

Тема 3. Расчет аварийных режимов работы трехфазных цепей

Расчет аварийных режимов работы следует отнести к частному случаю анализа трехфазных цепей при несимметричной нагрузке. В сравнении с нормальными режимами работы аварийные режимы характеризуются максимальными (минимальными) значениями токов и напряжений. Как правило, это критические режимы работы трехфазных цепей, которые были вызваны обрывами или короткими замыканиями в линейных, фазных проводниках, обеспечивающих подвод электрической энергии к нагрузке. Несмотря на аварийный режим работы цепи, считается, что трехфазный генератор сохраняет симметричную систему трех синусоидальных ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, сдвинутых по фазе на 120° .

При анализе аварийных режимов широко используют построение топографических и векторных диаграмм, что в ряде случаев существенно позволяет упростить расчеты.

Задача 3.1

В трехфазной симметричной системе с фазным напряжением $U_\phi = 220$ В (рис. 3.1) произошел обрыв линейного провода фазы А. Определить показания приборов электромагнитной системы, если сопротивления фаз нагрузки $r_a = r_b = r_c = 100$ Ом. Построить совмещенную топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

Решение

1. Фазные напряжения трехфазного источника образуют симметричную систему. Комплексы действующих значений фазных напряжений: если принять, что $\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ} = 220 \angle 0^\circ$ В, тогда

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_A = e^{-j120^\circ} \cdot 220 \angle 0^\circ = 220 \angle -120^\circ \text{ В,}$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_A = e^{j120^\circ} \cdot 220 \angle 0^\circ = 220 \angle 120^\circ \text{ В.}$$

2. Обрыв линейного провода фазы А нарушает симметрию фаз. В этом случае линейное напряжение подается на два последовательно включенных сопротивления r_b и r_c .

Комплекс действующего значения напряжения смещения нейтрали, учитывая, что $\underline{Z}_A = \infty$, определится из выражения

$$\begin{aligned} \underline{U}_{nN} &= \frac{\frac{\underline{U}_B}{r_b} + \frac{\underline{U}_C}{r_c}}{\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c}} = \frac{\frac{220 \angle -120^\circ}{100} + \frac{220 \angle 120^\circ}{100}}{\frac{1}{100} + \frac{1}{100}} = \\ &= \frac{2,2 \angle 180^\circ}{0,02 \angle 0^\circ} = 110 \angle 180^\circ \text{ В.} \end{aligned}$$

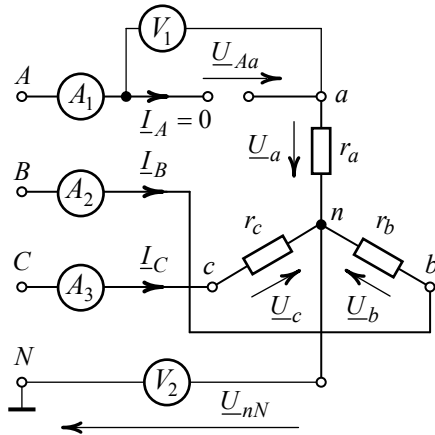


Рис. 3.1

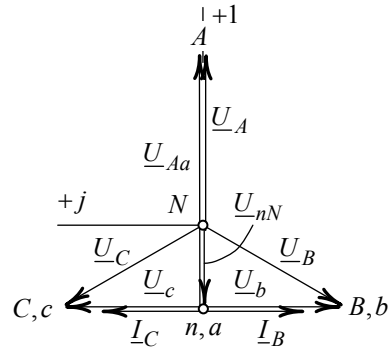


Рис. 3.2

3. Комплексы действующих значений напряжений на фазах нагрузки соответственно равны:

$$\underline{U}_a = 0,$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = 220 \angle -120^\circ - 110 \angle 180^\circ = 190,5 \angle -90^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = 220 \angle 120^\circ - 110 \angle 180^\circ = 190,5 \angle 90^\circ \text{ В}.$$

4. Комплексы действующих значений линейных (фазных) токов:

$$\underline{I}_A = 0,$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{r_b} = \frac{190,5 \angle -90^\circ}{100} = 1,91 \angle -90^\circ \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{r_c} = \frac{190,5 \angle 90^\circ}{100} = 1,91 \angle 90^\circ \text{ А}.$$

5. Напряжение поврежденной фазы в месте обрыва найдем по второму закону Кирхгофа (рис. 3.1):

$$\underline{U}_{Aa} + \underline{U}_{nN} = \underline{E}_A,$$

откуда $\underline{U}_{Aa} = \underline{E}_A - \underline{U}_{nN} = 220 \angle 0^\circ - 110 \angle 180^\circ = 330 \angle 0^\circ \text{ В}.$

6. Измерительные приборы показывают модули действующих значений комплексных величин:

$$U_{V2} = |\underline{U}_{nN}| = 110 \text{ В}, \quad U_{V1} = |\underline{U}_{Aa}| = 330 \text{ В},$$

$$I_{A1} = |\underline{I}_A| = 0 \text{ А}, \quad I_{A2} = |\underline{I}_B| = 1,91 \text{ А}, \quad I_{A3} = |\underline{I}_C| = 1,91 \text{ А}.$$

7. Совмещенная топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов при обрыве линейного провода фазы A приведена на рис. 3.2.

Построение начинаем с выбора масштабов напряжения и тока. На комплексной плоскости откладываем векторы фазных напряжений \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C . Фазы b и c нагрузки включены на линейное напряжение \underline{U}_{BC} . Вследствие равенства сопротивлений неповрежденных фаз точка n на диаграмме находится в середине

вектора \underline{U}_{BC} и напряжение $U_b = U_c = \frac{U_{BC}}{2}$. Соединив точки N и n , получим вектор напряжения смещения нейтрали \underline{U}_{nN} . Векторы, соединяющие точку n с точками b и c , образуют фазные напряжения \underline{U}_b и \underline{U}_c . Точку a поврежденной фазы совместим с точкой n , так как эти точки имеют одинаковые потенциалы. Соединив точки a и A , получим вектор напряжения \underline{U}_{Aa} в месте обрыва. Векторы линейных (фазных) токов \underline{I}_B и \underline{I}_C строим из точки n по направлению фазных напряжений.

Задача 3.2

К симметричному трехфазному генератору с фазным напряжением $U_\phi = 100$ В подключена симметричная нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом (рис. 3.3). Определить линейные токи, ток в нейтрали и показания амперметров при обрыве линейного провода в фазе А, если сопротивления нагрузок фаз $r_a = r_b = r_c = 50$ Ом. Построить совмещенную топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

Решение

1. Комплексы действующих значений фазных напряжений симметричного генератора:

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ} = 100|0^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_A = e^{-j120^\circ} \cdot 100|0^\circ = 100|-120^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_A = e^{j120^\circ} \cdot 100|0^\circ = 100|120^\circ \text{ В}.$$

2. Комплексы действующих значений линейных (фазных) токов, учитывая, что $\underline{U}_{nN} = 0$, определяются как

$$\underline{I}_A = 0,$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{r_b} = \frac{100|-120^\circ}{50} = 2|-120^\circ \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r_c} = \frac{100|120^\circ}{50} = 2|120^\circ \text{ А}.$$

3. Ток в нейтральном проводе:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_B + \underline{I}_C = 2|-120^\circ + 2|120^\circ = 2|180^\circ \text{ А}.$$

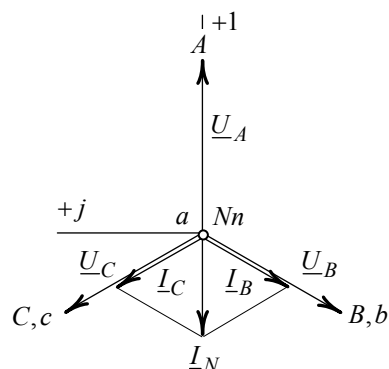
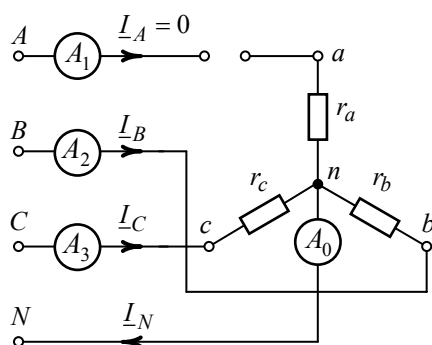


Рис. 3.3

Рис. 3.4

4. Показания амперметров соответствуют действующим значениям токов:

$$I_{A1} = |\underline{I}_A| = 0 \text{ A}, \quad I_{A2} = |\underline{I}_B| = 2 \text{ A},$$

$$I_{A3} = |\underline{I}_C| = 2 \text{ A}, \quad I_{A0} = |\underline{I}_N| = 2 \text{ A}.$$

5. Совмещенная топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов приведены на рис. 3.4. Построение начинаем с выбора масштабов для напряжения и тока. На комплексной плоскости строим векторы фазных напряжений генератора \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C . Напряжения на неповрежденных фазах нагрузки равны напряжениям на фазах генератора \underline{U}_B и \underline{U}_C . Потенциал точки a становится равным потенциалу точки n . Действующие значения токов в фазах В и С не изменятся по отношению к нормальному режиму. Векторы линейных (фазных) токов \underline{I}_B и \underline{I}_C строим из точки n по направлениям фазных напряжений. Ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме линейных токов \underline{I}_B и \underline{I}_C .

Задача 3.3

В трехфазной симметричной системе (рис. 3.5) с фазным напряжением источника $U_\phi = 110 \text{ В}$ произошло короткое замыкание в фазе a нагрузки. Определить показания приборов электромагнитной системы, если сопротивления фаз нагрузки $x_a = x_b = x_c = 50 \text{ Ом}$. Построить совмещенную топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

Решение

1. Комплексы действующих значений фазных напряжений симметричного генератора:

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ} = 110 \angle 0^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_A = e^{-j120^\circ} \cdot 110 \angle 0^\circ = 110 \angle -120^\circ \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_A = e^{j120^\circ} \cdot 110 \angle 0^\circ = 110 \angle 120^\circ \text{ В}.$$

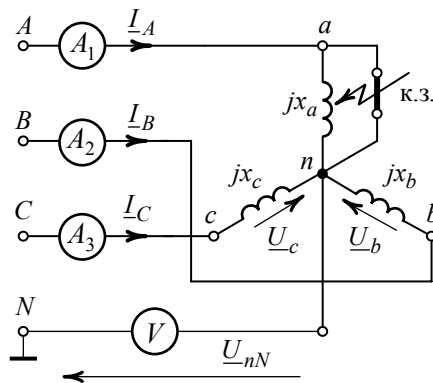


Рис. 3.5

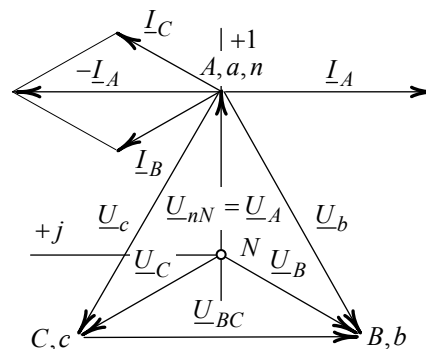


Рис. 3.6

2. При коротком замыкании в фазе a сопротивление фазы равно нулю. Напряжение смещения нейтрали станет равным фазному напряжению \underline{U}_A источника

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 110 \angle 0^\circ \text{ В.}$$

3. Напряжение на неповрежденных фазах b и c нагрузки станет равным линейному напряжению

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = \underline{U}_B - \underline{U}_A = 110 \angle -120^\circ - 110 \angle 0^\circ = 190,5 \angle -150^\circ \text{ В,}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = 110 \angle 120^\circ - 110 \angle 0^\circ = 190,5 \angle 150^\circ \text{ В.}$$

4. Комплексы действующих значений токов в фазах b и c :

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{jx_L} = \frac{190,5 \angle -150^\circ}{j50} = 3,81 \angle 120^\circ \text{ А,}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{jx_L} = \frac{190,5 \angle 150^\circ}{j50} = 3,81 \angle 60^\circ \text{ А.}$$

5. Комплекс действующего значения тока в поврежденной фазе определим по первому закону Кирхгофа:

$$-\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3,81 \angle 120^\circ + 3,81 \angle 60^\circ = 6,6 \angle 90^\circ \text{ А.}$$

6. Показания приборов соответствуют действующим значениям величин:

$$I_{A1} = |\underline{I}_A| = 6,6 \text{ А, } I_{A2} = |\underline{I}_B| = 3,81 \text{ А, } I_{A3} = |\underline{I}_C| = 3,81 \text{ А,}$$

$$U_V = |\underline{U}_{nN}| = 110 \text{ В.}$$

7. Построение совмещенной топографической диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов (рис. 3.6) начинаем с выбора масштабов напряжения и тока. На комплексной плоскости строим векторы фазных напряжений источника \underline{U}_A , \underline{U}_B и \underline{U}_C . При коротком замыкании потенциал точки a равен потенциалу нейтральной точки n нагрузки, поэтому на диаграмме точки a и n совпадают. Между нейтральными точками источника и нагрузки возникает напряжение смещения нейтрали, равное напряжению источника в фазе A : $\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A$. Векторы, соединяющие точку n с точками b и c , будут фазными напряжениями \underline{U}_b и \underline{U}_c неповрежденных фаз и равные по величине линейным напряжениям трехфазной системы. Векторы токов \underline{I}_B и \underline{I}_C строим относительно векторов напряжений фаз с учетом индуктивного характера нагрузки. Ток \underline{I}_A в фазе a определяем как геометрическую сумму фазных токов \underline{I}_B и \underline{I}_C .

Задача 3.4

К симметричному трехфазному генератору с фазным напряжением $U_\phi = 220 \text{ В}$ подключена нагрузка, соединенная звездой с нейтральным проводом, обладающим сопротивлением $r_0 = 10 \text{ Ом}$ (рис. 3.7). Определить показания амперметров электромагнитной системы для случая короткого замыкания в нагрузке фазы A , если сопротивления фаз $r_a = r_b = r_c = 20 \text{ Ом}$. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

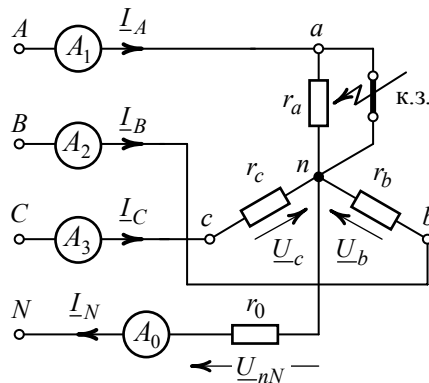


Рис. 3.7

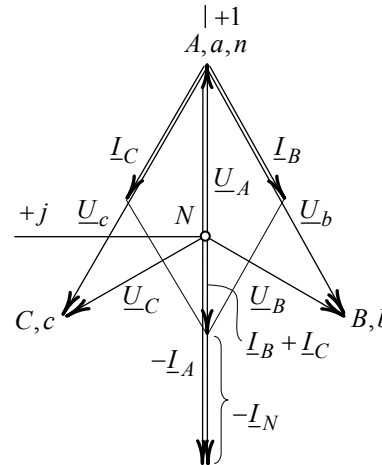


Рис. 3.8

Решение

1. Комплексы действующих значений фазных напряжений симметричного генератора:

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ} = 220 \underline{0^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_A = e^{-j120^\circ} \cdot 220 \underline{0^\circ} = 220 \underline{-120^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_A = e^{j120^\circ} \cdot 220 \underline{0^\circ} = 220 \underline{120^\circ} \text{ В}.$$

2. При коротком замыкании в фазе a потенциал нейтральной точки нагрузки n станет равным потенциалу точки a (рис. 3.7) и, следовательно, напряжение смещения нейтрали \underline{U}_{nN} будет определяться напряжением фазы A генератора

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 220 \underline{0^\circ} \text{ В}.$$

3. Комплекс действующего значения тока в нейтральном проводе определим по закону Ома

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{nN}}{r_0} = \frac{220 \underline{0^\circ}}{10} = 22 \underline{0^\circ} \text{ А}.$$

4. Напряжение на фазах b и c нагрузки увеличится до линейного напряжения источника

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = 220 \underline{-120^\circ} - 220 \underline{0^\circ} = 380 \underline{-150^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = 220 \underline{120^\circ} - 220 \underline{0^\circ} = 380 \underline{150^\circ} \text{ В}.$$

5. Комплексы действующих значений токов в неповрежденных фазах:

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{r_b} = \frac{380 \underline{-150^\circ}}{20} = 19 \underline{-150^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{r_c} = \frac{380 \underline{150^\circ}}{20} = 19 \underline{150^\circ} \text{ А}.$$

6. Комплекс действующего значения тока в фазе A определим по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= -\underline{I}_B - \underline{I}_C + \underline{I}_N = \\ &= -19 \angle -150^\circ - 19 \angle 150^\circ + 22 \angle 0^\circ = 54,9 \angle 0^\circ \text{ А.} \end{aligned}$$

7. Показания амперметров соответствуют действующим значениям токов:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= |\underline{I}_A| = 54,9 \text{ А}, \quad I_{A2} = |\underline{I}_B| = 19 \text{ А}, \\ I_{A3} &= |\underline{I}_C| = 19 \text{ А}, \quad I_{A0} = |\underline{I}_N| = 22 \text{ А}. \end{aligned}$$

8. Совмещенная топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов приведены на рис. 3.8. Построение топографической диаграммы напряжений выполняется аналогично примеру задачи 3.3 (рис. 4.6).

Векторы токов \underline{I}_B , \underline{I}_C и \underline{I}_N строим из точки n . Вектор тока \underline{I}_A получим, предварительно определив геометрическую сумму векторов \underline{I}_B и \underline{I}_C , к которой затем геометрически прибавляем вектор тока \underline{I}_N нейтрали.

Задача 3.5

К симметричному трехфазному генератору с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ подключена несимметричная нагрузка, соединенная треугольником (рис. 3.9). Определить показания амперметров при обрыве линейного провода в фазе C , если сопротивления фаз $r_{ab} = 20 \text{ Ом}$, $x_{bc} = 16 \text{ Ом}$, $r_{ca} = 12 \text{ Ом}$. Построить совмещенную топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

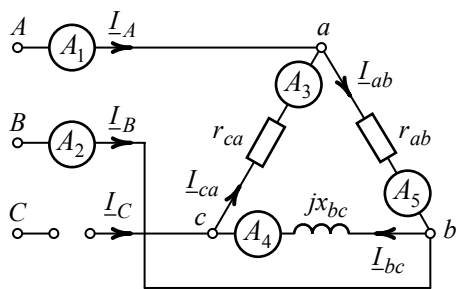


Рис. 3.9

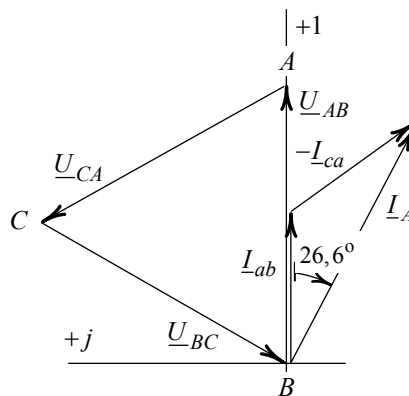


Рис. 3.10

Решение

1. Комплексы действующих значений линейных напряжений симметричного генератора. Пусть

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j0^\circ} = 380 \angle 0^\circ \text{ В,}$$

тогда

$$\underline{U}_{BC} = a^2 \underline{U}_{AB} = e^{-j120^\circ} \cdot 380 \angle 0^\circ = 380 \angle -120^\circ \text{ В,}$$

$$\underline{U}_{CA} = a \underline{U}_{AB} = e^{j120^\circ} \cdot 380 \angle 0^\circ = 380 \angle 120^\circ \text{ В.}$$

2. Вследствие обрыва линейного провода в фазе C линейный ток $\underline{I}_C = 0$. Фазы нагрузок bc и ca в этом случае включены последовательно на линейное напряжение \underline{U}_{AB} .

Комплексы действующих значений токов в фазах нагрузок определим по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{r_{ab}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{20} = 19 \angle 0^\circ \text{ A},$$

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{AB}}{r_{ca} + jx_{bc}} = \frac{-380 \angle 0^\circ}{12 + j16} = 19 \angle 126,9^\circ \text{ A}.$$

3. Комплексы действующих значений линейных токов неповрежденных фаз определим по первому закону Кирхгофа через разности фазных токов:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 19 \angle 0^\circ - 19 \angle 126,9^\circ = 34 \angle -26,6^\circ \text{ A},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 19 \angle 126,9^\circ - 19 \angle 0^\circ = 34 \angle 153,5^\circ \text{ A}.$$

Показания амперметров будут соответствовать действующим значениям токов:

$$I_{A1} = |\underline{I}_A| = 34 \text{ A}, \quad I_{A2} = |\underline{I}_B| = 34 \text{ A}, \quad I_{A3} = I_{A4} = |\underline{I}_{bc}| = 19 \text{ A},$$

$$I_{A5} = |\underline{I}_{ab}| = 19 \text{ A}.$$

4. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов приведены на рис. 3.10. Построение диаграммы начинаем с выбора масштабов для напряжения и тока. На комплексной плоскости строим векторы линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} и \underline{U}_{CA} . Вектор линейного тока \underline{I}_A определяем как геометрическую сумму фазных токов \underline{I}_{ab} и \underline{I}_{ca} , которые строим относительно линейного напряжения \underline{U}_{AB} с соответствующим фазным углом сдвига.

Задача 3.6

К симметричному трехфазному генератору с линейным напряжением $U_{л} = 380 \text{ В}$ подключена несимметричная нагрузка, соединенная треугольником (рис. 3.11). Определить показания амперметров электромагнитной системы, установленных в линейных проводниках при обрыве фазы ab , если $x_L = x_C = 50 \text{ Ом}$. Построить топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

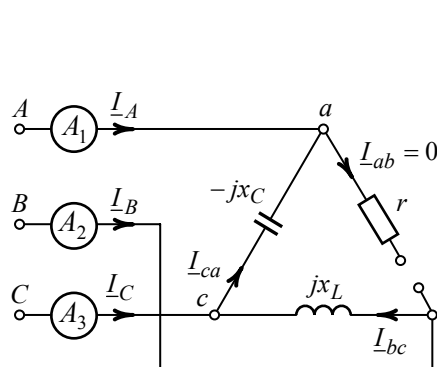


Рис. 3.11

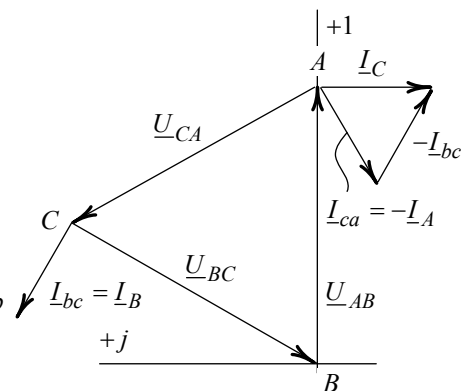


Рис. 3.12

Решение

1. Комплексы действующих значений линейных напряжений симметричного генератора:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= U_{\text{л}} e^{j0^\circ} = 380 \underline{0^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{BC} &= a^2 \underline{U}_{AB} = e^{-j120^\circ} \cdot 380 \underline{0^\circ} = 380 \underline{-120^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{CA} &= a \underline{U}_{AB} = e^{j120^\circ} \cdot 380 \underline{0^\circ} = 380 \underline{120^\circ} \text{ В}.\end{aligned}$$

2. Вследствие обрыва наблюдается холостой ход в фазе ab , следовательно, $\underline{I}_{ab} = 0$.

Комплексы действующих значений токов неповрежденных фаз рассчитаем по закону Ома:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{jx_L} = \frac{380 \underline{-120^\circ}}{j50} = 7,6 \underline{150^\circ} \text{ А}, \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{-jx_C} = \frac{380 \underline{120^\circ}}{-j50} = 7,6 \underline{-150^\circ} \text{ А}.\end{aligned}$$

3. Комплексы действующих значений линейных токов:

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_{ca} = 7,6 \underline{30^\circ} \text{ А}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} = 7,6 \underline{150^\circ} \text{ А}.$$

Линейный ток \underline{I}_C определим по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 7,6 \underline{-150^\circ} - 7,6 \underline{150^\circ} = 7,6 \underline{-90^\circ} \text{ А}.$$

4. Показания амперметров будут определяться модулями соответствующих действующих значений комплексов токов

$$I_{A1} = I_{A2} = I_{A3} = 7,6 \text{ А}.$$

5. Совмещенная топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов приведены на рис. 3.12. Построение начинаем с выбора масштабов напряжения и тока. На комплексной плоскости строим векторы линейных напряжений \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} , равных фазным напряжениям нагрузки. Векторы фазных токов \underline{I}_{bc} и \underline{I}_{ca} строим относительно соответствующих напряжений фаз с учетом характера нагрузки. Вектор линейного тока \underline{I}_C определяем как геометрическую сумму векторов фазных токов \underline{I}_{ca} и \underline{I}_{bc} .

Задача 3.7

В трехфазной системе (рис. 3.13) с фазным напряжением источника $U_{\phi} = 240 \text{ В}$ произошло короткое замыкание в фазе ab . Определить показания амперметров электромагнитной системы, если $r = 24 \text{ Ом}$, $x_L = 4 \text{ Ом}$.

Решение

1. Комплексы действующих значений фазных напряжений:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= U_{\phi} e^{j0^\circ} = 240 \underline{0^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_A = e^{-j120^\circ} \cdot 240 \underline{0^\circ} = 240 \underline{-120^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_A = e^{j120^\circ} \cdot 240 \underline{0^\circ} = 240 \underline{120^\circ} \text{ В}.\end{aligned}$$

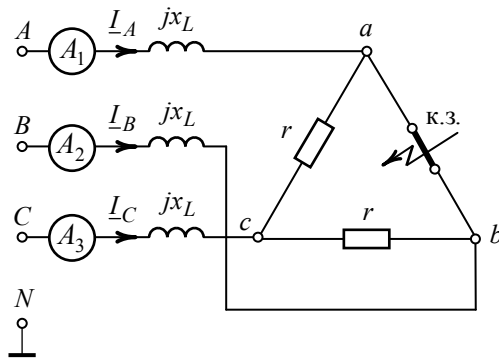


Рис. 3.13

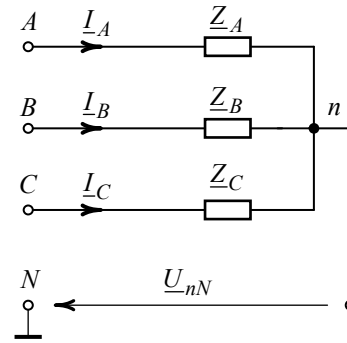


Рис. 3.14

2. При коротком замыкании в фазе ab сопротивление фазы равно нулю, следовательно, потенциал точки a равен потенциалу точки b . Схему (рис. 3.13) можно заменить эквивалентной звездой, представленной на рис. 3.14, где $Z_A = jx_L$, $Z_B = jx_L$,

$$Z_C = \frac{r}{2} + jx_L.$$

3. Комплекс действующего значения напряжения смещения нейтрали (рис. 3.14):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{nN} &= \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}} = \frac{\frac{240|0^\circ}{j4} + \frac{240|-120^\circ}{j4} + \frac{240|120^\circ}{12+j4}}{\frac{1}{j4} + \frac{1}{j4} + \frac{1}{12+j4}} = \\ &= \frac{56,92|-168,4^\circ}{0,53|-81,9^\circ} = 107,39|-86,5^\circ \text{ В.} \end{aligned}$$

4. Комплексы действующих значений линейных токов:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{U_A - U_{nN}}{Z_A} = \frac{240|0^\circ - 107,39|-86,5^\circ}{j4} = \\ &= \frac{256,88|24,7^\circ}{j4} = 64,22|-65,3^\circ \text{ А,} \\ \underline{I}_B &= \frac{U_B - U_{nN}}{Z_B} = \frac{240|-120^\circ - 107,39|-86,5^\circ}{j4} = \\ &= \frac{161,71|-141,5^\circ}{j4} = 40,43|128,5^\circ \text{ А,} \\ \underline{I}_C &= \frac{U_C - U_{nN}}{Z_C} = \frac{240|120^\circ - 107,39|-86,5^\circ}{12+j4} = \\ &= \frac{339,5|111,9^\circ}{12,65|18,4^\circ} = 26,84|93,5^\circ \text{ А.} \end{aligned}$$

5. Показания амперметров трехфазной системы соответствуют действующим значениям линейных токов:

$$I_{A1} = |\underline{I}_A| = 64,22 \text{ А}, \quad I_{A2} = |\underline{I}_B| = 40,43 \text{ А},$$

$$I_{A3} = |\underline{I}_C| = 26,84 \text{ А}.$$