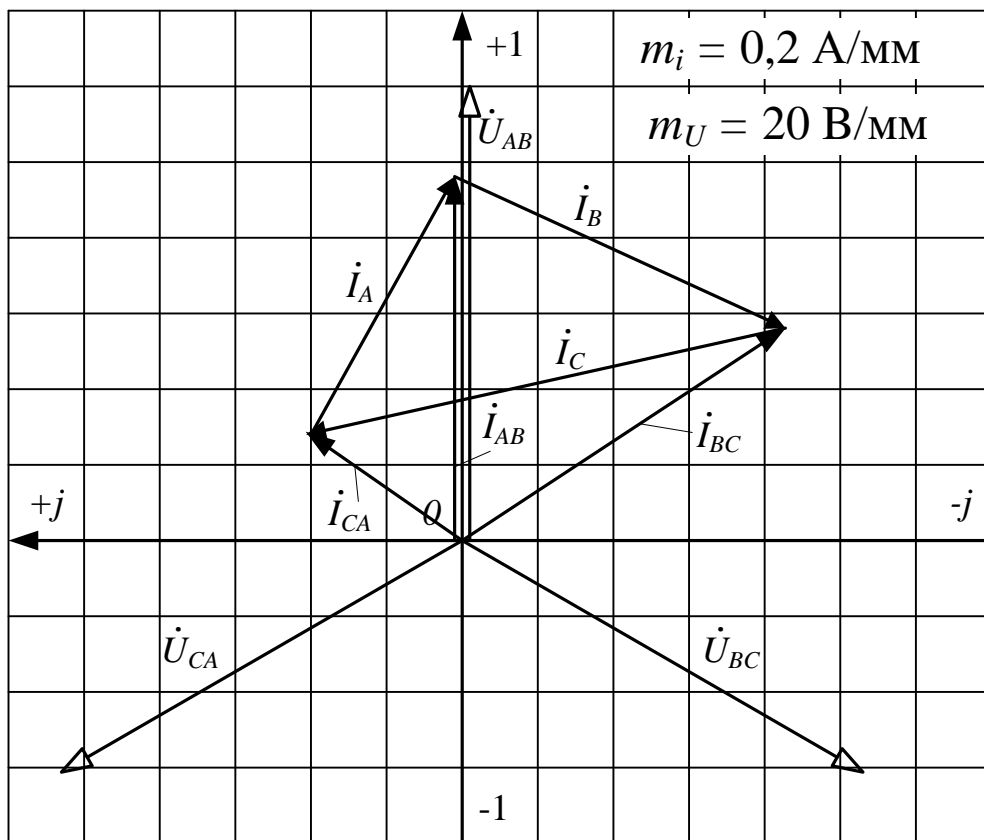


Рисунок 4.7 - Векторная диаграмма

3 Варианты для самостоятельного решения

В таблице 4.1 приведены данные к вариантам контрольных задач, на рисунках 4.8 - 4.31 даны схемы, которые необходимо рассчитать.

Таблица 4.1 – Задания для самостоятельного решения к задачам № 1, 2

Номер варианта	Номер рисунка	Ул, В	R _A , Ом	R _B , Ом	R _C , Ом	X _A , Ом	X _B , Ом	X _C , Ом	R _{AB} , Ом	R _{BC} , Ом	R _{CA} , Ом	X _{AB} , Ом	X _{BC} , Ом	X _{CA} , Ом
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
1	4.8	127	6	6		8	8	8						
2	4.8	220	4	4		6	6	6						
3	4.8	380	12	9		8	10	12						
4	4.8	440	14	16		10	5	8						
5	4.9	127	6	4	3	3	4	8						
6	4.9	220	8	5	10	6	5	3						
7	4.9	380	15	9	7	12	4	5						
8	4.9	440	15	20	10	6	8	6						
9	4.10	127							6	4	3		4	3
10	4.10	220							10	7	8		3	2
11	4.10	380							20	14	15		6	6
12	4.10	440							4	6	3		6	8
13	6.11	127							5	3	7	3	8	4
14	6.11	220							11	13	14	7	9	11
15	6.11	380							12	18	17	5	6	10
16	6.11	440							16	8	3	14	6	4
17	6.12	127							5	10	3	12	6	4
18	4.12	220							8	7	9	14	12	10
19	4.12	380							16	21	17	8	7	5
20	4.12	440							21	17	16	7	8	5
21	4.13	127	4	4	6	3	6	8						
22	4.13	220	6	8	10	4	3	6						
23	4.13	380	10	6	8	5	6	8						
24	4.13	440	14	10	12	6	8	8						
25	4.14	127	16	8	3	14	6	4						
26	4.14	220	10	4	7	6	5	3						
27	4.14	380	5	7	9	8	8	5						
28	4.14	440	12	16	20	10	10	6						
29	4.15	127								10		10		10
30	4.15	220								8		8		8
31	4.15	380								12		12		7
32	4.15	440								16		10		8

33	4.16	127							8	3	8	4	6	2
34	4.16	220							6	4	6	8	5	2
35	4.16	380							9	8	9	12	5	7
36	4.16	440							4	14	6	4	10	11
37	4.17	127							2	4		8	6	10
38	4.17	220							4	6		8	5	8
39	4.17	380							3	7		9	11	8
40	4.17	440							10	20		5	7	8
41	4.18	127		8		6		4						
42	4.18	220		10		6		5						
43	4.18	380		15		12		7						
44	4.18	440		20		14		9						
45	4.19	127	5	3	6	10		4						
46	4.19	220	6	8	8	12		5						
47	4.19	380	13	11	5	17		14						
48	4.19	440	18	10	8	15		11						
49	4.20	127							4	5	6	5	3	4
50	4.20	220							4	8	5	8	6	4
51	4.20	380							12	11	12	9	5	7
52	4.20	440							10	16	10	7	8	3
53	4.21	127							5	4	6	10	8	
54	4.21	220							3	5	4	8	10	
55	4.21	380							9	7	10	8	6	
56	4.21	440							15	11	8	3	12	
57	4.22	127							10				6	5
58	4.22	220							8				4	3
59	4.22	380							15				10	7
60	4.22	440							20				15	11
61	4.23	127	5	5	8	3		10						
62	4.23	220	9	6	10	5		12						
63	4.23	380	3	11	7	9		15						
64	4.23	440	5	22	13	10		9						
65	4.24	127	10	5	8	10	4	4						
66	4.24	220	12	8	10	14	6	7						
67	4.24	380	15	16	7	8	9	4						
68	4.24	440	9	22	10	7	10	10						
69	4.25	127									5	6	4	4
70	4.25	220									6	8	5	5
71	4.25	380									11	12	14	6
72	4.25	440									18	17	20	4
73	4.26	127								5	6	10	4	4
74	4.26	220								6	5	12	5	7
75	4.26	380								11	8	10	6	5

76	4.26	440								16	10	12	8	9
77	4.27	127								4		5	6	10
78	4.27	220								5		6	8	12
79	4.27	380								15		13	10	11
80	4.27	440								20		17	9	14
81	4.28	127	10				3	8						
82	4.28	220	20				6	16						
83	4.28	380	15				11	15						
84	4.28	440	20				10	15						
85	4.28	220	10				4	10						
86	4.29	127	8	6	6	4		5						
87	4.29	220	16	12	8	8		8						
88	4.29	380	20	14	9	11		8						
89	4.29	440	23	16	4	14		12						
90	4.29	220	16	23	15	12		14						
91	4.30	127	8	12	6	10	5	4						
92	4.30	220	10	8	10	14	8	5						
93	4.30	380	10	10	8	9	11	10						
94	4.30	440	4	10	17	5	18	8						
95	4.30	220	5	4	18	8	17	4						
96	4.31	127	5	8	10		6	4						
97	4.31	220	6	16	20		6	4						
98	4.31	380	6	8	5		6	10						
99	4.31	440	10	16	8		18	8						
100	4.31	220	10	8	16		8	18						

Схемы к заданиям:

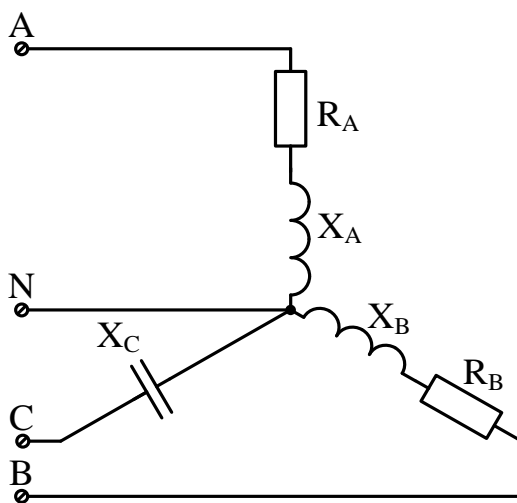


Рисунок 4.8

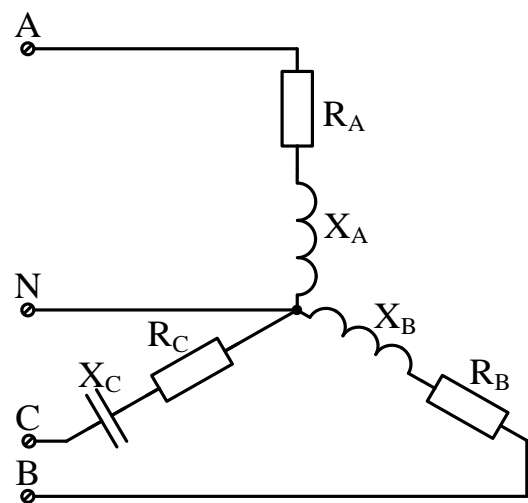


Рисунок 4.9

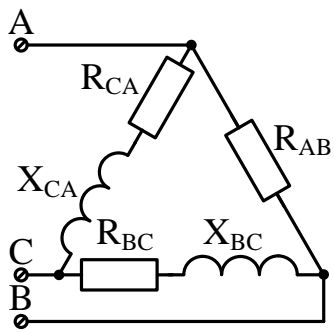


Рисунок 4.10

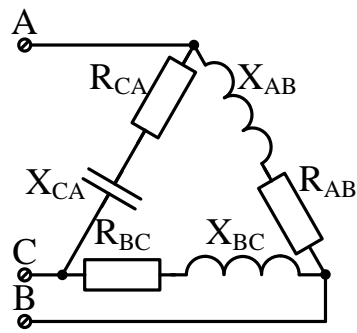


Рисунок 4.11

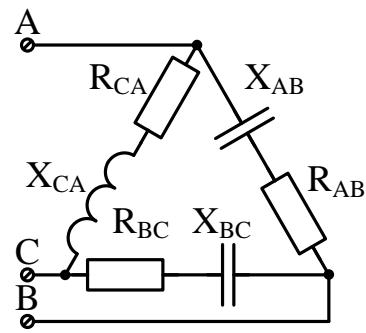


Рисунок 4.12

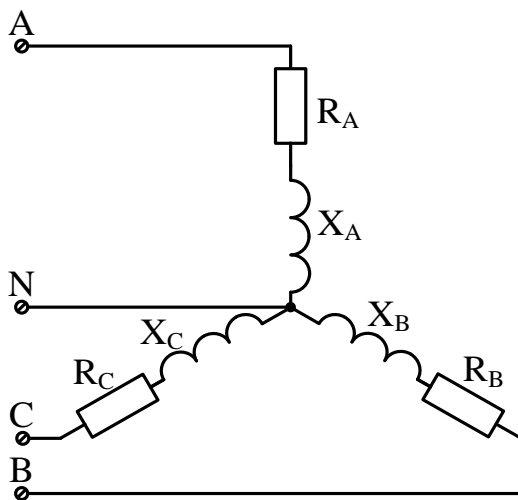


Рисунок 4.13

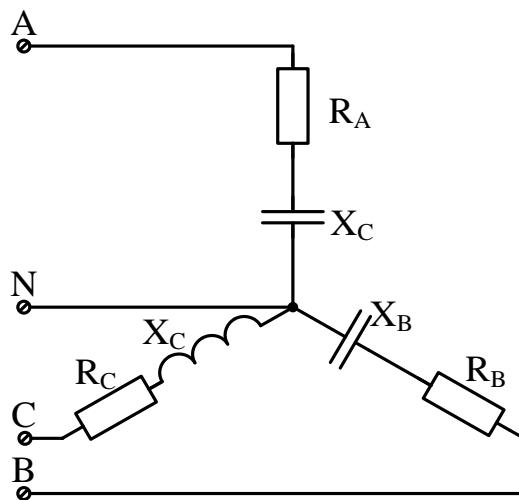


Рисунок 4.14

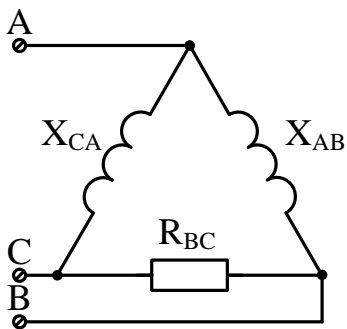


Рисунок 4.15

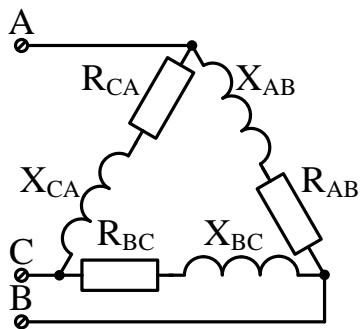


Рисунок 4.16

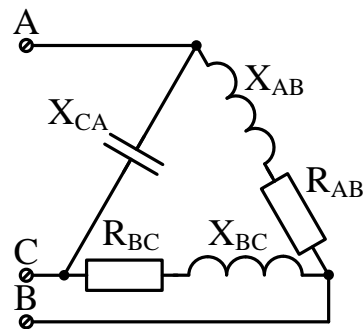


Рисунок 4.17

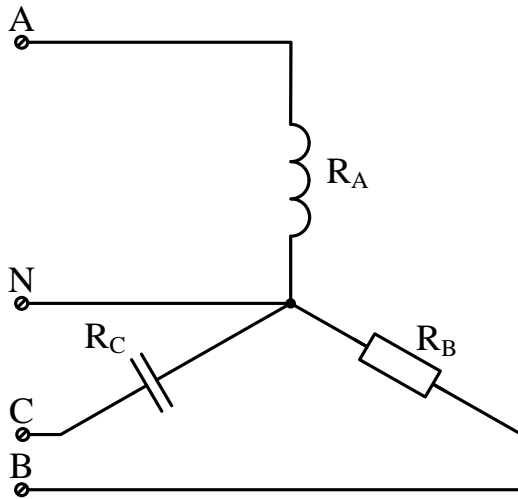


Рисунок 4.18

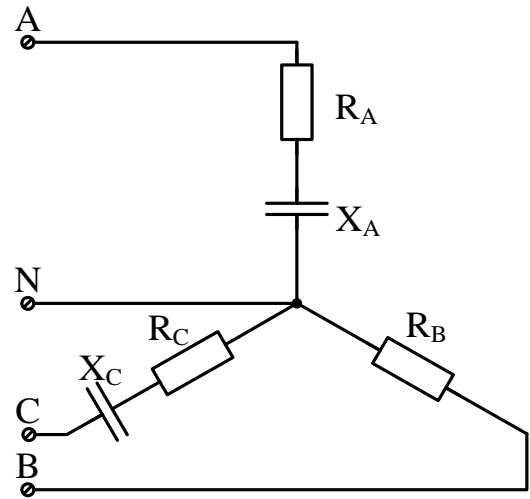


Рисунок 4.19

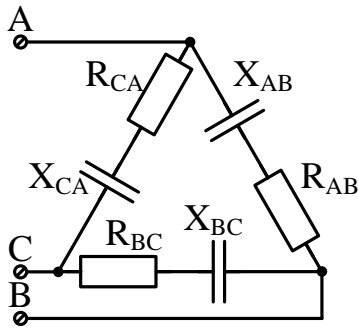


Рисунок 4.20

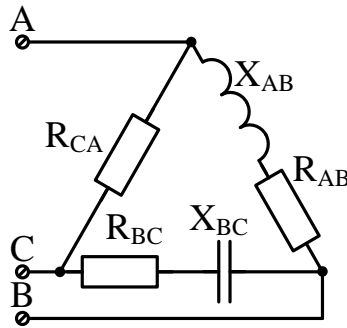


Рисунок 4.21

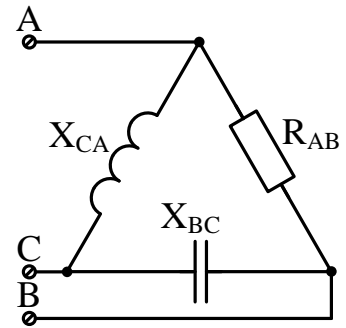


Рисунок 4.22

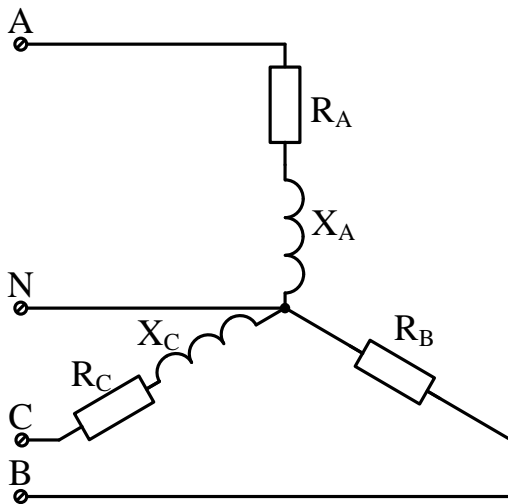


Рисунок 4.23

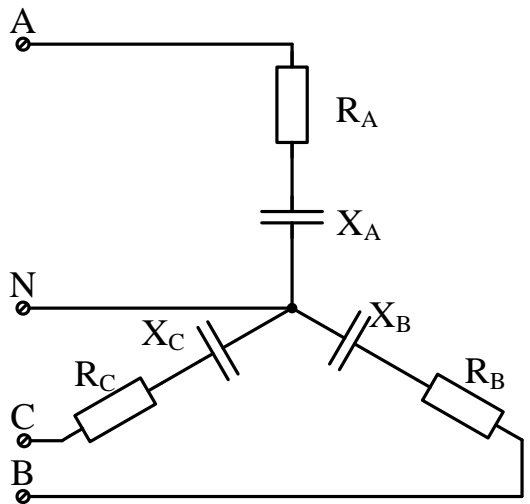


Рисунок 4.24

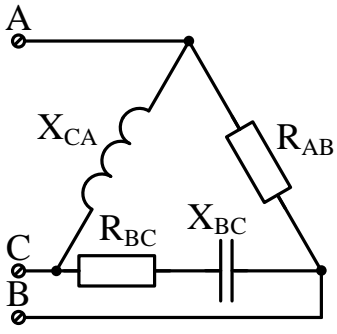


Рисунок 4.25

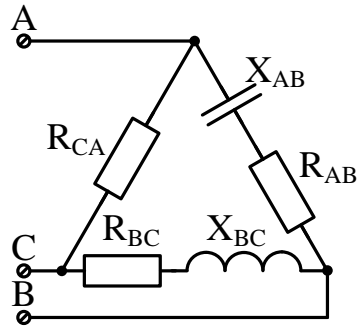


Рисунок 4.26

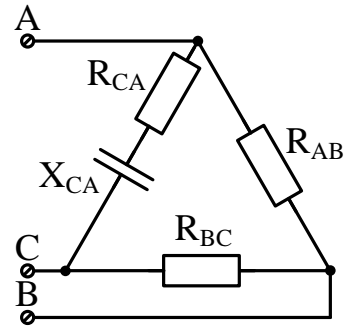


Рисунок 4.27

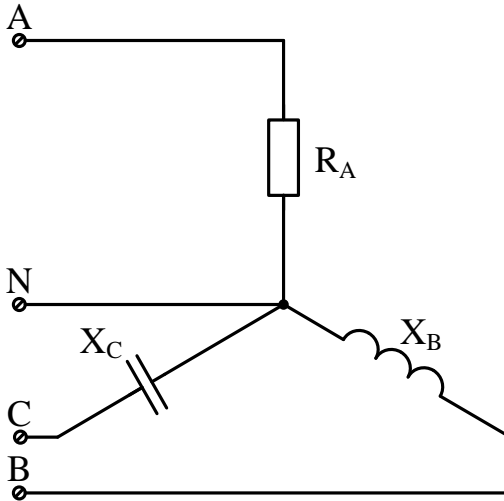


Рисунок 4.28

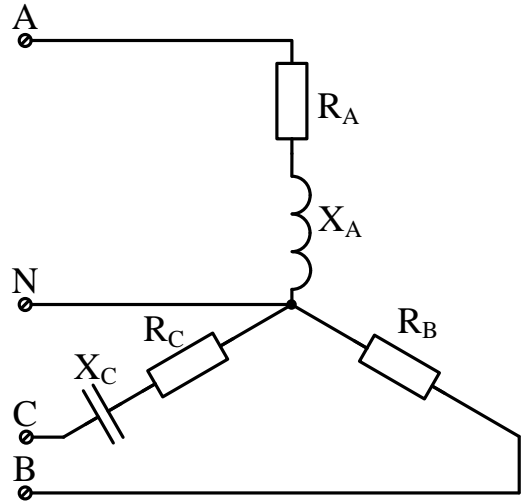


Рисунок 4.29

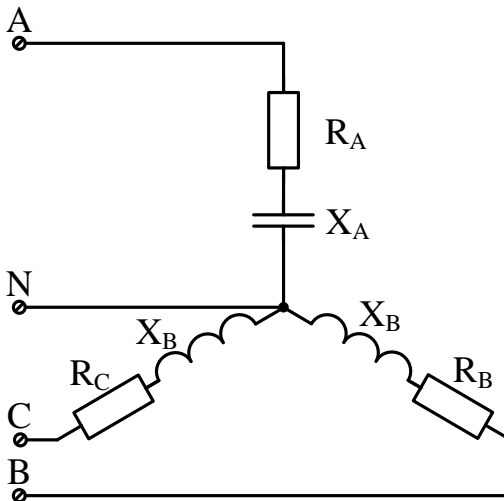


Рисунок 4.30

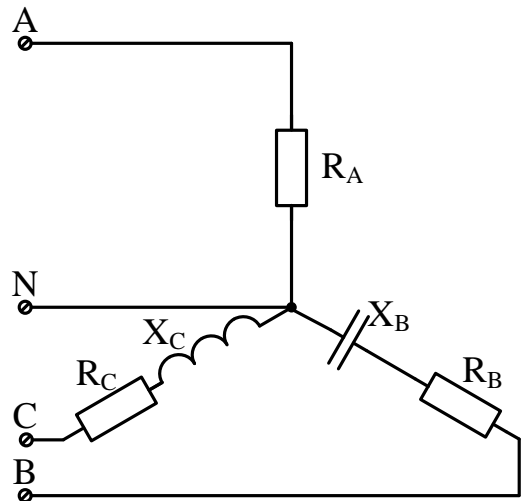


Рисунок 4.31

4 Контрольные вопросы

- 1 Трехфазная система токов (Что понимается под трехфазной системой тока, основоположник техники трехфазной системы тока, получение, аналитические выражения и графики мгновенных значений ЭДС трехфазного генератора).
- 2 Аналитические выражения и векторные диаграммы для действующих значений ЭДС. Обозначения, применяемые в трехфазных цепях для трехфазных машин.
Способы соединения фаз генератора и нагрузки. Какова их основная цель?
- 3 Соединения звездой (симметричная и несимметричная звезда, фазовые и линейные токи и напряжения). Связь между фазовыми и линейными токами и напряжениями в несимметричной звезде (вывод формул, векторные диаграммы). Тоже для симметричной звезды. Роль нулевого провода в трехфазных четырехпроводных цепях.
- 4 Соединение треугольником (определение, схема) соотношение между фазовыми и линейными токами и напряжениями в несимметричном треугольнике (вывод формул, векторные диаграммы). Тоже для симметричного треугольника.
- 5 Активная мощность симметричной трехфазной цепи, (вывод универсальной формулы для соединения звездой и треугольником). Реактивная и полная мощности симметричной трехфазной цепи (аналитические выражения, единицы измерения, треугольник мощностей).