

Рис. 1.1. Расчетная схема сети.

2. Расчет переходного процесса

2.1 Расчет методом эквивалентных ЭДС

2.1.1 Составление однолинейной схемы замещения

Составляем однолинейную схему замещения сверхпереходного режима, в которой все элементы учтены своими параметрами, а трансформаторные связи заменены на электрические. Для определения параметров схемы замещения используем точное приведение в именованных единицах (ТПИЕ). За базисную ступень напряжения принимаем ту, на которой произошло КЗ, к ней приводим параметры всех элементов. На рис 2.1 изображена схема замещения с найденными параметрами.

Выбираем базисные единицы: $U_6=10,5\text{кВ}$;

2.1.2 Определение параметров элементы схемы

Найдем параметры схемы замещения, используя исходные данные.

Генераторы:

G1 и G2:

$$X_{G1} = X_{G2} = X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T2})^2 = 0,2 \cdot \frac{10,5^2}{78,7} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{10,5}\right)^2 = 0,28 \text{ (Ом)}$$

$$E_{G1} = E_{G2} = (1 + X_d'' \cdot \sin\varphi) \cdot U_H \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})$$

$$E_{G1} = E_{G2} = (1 + 0,2 \cdot 0,6) \cdot 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{10,5} = 11,76 \text{ (кВ)}$$

G3 и G4:

$$X_{G3} = X_{G4} = X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$$

$$X_{G3} = X_{G4} = 0,143 \cdot \frac{10,5^2}{37,5} = 0,42 \text{ (Ом)}$$

$$E_{G3} = E_{G4} = (1 + X_d'' \cdot \sin\varphi) \cdot U_H$$

$$E_{G3} = E_{G4} = (1 + 0,143 \cdot 0,6) \cdot 10,5 = 11,401 \text{ (кВ)}$$

Трансформаторы:

T1 и T2:

Для нахождения сопротивлений обмоток данных трансформаторов необходимо знать напряжения короткого замыкания этих обмоток:

$$U_{кв} = 0,5 \cdot (U_{квс} + U_{квн} - U_{кcn}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6,5 - 17,5) \approx 0\%$$

$$U_{кс} = 0,5 \cdot (U_{квс} + U_{кcn} - U_{квн}) = 0,5 \cdot (10,5 + 17,5 - 6,5) = 10,75 \%$$

$$U_{кн} = 0,5 \cdot (U_{квн} + U_{кcn} - U_{квс}) = 0,5 \cdot (6,5 + 17,5 - 10,5) = 6,75 \%$$

Далее находим сопротивления обмоток трансформатора:

$$X_{T1}^B = X_{T2}^B = 0$$

$$X_{T1}^C = X_{T2}^C = \frac{U_{кс}}{100} \cdot \frac{U_C^2}{S_H} \cdot (k_{T4})^2$$

$$X_{T1}^C = X_{T2}^C = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{38,5^2}{120} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 0,099 \text{ (Ом)}$$

$$X_{T1}^H = X_{T2}^H = \frac{U_{кн}}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2$$

$$X_{T1}^H = X_{T2}^H = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{11^2}{120} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{10,5}\right)^2 = 0,068 \text{ (Ом)}$$

T3, T4:

$$X_{T3} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{38,5^2}{80} = 1,946 \text{ (Ом)}$$

$$X_{T4} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{38,5^2}{80} = 1,39 \text{ (Ом)}$$

T5:

$$X_{T5} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{63} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0,184 \text{ (Ом)}$$

T6:

$$X_{T6} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{63} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0,184 \text{ (Ом)}$$

T7:

$$X_{T7} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} \cdot (k_{T4})^2 = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{37^2}{48} \cdot \left(\frac{10,5}{37}\right)^2 = 0.172(\text{Ом})$$

T8:

$$X_{T8} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{U_B^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{40} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.289(\text{Ом})$$

Синхронный компенсатор:

$$X_{СК} = X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T6})^2 = 0,26 \cdot \frac{10,5^2}{37,5} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}\right)^2 = 0.764(\text{Ом})$$

$$E_{СК} = (1 + X_d'') \cdot U_H \cdot k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T6} = (1 + 0,26) \cdot 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5} = 13.23(\text{кВ})$$

Обобщенная нагрузка:

$$X_{H1} = 0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T6})^2 = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{18} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}\right)^2 = 2.144(\text{Ом})$$

$$E_{H1} = 0,85 \cdot U_H \cdot k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T6} = 0,85 \cdot 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5} = 8.925(\text{кВ})$$

$$X_{H2} = 0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T7})^2$$

$$X_{H2} = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{10} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{10,5}\right)^2 = 3.859(\text{Ом})$$

$$E_{H2} = 0,85 \cdot U_H \cdot (k_{T4} \cdot k_{T7})$$

$$E_{H2} = 0,85 \cdot 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{10,5} = 8.925(\text{кВ})$$

$$X_{H3} = 0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T8})^2$$

$$X_{H3} = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{20} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}\right)^2 = 1.929(\text{Ом})$$

$$X_{H4} = 0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T8})^2$$

$$X_{H4} = 0,35 \cdot \frac{10,5^2}{7} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}\right)^2 = 5.513(\text{Ом})$$

$$E_{H3} = E_{H4} = 0,85 \cdot U_H \cdot k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T8} = 0,85 \cdot 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}$$

$$= 8.925 \text{ (кВ)}$$

Линии:

$$X_{W1} = X_{уд} \cdot l_1 \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = 0,4 \cdot 77 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.257 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W2} = X_{уд} \cdot l_2 \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = 0,4 \cdot 55 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.183 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W3} = X_{уд} \cdot l_3 \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = 0,4 \cdot 80 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.267 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W4} = X_{уд} \cdot l_4 \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = 0,4 \cdot 43 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.143 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W5} = X_{уд} \cdot l_5 \cdot (k_{T4})^2 = 0,4 \cdot 38 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 1.131 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W6} = X_{уд} \cdot l_6 \cdot (k_{T4})^2 = 0,4 \cdot 25 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 0.744 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W7} = X_{уд} \cdot l_7 \cdot (k_{T4})^2 = 0,4 \cdot 30 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 0.893 \text{ (Ом)}$$

$$X'_{W8} = X''_{W8} = X_{уд} \cdot l_8 \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1})^2 = 0,4 \cdot 43 \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115}\right)^2 = 0.143 \text{ (Ом)}$$

$$X_{W8} = \frac{X'_{W8} \cdot X''_{W8}}{X'_{W8} + X''_{W8}} = \frac{(0.143 \cdot 0.143)}{(0.143 + 0.143)} = 0.072 \text{ (Ом)}$$

Реакторы:

$$X_{L1} = X = 0,25 \text{ (Ом)}$$

$$X_{L2} = X = 20 \text{ (Ом)}$$

Соседняя электроэнергетическая система:

$$X_C = \frac{U_H^2}{S_K} \cdot (k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T5})^2 = \frac{10,5^2}{250} \cdot \left(\frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5}\right)^2 = 0.441 \text{ (Ом)}$$

$$E_C = U_H \cdot k_{T4} \cdot k_{T1} \cdot k_{T5} = 10,5 \cdot \frac{10,5}{38,5} \cdot \frac{38,5}{115} \cdot \frac{115}{10,5} = 10.5 \text{ (кВ)}$$

Значения всех параметров, определенных выше вносим в схему замещения (см. рис. 2.1)

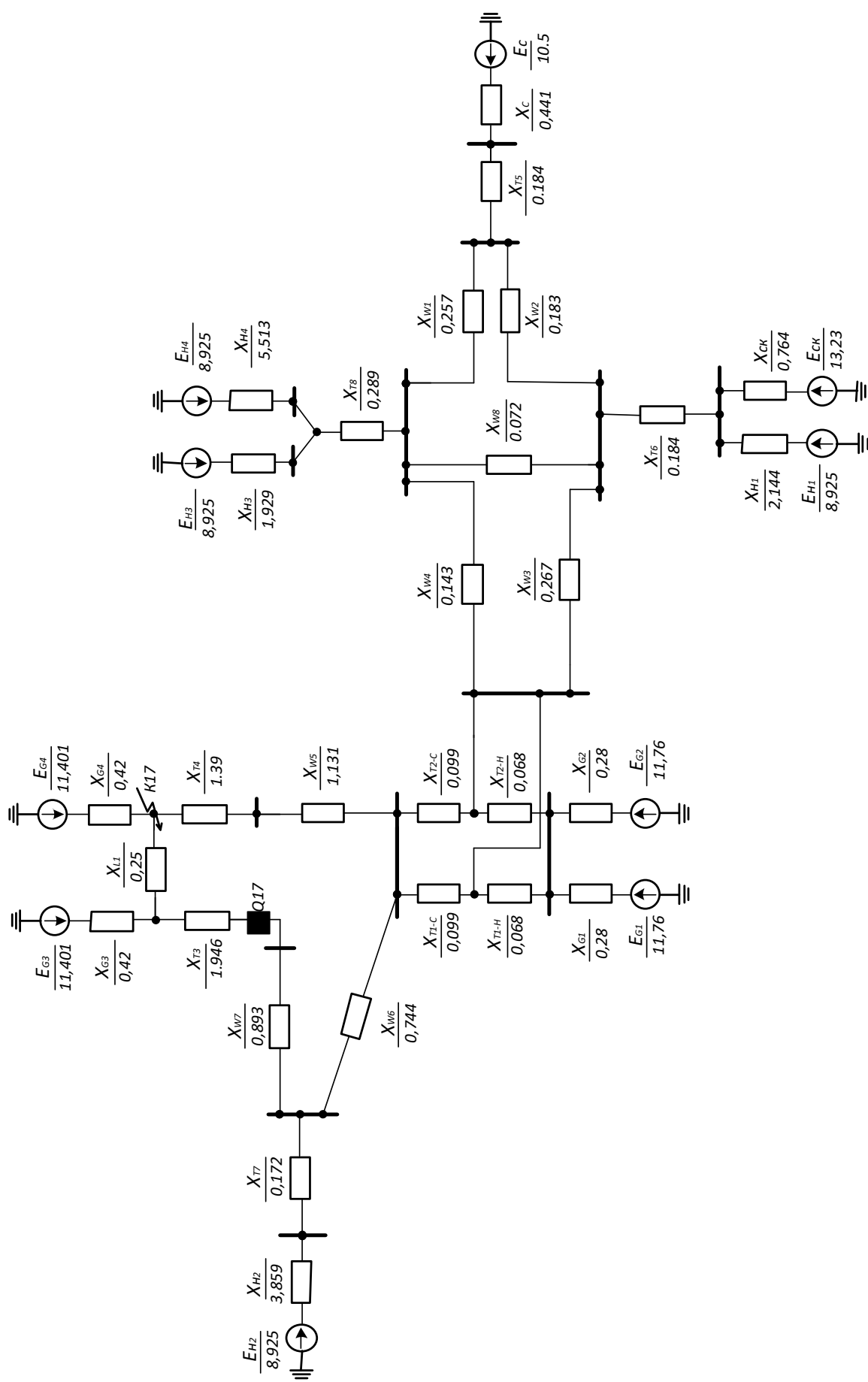


Рис. 2.1. Эквивалентная схема замещения элементов сети.

2.2 Преобразование схемы замещения к простейшему виду

Для нахождения тока трехфазного короткого замыкания необходимо эквивалентировать схему относительно точки КЗ при помощи известных методов (последовательное и параллельное включение элементов, преобразования из звезды в треугольник и обратно).

Исходная схема представлена на рисунке 2.1.

Сделаем простейшие преобразования последовательного и параллельного соединения элементов:

$$X_1 = X_{W5} + X_{T4} = 1.131 + 1.39 = 2.521(\text{Ом})$$

$$X_2 = X_{H2} + X_{T7} = 3.859 + 0.172 = 4.031(\text{Ом})$$

$$X_3 = \frac{(X_{T1}^c \cdot X_{T2}^c)}{X_{T1}^c + X_{T2}^c} = \frac{(0.099 \cdot 0.099)}{(0.099 + 0.099)} = 0,0495 (\text{Ом})$$

$$X_4 = \frac{(X_{T1}^H \cdot X_{T2}^H)}{X_{T1}^H + X_{T2}^H} = \frac{(0.068 \cdot 0.068)}{(0.068 + 0.068)} = 0.034(\text{Ом})$$

$$X_5 = \frac{X_{G1} \cdot X_{G2}}{X_{G1} + X_{G2}} = \frac{(0.28 \cdot 0.28)}{(0.28 + 0.28)} = 0.14(\text{Ом})$$

$$E_1 = \frac{E_{G1} \cdot X_{G2} + E_{G2} \cdot X_{G1}}{X_{G1} + X_{G2}} = \frac{11.76 \cdot 0.28 + 11.76 \cdot 0.28}{(0.28 + 0.28)} = 11.76 (\text{кВ})$$

$$X_6 = \frac{(X_{H1} \cdot X_{CK})}{X_{H1} + X_{CK}} + X_{T6} = \frac{(2.144 \cdot 0.764)}{(2.144 + 0.764)} + 0.184 = 0.747(\text{Ом})$$

$$E_2 = \frac{E_{H1} \cdot X_{CK} + E_{CK} \cdot X_{H1}}{X_{H1} + X_{CK}} = \frac{8.925 \cdot 0.764 + 13.23 \cdot 2.144}{(2.144 + 0.764)} = 12.099 (\text{кВ})$$

$$X_7 = \frac{(X_{H3} \cdot X_{H4})}{X_{H3} + X_{H4}} + X_{T8} = \frac{(1.929 \cdot 5.513)}{(1.929 + 5.513)} + 0.289 = 1.718 (\text{Ом})$$

$$E_3 = \frac{E_{H3} \cdot X_{H4} + E_{H4} \cdot X_{H3}}{X_{H3} + X_{H4}} = \frac{8.925 \cdot 5.513 + 8.925 \cdot 1.929}{(1.929 + 5.513)} = 8.925 (\text{кВ})$$

$$X_8 = X_C + X_{T5} = 0.441 + 0.184 = 0.625 (\text{Ом})$$

$$X_9 = X_4 + X_5 = 0.034 + 0.14 = 0.174 (\text{Ом})$$

Получим см. рис. 2.2

Преобразуем $YX_{W1}X_8X_{W2} \rightarrow \Delta X_{10}X_{11}X_{12}$:

$$X_{10} = X_{W1} + X_8 + \frac{X_{W1} \cdot X_8}{X_{W2}} = 0.257 + 0.625 + \frac{0.257 \cdot 0.625}{0.183} = 1.76(\text{Ом})$$

$$X_{11} = X_{W1} + X_{W2} + \frac{X_{W1} \cdot X_{W2}}{X_8} = 0.257 + 0.183 + \frac{0.257 \cdot 0.183}{0.625} = 0.515(\text{Ом})$$

$$X_{12} = X_8 + X_{W2} + \frac{X_8 \cdot X_{W2}}{X_{W1}} = 0.625 + 0.183 + \frac{0.625 \cdot 0.183}{0.257} = 1.253(\text{Ом})$$

Разрежем $\Delta X_{10}X_{11}X_{12}$ в узле с ЭДС по две параллельные ветви с одинаковым ЭДС $E_C = E'_C = E''_C$ и после заменим параллельные ветви с генерирующими источниками на эквивалентные.

Получим см. рис. 2.3

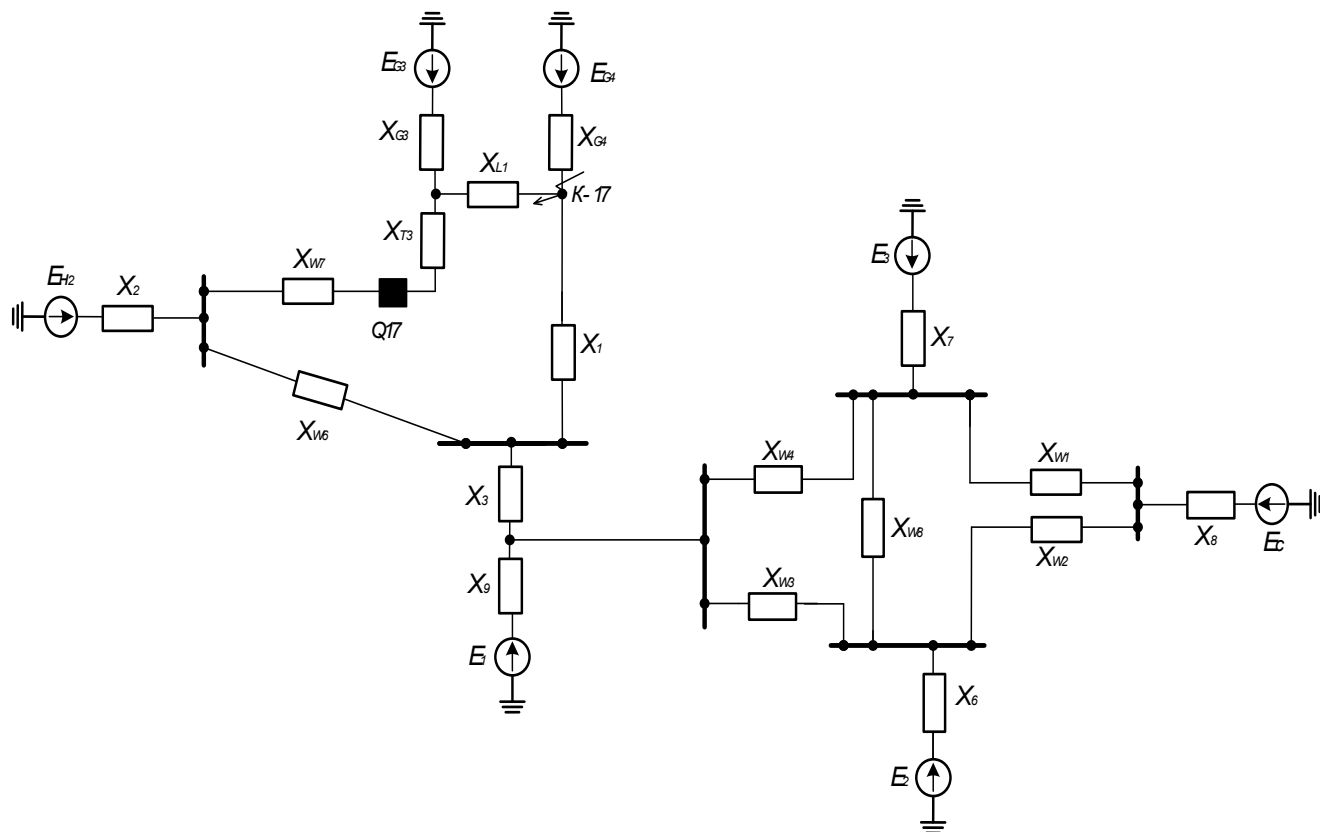


Рис. 2.2 Упрощенная схема замещения

$$X_{13} = \frac{(X_{11} \cdot X_{W8})}{X_{11} + X_{W8}} = \frac{(0.515 \cdot 0.072)}{(0.515 + 0.072)} = 0.063(\text{Ом})$$

$$X_{14} = \frac{(X_{10} \cdot X_7)}{X_{10} + X_7} = \frac{(1.76 \cdot 1.718)}{(1.76 + 1.718)} = 0.869(\text{Ом})$$

$$E_4 = \frac{E'_C \cdot X_7 + E_3 \cdot X_{10}}{X_{10} + X_7} = \frac{10.5 \cdot 1.718 + 8.925 \cdot 1.76}{(1.76 + 1.718)} = 9.703(\text{кВ})$$

$$X_{15} = \frac{(X_{12} \cdot X_6)}{X_{12} + X_6} = \frac{(1.253 \cdot 0.747)}{(1.253 + 0.747)} = 0.468(\text{Ом})$$

$$E_5 = \frac{E''_c \cdot X_6 + E_2 \cdot X_{12}}{X_{12} + X_6} = \frac{10.5 \cdot 0.747 + 12.099 \cdot 1.253}{(1.253 + 0.747)} = 11.502 \text{ (кВ)}$$

Получим см. рис. 2.4

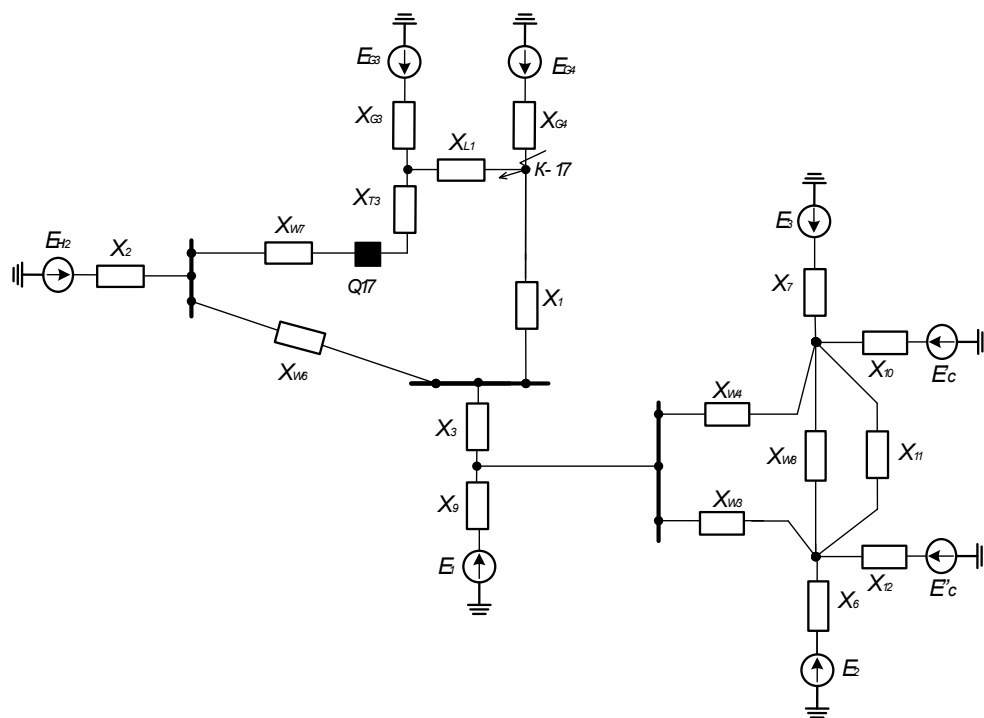


Рис. 2.3 Упрощенная схема замещения

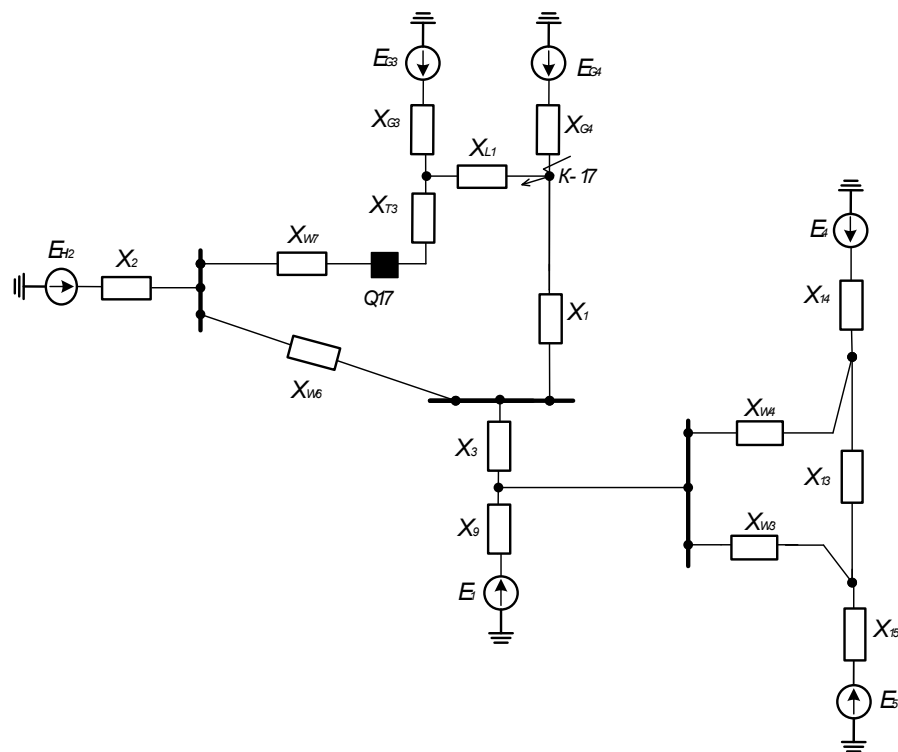


Рис. 2.4 Упрощенная схема замещения

Преобразуем $\Delta X_{W4}X_{13}X_{W3} \rightarrow YX_{16}X_{17}X_{18}$:

$$X_{16} = \frac{X_{W4} \cdot X_{13}}{X_{W4} + X_{13} + X_{W3}} = \frac{0.143 \cdot 0.063}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.019 \text{ (Ом)}$$

$$X_{17} = \frac{X_{W4} \cdot X_{W3}}{X_{W4} + X_{13} + X_{W3}} = \frac{0.143 \cdot 0.267}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.081 \text{ (Ом)}$$

$$X_{18} = \frac{X_{13} \cdot X_{W3}}{X_{W4} + X_{13} + X_{W3}} = \frac{0.063 \cdot 0.267}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.036 \text{ (Ом)}$$

Получим см. рис. 2.5

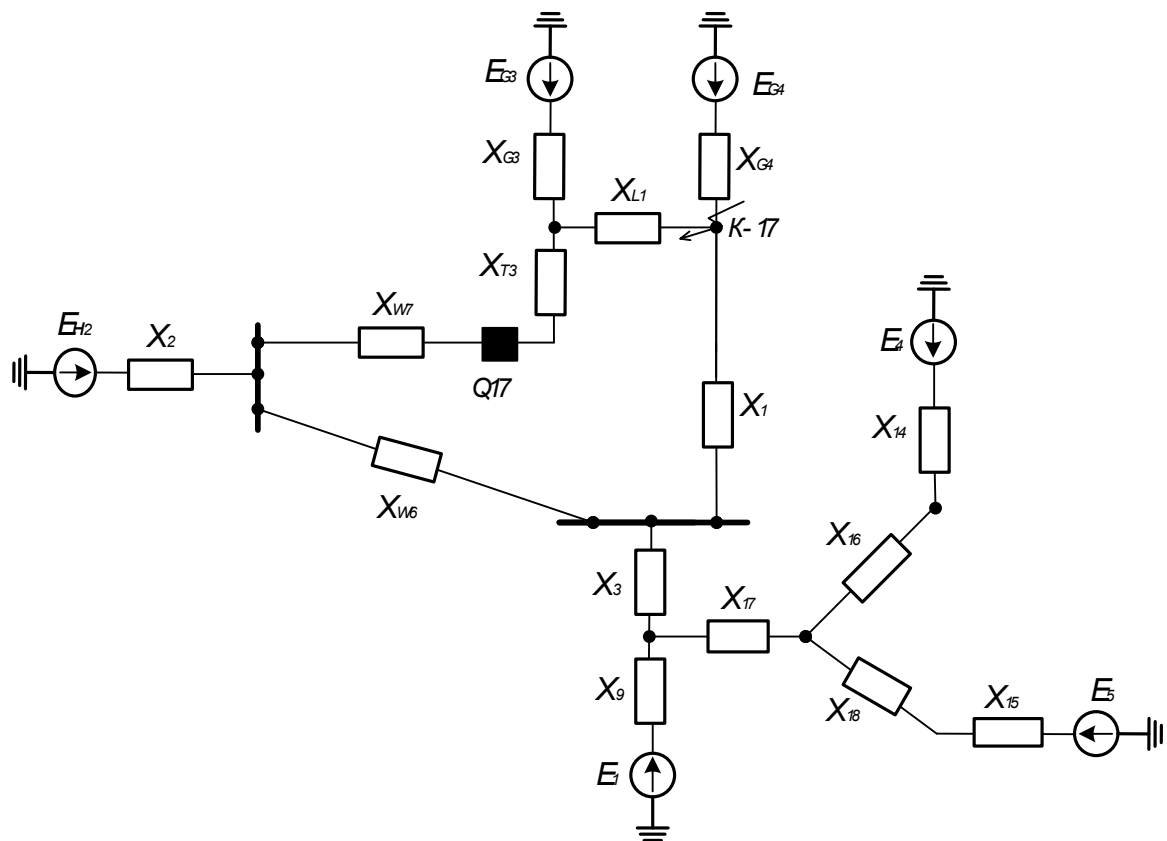


Рис. 2.5 Упрощенная схема замещения

$$X_{19} = X_{16} + X_{14} = 0.019 + 0.869 = 0.888 \text{ (Ом)}$$

$$X_{20} = X_{18} + X_{15} = 0.036 + 0.468 = 0.504 \text{ (Ом)}$$

$$X_{21} = \frac{(X_{19} \cdot X_{20})}{X_{19} + X_{20}} + X_{17} = \frac{(0.888 \cdot 0.504)}{(0.888 + 0.504)} + 0.081 = 0.403 \text{ (Ом)}$$

$$E_6 = \frac{E_4 \cdot X_{20} + E_5 \cdot X_{19}}{X_{19} + X_{20}} = \frac{9.703 \cdot 0.504 + 11.502 \cdot 0.888}{(0.888 + 0.504)} = 10.851 \text{ (кВ)}$$

Получим см. рис. 2.6

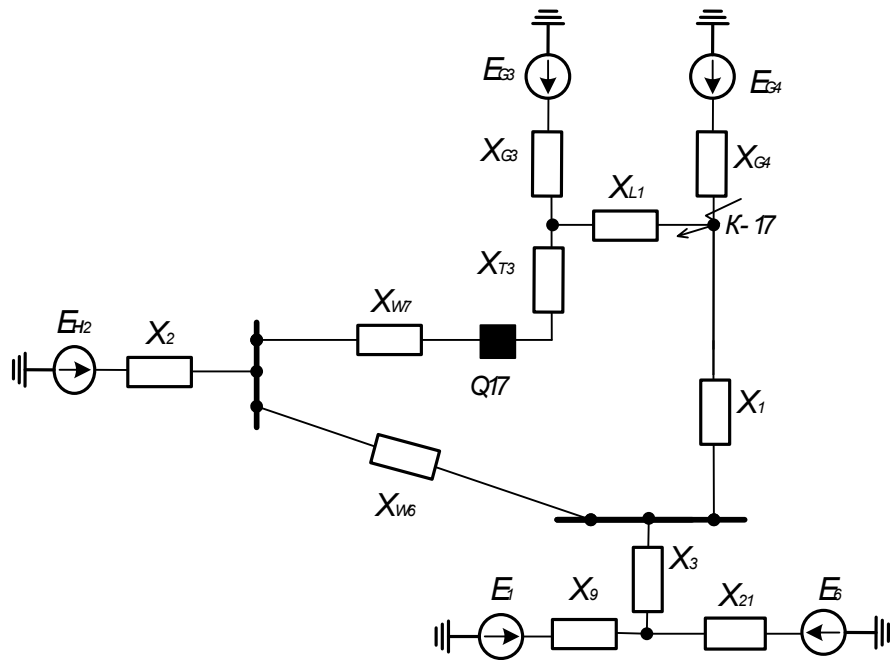


Рис. 2.6 Упрощенная схема замещения

$$X_{22} = \frac{(X_9 \cdot X_{21})}{X_9 + X_{21}} + X_3 = \frac{(0.174 \cdot 0.403)}{(0.174 + 0.403)} + 0.0495 = 0.172(\text{Ом})$$

$$E_7 = \frac{E_1 \cdot X_{21} + E_6 \cdot X_9}{X_9 + X_{21}} = \frac{11.76 \cdot 0.403 + 10.851 \cdot 0.174}{(0.174 + 0.403)} = 11.486 (\text{кВ})$$

Получим см. рис. 2.7

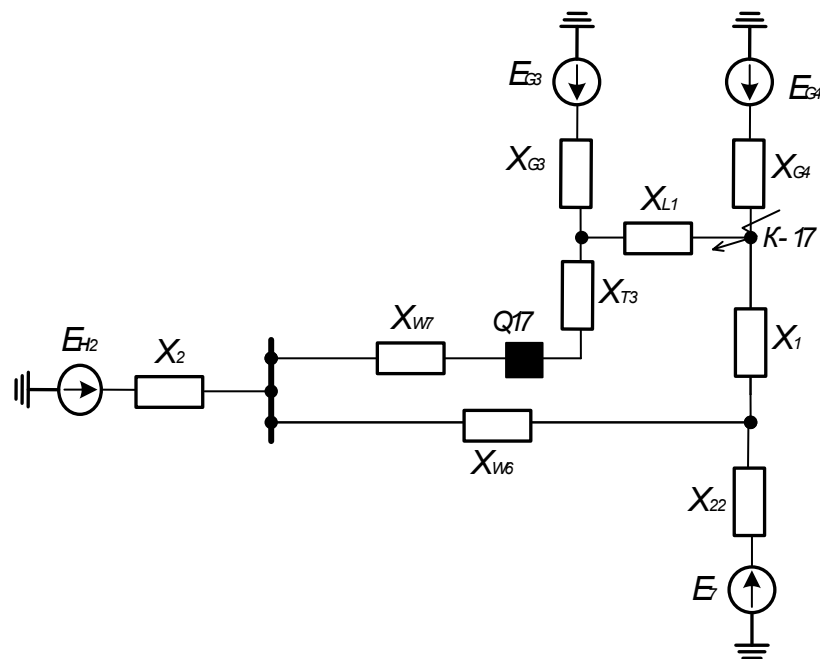


Рис. 2.7 Упрощенная схема замещения

Преобразуем $YX_{W6}X_{22}X_1 \rightarrow \Delta X_{23}X_{24}X_{25}$:

$$X_{23} = X_{W6} + X_{22} + \frac{X_{W6}X_{22}}{X_1} = 0.744 + 0.172 + \frac{0.744 \cdot 0.172}{2.521} = 0.967 \text{ (Ом)}$$

$$X_{24} = X_{W6} + X_1 + \frac{X_{W6} \cdot X_1}{X_{22}} = 0.744 + 2.521 + \frac{0.744 \cdot 2.521}{0.172} = 14.17 \text{ (Ом)}$$

$$X_{25} = X_{22} + X_1 + \frac{X_{22} \cdot X_1}{X_{W6}} = 0.172 + 2.521 + \frac{0.172 \cdot 2.521}{0.744} = 3.276 \text{ (Ом)}$$

Разрежем $\Delta X_{23}X_{24}X_{25}$ в узле с ЭДС по две параллельные ветви с одинаковыми ЭДС $E_7=E'_7=E''_7$ соответственно. После заменим параллельные ветви с генерирующим источником на эквивалентные.

Получим см. рис. 2.8

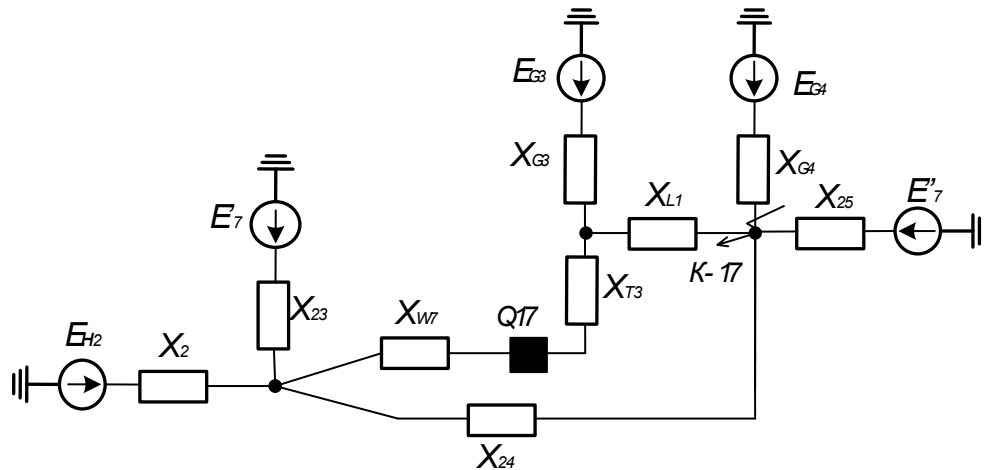


Рис. 2.8 Упрощенная схема замещения

$$X_{26} = \frac{(X_{G4} \cdot X_{25})}{X_{G4} + X_{25}} = \frac{(0.42 \cdot 3.276)}{(0.42 + 3.276)} = 0.372 \text{ (Ом)}$$

$$E_8 = \frac{E_{G4} \cdot X_{25} + E''_7 \cdot X_{G4}}{X_{G4} + X_{25}} = \frac{11.401 \cdot 3.276 + 11.486 \cdot 0.42}{(0.42 + 3.276)} = 11.411 \text{ (кВ)}$$

$$X_{27} = \frac{(X_2 \cdot X_{23})}{X_2 + X_{23}} = \frac{(4.031 \cdot 0.967)}{(4.031 + 0.967)} = 0.78 \text{ (Ом)}$$

$$E_9 = \frac{E_{H2} \cdot X_{23} + E'_7 \cdot X_2}{X_2 + X_{23}} = \frac{8.925 \cdot 0.967 + 11.486 \cdot 4.031}{(4.031 + 0.967)} = 10.991 \text{ (кВ)}$$

Получим см. рис. 2.9

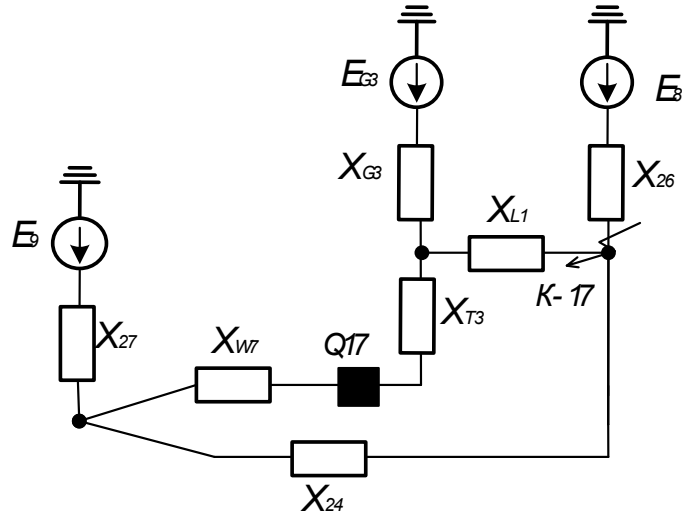


Рис. 2.9 Упрощенная схема замещения

Далее исключаем из схемы выключатель и преобразуем схему

$$X_{28} = X_{W7} + X_{T3} = 0.893 + 1.946 = 2,839 \text{ (Ом)}$$

Получим см. рис. 2.10

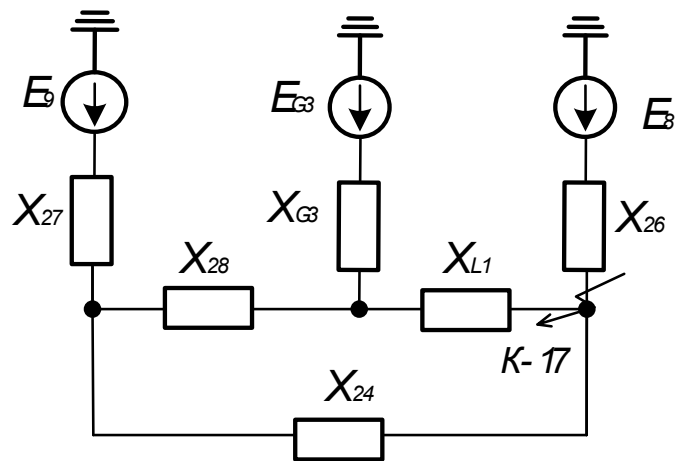


Рис. 2.10 Упрощенная схема замещения

Преобразуем $\Delta X_{28} X_{L1} X_{24} \rightarrow Y X_{29} X_{30} X_{31}$:

$$X_{29} = \frac{X_{28} \cdot X_{L1}}{X_{28} + X_{L1} + X_{24}} = \frac{2.839 \cdot 0.25}{2.839 + 0.25 + 14.17} = 0.041 \text{ (Ом)}$$

$$X_{30} = \frac{X_{28} \cdot X_{24}}{X_{28} + X_{L1} + X_{24}} = \frac{2.839 \cdot 14.17}{2.839 + 0.25 + 14.17} = 2.331 \text{ (Ом)}$$

$$X_{31} = \frac{X_{L1} \cdot X_{24}}{X_{28} + X_{L1} + X_{24}} = \frac{0.25 \cdot 14.17}{2.839 + 0.25 + 14.17} = 0.205(\text{Ом})$$

Получим см. рис. 2.11

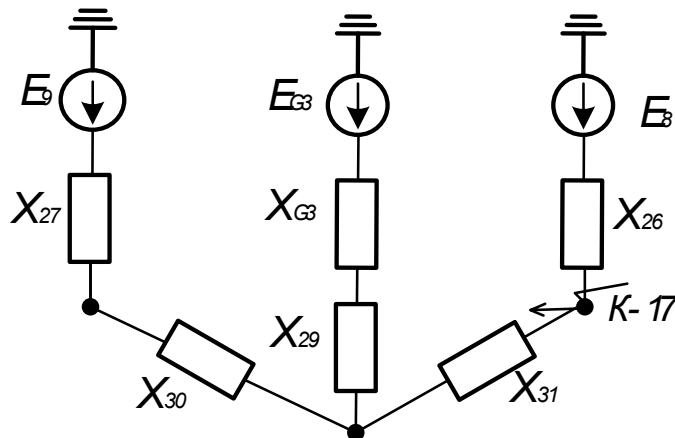


Рис. 2.11 Упрощенная схема замещения

$$X_{32} = X_{27} + X_{30} = 0.78 + 2.331 = 3,111 (\text{Ом})$$

$$X_{33} = X_{Г3} + X_{29} = 0.42 + 0.041 = 0,461 (\text{Ом})$$

Получим см. рис. 2.12

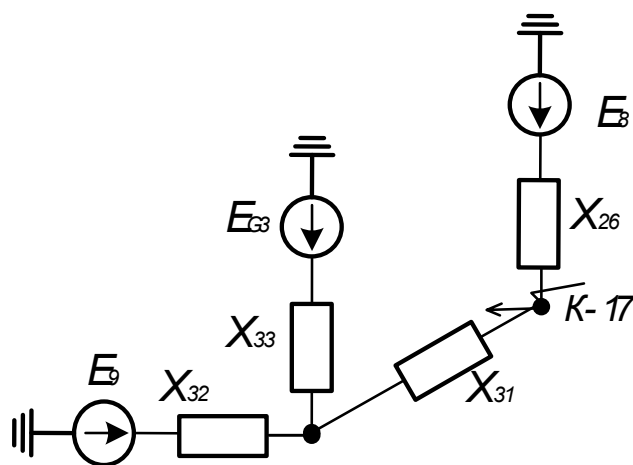


Рис. 2.12 Упрощенная схема замещения

$$X_{34} = \frac{(X_{32} \cdot X_{33})}{X_{32} + X_{33}} = \frac{(3.111 \cdot 0.461)}{(3.111 + 0.461)} = 0.402(\text{Ом})$$

$$E_{10} = \frac{E_9 \cdot X_{33} + E_{G3} \cdot X_{32}}{X_{32} + X_{33}} = \frac{10.991 \cdot 0.461 + 11.401 \cdot 3.111}{(3.111 + 0.461)} = 11.348(\text{кВ})$$

Получим см. рис. 2.13

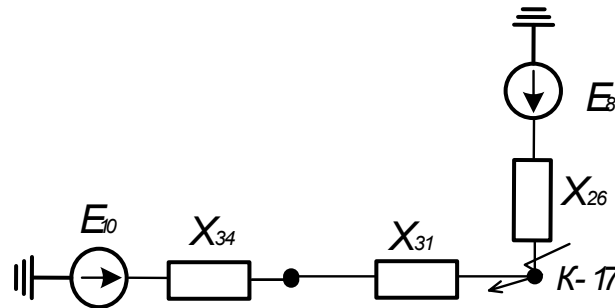


Рис. 2.13 Упрощенная схема замещения

$$X_{35} = X_{34} + X_{31} = 0.402 + 0.205 = 0.607 (\text{Ом})$$

Получим см. рис. 2.14

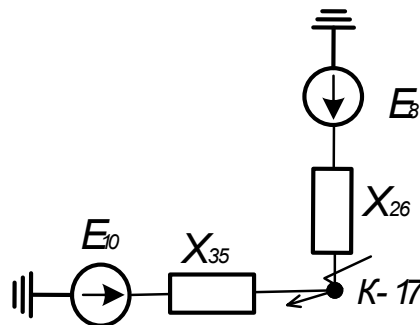


Рис. 2.14 Упрощенная схема замещения

$$X_{\Sigma} = \frac{(X_{26} \cdot X_{35})}{X_{26} + X_{35}} = \frac{(0.372 \cdot 0.607)}{(0.372 + 0.607)} = 0.231(\text{Ом})$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_8 \cdot X_{35} + E_{10} \cdot X_{26}}{X_{26} + X_{35}} = \frac{11.411 \cdot 0.607 + 11.348 \cdot 0.372}{(0.372 + 0.607)} = 11.387 (\text{кВ})$$

Получим см. рис. 2.15

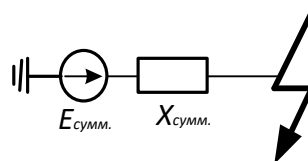


Рис. 2.15 Упрощенная схема замещения

2.3 Определение расчетных величин

Для точки КЗ и места установки выключателя рассчитаем действующее значение периодической составляющей тока КЗ, ударный ток и наибольшее действующее значение полного тока КЗ.

Находим действующее значение сверхпереходной периодической составляющей в точке КЗ.

$$I_n'' = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} = \frac{11.387}{\sqrt{3} \cdot 0.231} = 28.461(\text{кА})$$

Определим ударный ток в точке КЗ:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_n'' \cdot k_y$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_n'' \cdot 1,94 = \sqrt{2} \cdot 28.461 \cdot 1,94 = 78.085(\text{кА})$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ определим по формуле:

$$I_y = I_n'' \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 28.461 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,94 - 1)^2} = 47.345(\text{кА})$$

Определение тока в ветви с выключателем произведем с помощью метода узловых потенциалов.

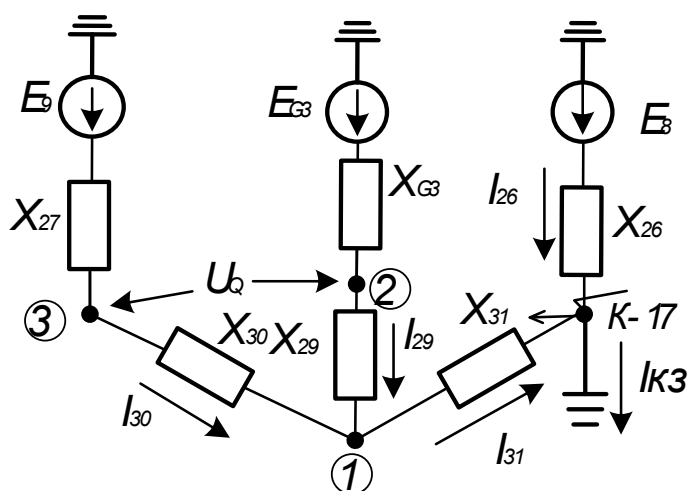


Рис. 2.16 Схема замещения при расчете I_Q

Ток в ветви с X_{26} :

$$I_{26} = \frac{E_8}{\sqrt{3}X_{26}} = \frac{11.411}{\sqrt{3} \cdot 0.372} = 17.711 \text{ (кА)}$$

Ток в ветви с X_{32} :

$$I_{31} = I_{K3} - I_{26} = 28,461 - 17,711 = 10,75 \text{ (кА)}$$

Потенциал в узле 1:

$$\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot I_{31} \cdot X_{31} = \sqrt{3} \cdot 10,75 \cdot 0,205 = 3,817 \text{ (кВ)}$$

Ток в ветви с X_{29} :

$$I_{29} = \frac{E_{G3} - \varphi_1}{\sqrt{3} \cdot (X_{29} + X_{G3})} = \frac{11.401 - 3.817}{\sqrt{3} \cdot (0.041 + 0.42)} = 9.498 \text{ (кА)}$$

Ток в ветви с X_{30} :

$$I_{30} = \frac{E_9 - \varphi_1}{\sqrt{3} \cdot (X_{27} + X_{30})} = \frac{10.991 - 3.817}{\sqrt{3} \cdot (0.78 + 2.331)} = 1.331 \text{ (кА)}$$

Потенциал в узле 2:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \sqrt{3} \cdot I_{29} \cdot X_{29} = 3.817 + \sqrt{3} \cdot 9.498 \cdot 0.041 = 4.492 \text{ (кВ)}$$

Потенциал в узле 3:

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \sqrt{3} \cdot I_{30} \cdot X_{30} = 3.817 + \sqrt{3} \cdot 1.331 \cdot 2.331 = 9.191 \text{ (кВ)}$$

Напряжение на выключателе:

$$U_Q = \varphi_3 - \varphi_2 = 9.191 - 4.492 = 4.699 \text{ (кВ)}$$

Ток в ветви с выключателем:

$$I_{nQ} = \frac{U_Q}{\sqrt{3} \cdot (X_{W7} + X_{T3})} = \frac{4.699}{\sqrt{3} \cdot (0.893 + 1.946)} = 0,956 \text{ (кА)}$$

Ударный ток в ветви с выключателем:

$$i_{yQ} = \sqrt{2} \cdot I_{nQ} \cdot k_y = \sqrt{2} \cdot 0,956 \cdot 1,94 = 2,623 \text{ (кА)}$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ через выключатель:

$$I_{yQ} = I_{nQ} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 0.956 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1.94 - 1)^2} = 1,59 \text{ (кА)}$$

3 Расчет методом типовых кривых

Метод типовых кривых основан на использовании кривых изменения во времени отношения периодической составляющей тока КЗ в ветви с генератором в произвольный момент к начальному значению этой составляющей в этой же ветви при различных удаленностях точки КЗ.

3.1 Составление схемы замещения исходной электрической схемы

На этот раз расчетная схема замещения будет отличаться от предшествующего случая отсутствием ветвей с нагрузками, поскольку согласно методу, обобщенная нагрузка уже учтена в типовых кривых.

Сопровитвления элементов такие же, как и в предыдущем методе.

Преобразовывая схему замещения, необходимо следить за выполнением одного условия при объединении параллельных ветвей должно соблюдаться следующее:

$$\frac{S_1 \cdot X_1}{S_2 \cdot X_2} = (0,4 \div 2,5)$$

На рис. 3.1 изображена схема замещения, где:

$$X_1 = X_{w5} + X_{T4} = 1.131 + 1.39 = 2.521(\text{Ом})$$

$$X_2 = X_{W7} + X_{T3} = 0.893 + 1.946 = 2,839 (\text{Ом})$$

$$X_3 = \frac{(X_{T1}^c \cdot X_{T2}^c)}{X_{T1}^c + X_{T2}^c} = \frac{(0.099 \cdot 0.099)}{(0.099 + 0.099)} = 0,0495 (\text{Ом})$$

$$X_4 = \frac{(X_{T1}^H \cdot X_{T2}^H)}{X_{T1}^H + X_{T2}^H} = \frac{(0.068 \cdot 0.068)}{(0.068 + 0.068)} = 0.034(\text{Ом})$$

$$X_5 = \frac{X_{G1} \cdot X_{G2}}{X_{G1} + X_{G2}} = \frac{(0.28 \cdot 0.28)}{(0.28 + 0.28)} = 0.14(\text{Ом})$$

$$E_1 = \frac{E_{G1} \cdot X_{G2} + E_{G2} \cdot X_{G1}}{X_{G1} + X_{G2}} = \frac{11.76 \cdot 0.28 + 11.76 \cdot 0.28}{(0.28 + 0.28)} = 11.76 (\text{кВ})$$

$$X_6 = X_{CK} + X_{T6} = 0.764 + 0.184 = 0.948(\text{Ом})$$

$$X_7 = X_C + X_{T5} = 0.441 + 0.184 = 0.625 (\text{Ом})$$

$$X_8 = X_4 + X_5 = 0.034 + 0.14 = 0.174 (\text{Ом})$$

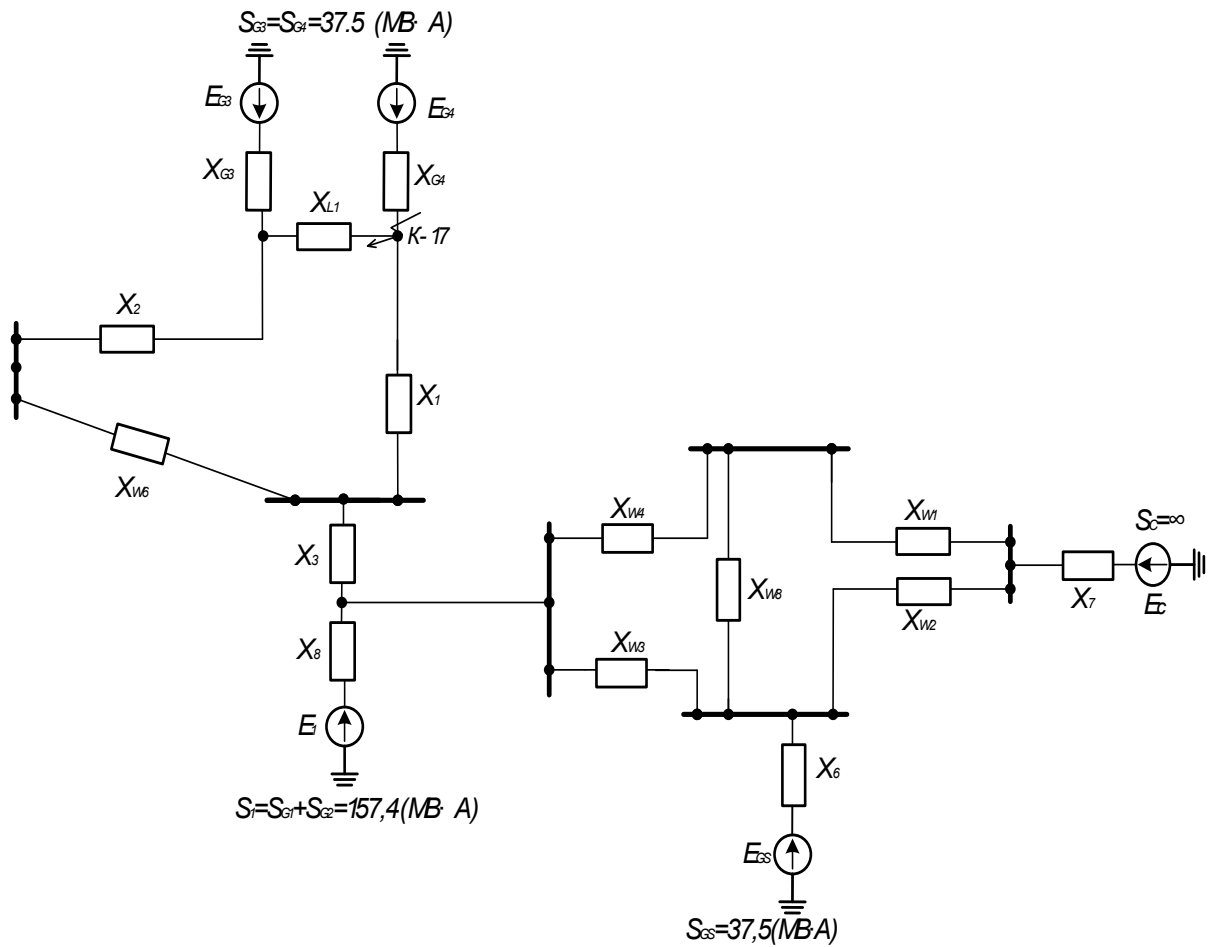


Рис. 3.1 Расчетная схема замещения для метода типовых кривых

Преобразуем $YX_{G3}X_2X_{L1} \rightarrow \Delta X_9X_{10}X_{11}$:

$$X_9 = X_{G3} + X_2 + \frac{X_{G3} \cdot X_2}{X_{L1}} = 0.42 + 2.839 + \frac{0.42 \cdot 0.839}{0.25} = 8.029 \text{ (OM)}$$

$$X_{10} = X_{G3} + X_{L1} + \frac{X_{G3} \cdot X_{L1}}{X_2} = 0.42 + 0.25 + \frac{0.42 \cdot 0.25}{0.839} = 0.707 \text{ (OM)}$$

$$X_{11} = X_2 + X_{L1} + \frac{X_2 \cdot X_{L1}}{X_{G3}} = 0.839 + 0.25 + \frac{0.839 \cdot 0.25}{0.42} = 4.779 \text{ (OM)}$$

Преобразуем $YX_{W1}X_7X_{W2} \rightarrow \Delta X_{12}X_{13}X_{14}$:

$$X_{12} = X_{W1} + X_7 + \frac{X_{W1} \cdot X_7}{X_{W2}} = 0.257 + 0.625 + \frac{0.257 \cdot 0.625}{0.183} = 1.76 \text{ (OM)}$$

$$X_{13} = X_{W1} + X_{W2} + \frac{X_{W1} \cdot X_{W2}}{X_7} = 0.257 + 0.183 + \frac{0.257 \cdot 0.183}{0.625} = 0.515 \text{ (OM)}$$

$$X_{14} = X_7 + X_{W2} + \frac{X_7 \cdot X_{W2}}{X_{W1}} = 0.625 + 0.183 + \frac{0.625 \cdot 0.183}{0.257} = 1.253 \text{ (OM)}$$

Разрежем $\Delta X_9 X_{10} X_{11}$, $\Delta X_{12} X_{13} X_{14}$ в узле с ЭДС на две параллельные ветви с одинаковыми ЭДС $E_{G3}=E'_{G3}=E''_{G3}$, $E_C=E'_C=E''_C$ и после заменим параллельные ветви с генерирующими источниками на эквивалентные.

Получим схему рис. 3.2

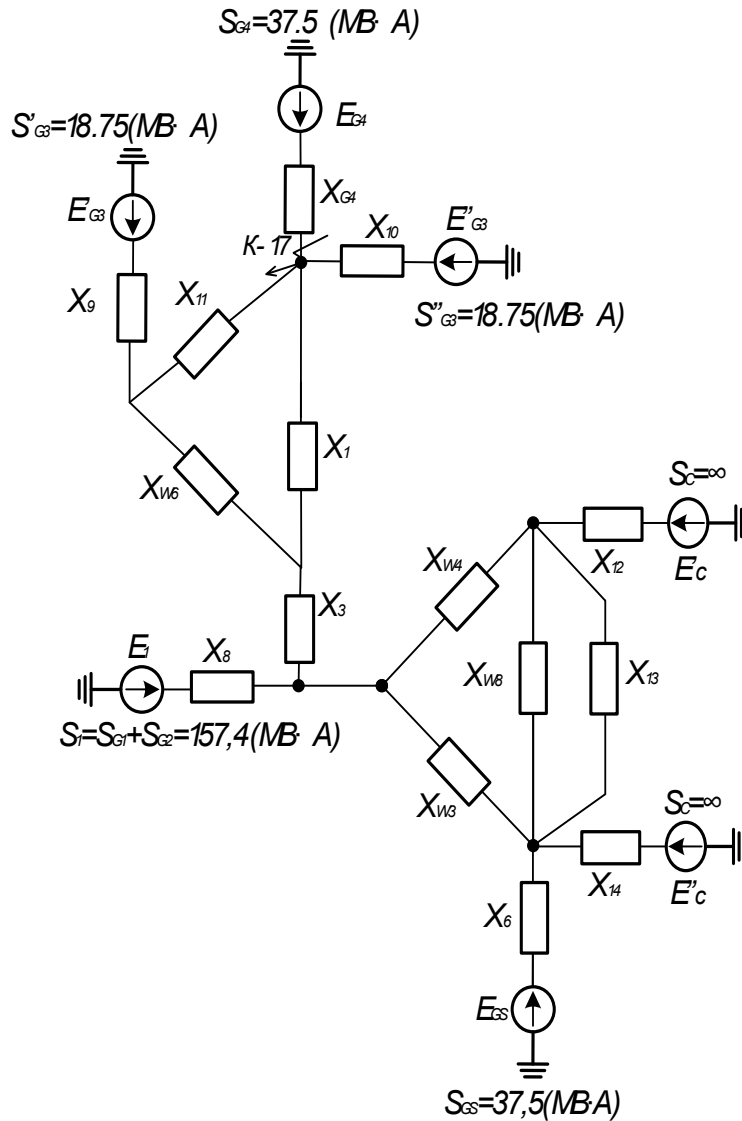


Рис. 3.2 Упрощенная схема замещения

Проверим вероятно ли объединение ветви E''_{G3} и E_{G4}

$$\frac{S''_{G3} \cdot X_{10}}{S_{G4} \cdot X_{G4}} = \frac{18.75 \cdot 0.707}{37.5 \cdot 0.42} = 0,842 \Rightarrow \text{объединение возможно.}$$

$$X_{15} = \frac{X_{G4} \cdot X_{10}}{X_{G4} + X_{10}} = \frac{0.42 \cdot 0.707}{0.42 + 0.707} = 0.264(\text{Ом})$$

$$E_2 = \frac{E_{G4} \cdot X_{10} + E''_{G3} \cdot X_{G4}}{X_{G4} + X_{10}} = \frac{11.401 \cdot 0.707 + 11.401 \cdot 0.42}{0.42 + 0.707} = 11.401(\text{кВ})$$

$$S_2 = S''_{G3} + S_{G4} = 18.75 + 37.5 = 56.25 (\text{МВ} \cdot \text{А})$$

$$X_{16} = \frac{(X_{13} \cdot X_{W8})}{X_{13} + X_{W8}} = \frac{(0.515 \cdot 0.072)}{(0.515 + 0.072)} = 0.063 (\text{Ом})$$

Получим схему рис. 3.3

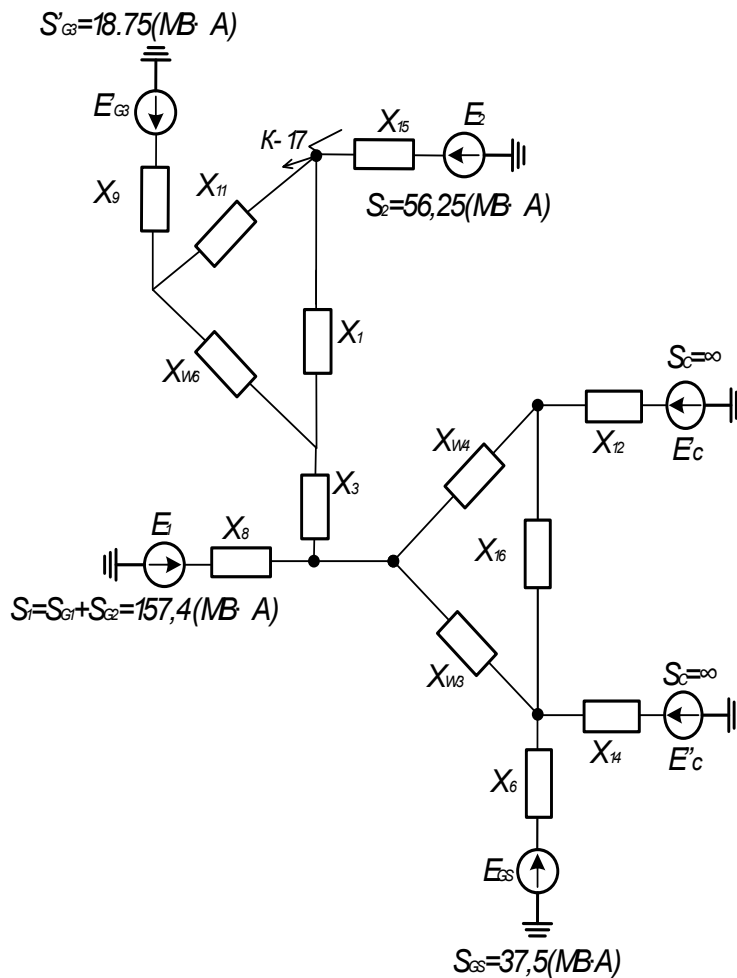


Рис. 3.3 Упрощенная схема замещения

Преобразуем $\Delta X_1 X_{11} X_{W6} \rightarrow Y X_{17} X_{18} X_{19}$:

$$X_{17} = \frac{X_1 \cdot X_{11}}{X_1 + X_{11} + X_{W6}} = \frac{2.521 \cdot 4.779}{2.521 + 4.779 + 0.744} = 1.498 (\text{Ом})$$

$$X_{18} = \frac{X_1 \cdot X_{W6}}{X_1 + X_{11} + X_{W6}} = \frac{2.521 \cdot 0.744}{2.521 + 4.779 + 0.744} = 0.233 (\text{Ом})$$

$$X_{19} = \frac{X_{11} \cdot X_{W6}}{X_1 + X_{11} + X_{W6}} = \frac{4.779 \cdot 0.744}{2.521 + 4.779 + 0.744} = 0.442 (\text{Ом})$$

Преобразуем $\Delta X_{W4}X_{16}X_{W3} \rightarrow YX_{20}X_{21}X_{22}$:

$$X_{20} = \frac{X_{W4} \cdot X_{16}}{X_{W4} + X_{16} + X_{W3}} = \frac{0.143 \cdot 0.063}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.019 \text{ (Ом)}$$

$$X_{21} = \frac{X_{W4} \cdot X_{W3}}{X_{W4} + X_{16} + X_{W3}} = \frac{0.143 \cdot 0.267}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.081 \text{ (Ом)}$$

$$X_{22} = \frac{X_{16} \cdot X_{W3}}{X_{W4} + X_{16} + X_{W3}} = \frac{0.063 \cdot 0.267}{0.143 + 0.063 + 0.267} = 0.036 \text{ (Ом)}$$

Получим схему рис. 3.4

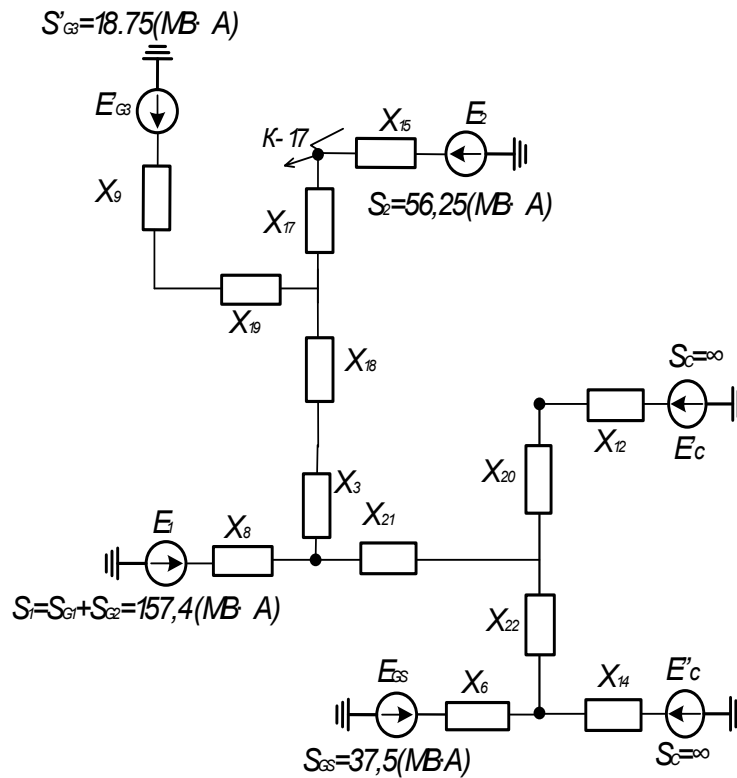


Рис. 3.4 Упрощенная схема замещения

$$X_{23} = X_9 + X_{19} = 8.029 + 0.442 = 8,471 \text{ (Ом)}$$

$$X_{24} = X_3 + X_{18} = 0.0495 + 0.233 = 0.283 \text{ (Ом)}$$

$$X_{25} = X_{12} + X_{20} = 1.76 + 0.019 = 1,779 \text{ (Ом)}$$

Получим схему рис. 3.5

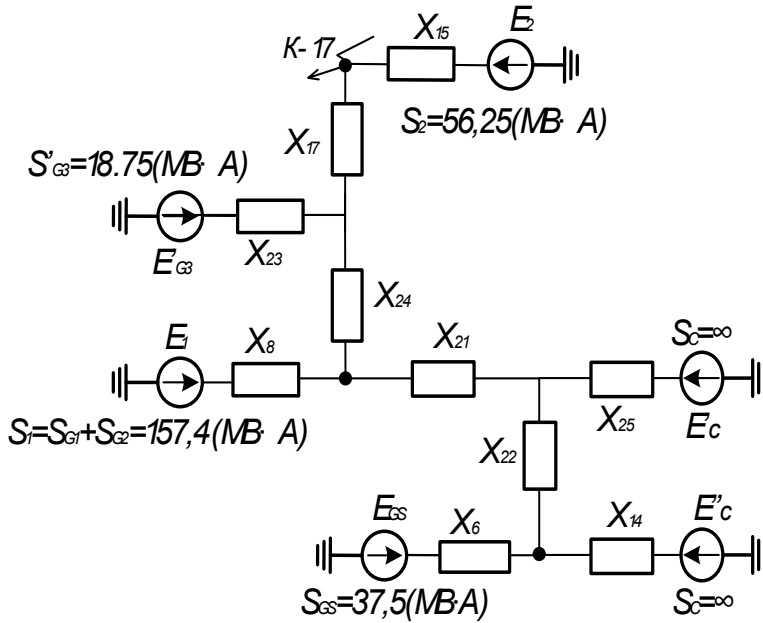


Рис. 3.5 Упрощенная схема замещения

Далее сворачиваем схему без учёта мощностей, определяя результирующее (суммарное) сопротивление схемы замещения свернутой вокруг точки КЗ и суммарную (эквивалентную) ЭДС.

$$X_{26} = \frac{X_6 \cdot X_{14}}{X_6 + X_{14}} + X_{22} = \frac{0.948 \cdot 1.253}{0.948 + 1.253} + 0.036 = 0,576(\text{Ом})$$

$$E_3 = \frac{E_{GS} \cdot X_{14} + E''_C \cdot X_6}{X_6 + X_{14}} = \frac{13.23 \cdot 1.253 + 10.5 \cdot 0,948}{0.948 + 1.253} = 12.054(\text{кВ})$$

Получим схему рис. 3.6

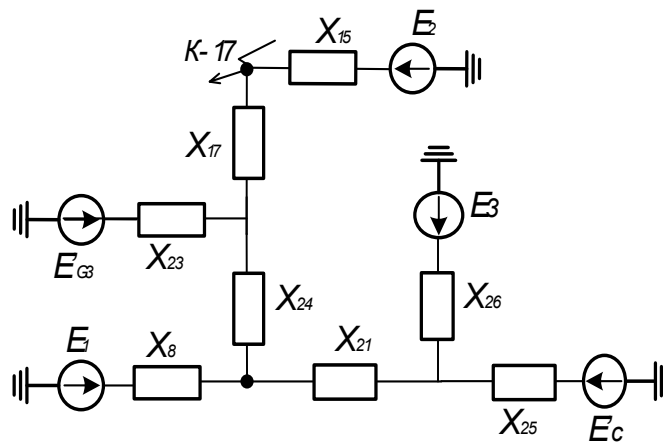


Рис. 3.6 Упрощенная схема замещения

$$X_{27} = \frac{X_{25} \cdot X_{26}}{X_{25} + X_{26}} + X_{21} = \frac{1.779 \cdot 0.576}{1.779 + 0.576} + 0.081 = 0,516(\text{Ом})$$

$$E_4 = \frac{E'_C \cdot X_{26} + E_3 \cdot X_{25}}{X_{25} + X_{26}} = \frac{10.5 \cdot 0.576 + 12.054 \cdot 1.779}{1.779 + 0.576} = 11,674(\text{кВ})$$

Получим схему рис. 3.7

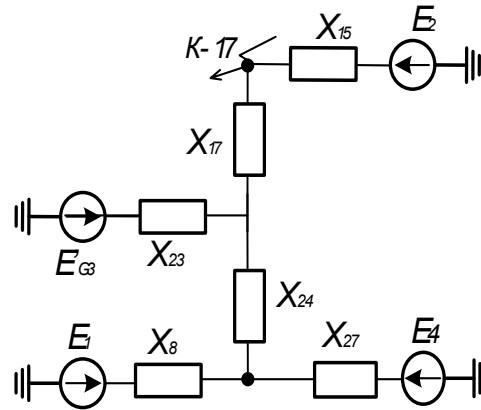


Рис. 3.7 Упрощенная схема замещения

$$X_{28} = \frac{X_8 \cdot X_{27}}{X_8 + X_{27}} + X_{24} = \frac{0.174 \cdot 0.516}{0.174 + 0.516} + 0.283 = 0,413(\text{Ом})$$

$$E_5 = \frac{E_1 \cdot X_{27} + E_4 \cdot X_8}{X_8 + X_{27}} = \frac{11.76 \cdot 0.516 + 11.674 \cdot 0.174}{0.174 + 0.516} = 11,738(\text{кВ})$$

Получим схему рис. 3.8

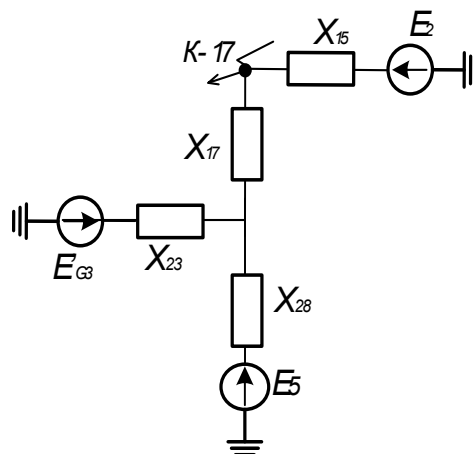


Рис. 3.8 Упрощенная схема замещения

$$X_{29} = \frac{X_{23} \cdot X_{28}}{X_{23} + X_{28}} + X_{17} = \frac{8.471 \cdot 0.413}{8.471 + 0.413} + 1.498 = 1.892(\text{Ом})$$

$$E_6 = \frac{E'_{G3} \cdot X_{28} + E_5 \cdot X_{23}}{X_{23} + X_{28}} = \frac{11.401 \cdot 0.413 + 11.738 \cdot 8.471}{8.471 + 0.413} = 11,722(\text{кВ})$$

Получим схему рис. 3.9

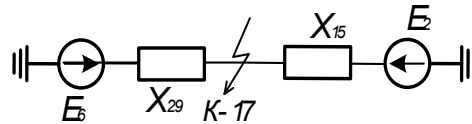


Рис. 3.9 Упрощенная схема замещения

$$E_{\Sigma} = \frac{E_2 \cdot X_{29} + E_6 \cdot X_{15}}{X_{15} + X_{29}} = \frac{11.401 \cdot 1.892 + 11.722 \cdot 0.264}{0.264 + 1.892} = 11.44(\text{кВ})$$

$$X_{\Sigma} = \frac{X_{15} \cdot X_{29}}{X_{15} + X_{29}} = \frac{0.264 \cdot 1.892}{0.264 + 1.892} = 0.232(\text{Ом})$$

$$I''_{nk}{}^{(3)}(0) = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} = \frac{11.44}{\sqrt{3} \cdot 0.232} = 28.47(\text{кА})$$

Для дальнейшего расчета необходимо посчитать значение тока КЗ в генерирующих ветвях, для этого используем метод узловых потенциалов.

Отношение значения сверхпереходного тока к номинальному току дает нам номер типовой кривой, по которой в дальнейшем будут построены графики изменения периодической составляющей тока КЗ.

Полученные данные заносим в таблицу и строим графики изменения периодической составляющей тока КЗ во времени для ветвей с генераторами, ветви системы и непосредственно точки КЗ.

3.2 Определение изменения периодической составляющей тока КЗ во времени в месте повреждения

Рассчитаем начальные значения периодических составляющих тока КЗ по генерирующим ветвям и начальные токи соответствующих ветвей, приведенные к базисной ступени напряжения.

После этого оценим удаленность генерирующих источников.

Для этого воспользуемся рис. 3.10

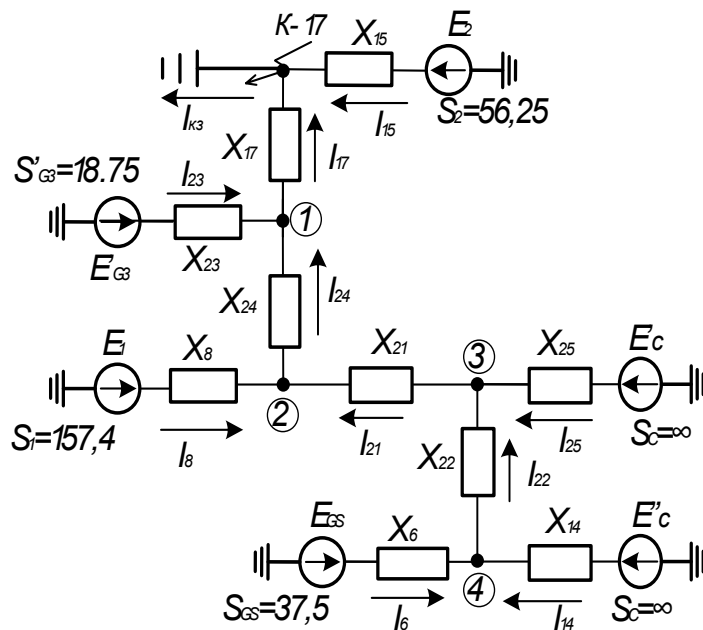


Рис. 3.10 Упрощенная схема замещения

Ток в ветви с X_{15} :

$$I_{15} = \frac{E_2}{\sqrt{3}X_{15}} = \frac{11.401}{\sqrt{3} \cdot 0.264} = 24.934 \text{ (кА)}$$

Ток в ветви с X_{17} :

$$I_{17} = I_{кз} - I_{15} = 28,47 - 24,934 = 3,536 \text{ (кА)}$$

Потенциал в узле 1:

$$\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot I_{17} \cdot X_{17} = \sqrt{3} \cdot 3,536 \cdot 1,498 = 9,175 \text{ (кВ)}$$

Ток в ветви с X_{23} :

$$I_{23} = \frac{E'_{G3} - \varphi_1}{\sqrt{3}X_{23}} = \frac{11.401 - 9.175}{\sqrt{3} \cdot 8.471} = 0.152(\text{кА})$$

Ток в ветви с X_{24} :

$$I_{24} = I_{17} - I_{23} = 3.536 - 0.152 = 3.384 (\text{кА})$$

Потенциал в узле 2:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \sqrt{3} \cdot I_{24} \cdot X_{24} = 9.175 + \sqrt{3} \cdot 3.384 \cdot 0.283 = 10.834 (\text{кВ})$$

Ток в ветви с X_8 :

$$I_8 = \frac{E_1 - \varphi_2}{\sqrt{3}X_8} = \frac{11.76 - 10.834}{\sqrt{3} \cdot 0.174} = 3.073(\text{кА})$$

Ток в ветви с X_{21} :

$$I_{21} = I_{24} - I_8 = 3.384 - 3.073 = 0.311(\text{кА})$$

Потенциал в узле 3:

$$\varphi_3 = \varphi_2 + \sqrt{3} \cdot I_{21} \cdot X_{21} = 10.834 + \sqrt{3} \cdot 0.311 \cdot 0.081 = 10.878 (\text{кВ})$$

Ток в ветви с X_{25} :

$$I_{25} = \frac{\varphi_3 - E'_C}{\sqrt{3}X_{25}} = \frac{10.878 - 10.5}{\sqrt{3} \cdot 1.779} = 0.123(\text{кА})$$

Ток в ветви с X_{22} :

$$I_{22} = I_{21} - I_{25} = 0.311 - 0.123 = 0.188(\text{кА})$$

Потенциал в узле 4:

$$\varphi_4 = \varphi_3 + \sqrt{3} \cdot I_{22} \cdot X_{22} = 10.878 + \sqrt{3} \cdot 0.188 \cdot 0.036 = 10.89 (\text{кВ})$$

Ток в ветви с X_{14} :

$$I_{14} = \frac{\varphi_4 - E''_C}{\sqrt{3}X_{14}} = \frac{10.89 - 10.5}{\sqrt{3} \cdot 1.253} = 0.18(\text{кА})$$

Ток в ветви с X_6 :

$$I_6 = \frac{E_{GS} - \varphi_4}{\sqrt{3}X_6} = \frac{13.23 - 10.89}{\sqrt{3} \cdot 0.948} = 1.425(\text{кА})$$

Приведенные к основной ступени номинальные токи генерирующих ветвей:

$$I_{H1} = \frac{S_2}{\sqrt{3}U_\delta} = \frac{56.25}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 3.093(\text{кА})$$

$$I_{H2} = \frac{S'_{G3}}{\sqrt{3}U_\delta} = \frac{18.75}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 1.031(\text{кА})$$

$$I_{H3} = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_\delta} = \frac{157.4}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 8.655 (\text{кА})$$

$$I_{H4} = \frac{S_{СК}}{\sqrt{3}U_\delta} = \frac{37.5}{\sqrt{3} \cdot 10.5} = 2.062 (\text{кА})$$

Определим номер типовой кривой для каждой генерирующей ветви:

$$n_1 = \frac{I_{15}}{I_{H1}} = \frac{24.934}{3.093} \approx 8$$

$$n_2 = \frac{I_{23}}{I_{H2}} = \frac{0.152}{1.031} = 0.147$$

$$n_3 = \frac{I_8}{I_{H3}} = \frac{3.073}{8.655} = 0.355$$

$$n_4 = \frac{I_6}{I_{H4}} = \frac{1.425}{2.062} = 0.691$$

Так как $n_2, n_3, n_4 < 1$ то периодическими составляющими токов в ветвях с X_{23}, X_8, X_6 соответственно можно пренебречь. Токи в ветвях с электрической системой будут постоянные по величине и равными начальному их значению, т.е.

$$I_{25}(0) = I_n(t) = 0,123(\text{кА}) = \text{const},$$

$$I_{14}(0) = I_n(t) = 0,18(\text{кА}) = \text{const}.$$

Результаты заносим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

t, c	$\gamma(t)_{15}$	$I_n(t)_{15, \text{кА}}$	$I_n(t)_{25, \text{кА}}$	$I_n(t)_{14, \text{кА}}$	$I_n(t)_{\Sigma, \text{кА}}$
0	1	24,934	0,123	0,18	25,237
0,1	0,68	16,955	0,123	0,18	17,258
0,2	0,615	15,334	0,123	0,18	15,637
0,3	0,565	14,088	0,123	0,18	14,391
0,4	0,545	13,589	0,123	0,18	13,892
0,5	0,515	12,841	0,123	0,18	13,144

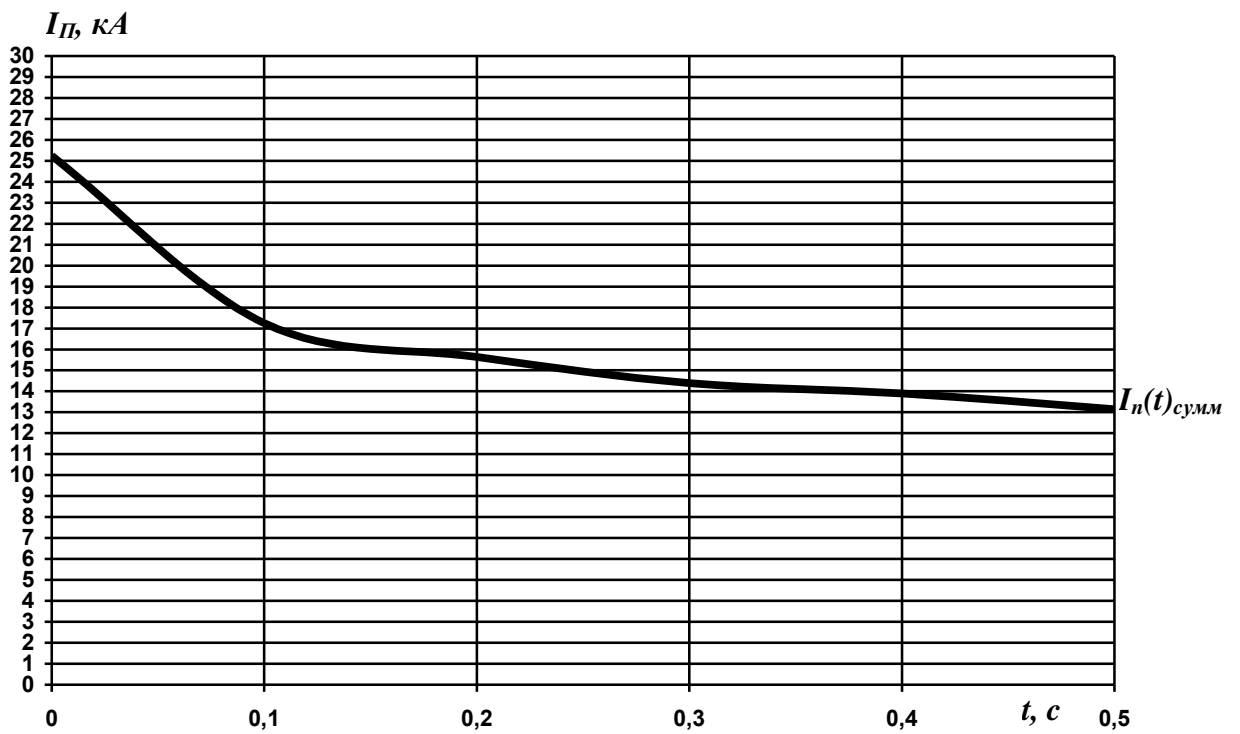


Рис 3.11 Зависимость периодической составляющей тока КЗ от времени для точки КЗ.

Определим мощность КЗ в нулевой момент времени:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_n(0)_{\Sigma} \cdot U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 28,47 \cdot 10,5 = 517,771 (\text{МВ} \cdot \text{А})$$

4 Расчет несимметричного КЗ методом симметричных составляющих

4.1 Составление схем замещения отдельных последовательностей

4.2 Определение расчетных величин

По заданию вид несимметричного КЗ для сети 10,5 кВ – К⁽²⁾.

Схему нулевой последовательности не составляем, поскольку КЗ двухфазное и не связано с землей и тогда токи нулевой последовательности будут отсутствовать.

Определяем периодическую составляющую тока прямой последовательности фазы *A*:

$$\dot{i}_{A1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{11.387}{j(0.231 + 0.232)} = -j24.594 = 24.594e^{j-90} \text{ кА}$$

Определяем периодическую составляющую тока обратной последовательности фазы *A*: $\dot{i}_{A2}^{(2)} = -\dot{i}_{A1}^{(2)} = j24.594 = 24.594e^{j90} \text{ кА}$.

Периодическая составляющая тока нулевой последовательности фазы *A* равна нулю: $\dot{i}_{A0}^{(2)} = 0$.

Токи периодических составляющих прямой и обратной последовательностей для фаз *B* и *C* будут иметь ту же величину но будут сдвинуты симметрично на 120°.

$$\dot{i}_{B1}^{(2)} = a^2 \dot{i}_{A1}^{(2)} = e^{j240} 24.594e^{j-90} = 24.594e^{j150} \text{ кА};$$

$$\dot{i}_{C1}^{(2)} = a \dot{i}_{A1}^{(2)} = e^{j120} 24.594e^{j-90} = 24.594e^{j30} \text{ кА};$$

$$\dot{i}_{B2}^{(2)} = a \dot{i}_{A2}^{(2)} = e^{j120} 24.594e^{j90} = 24.594e^{j210} \text{ кА};$$

$$\dot{i}_{C2}^{(2)} = a^2 \dot{i}_{A2}^{(2)} = e^{j240} 24.594e^{j90} = 24.594e^{j330} \text{ кА};$$

$$\dot{i}_{B0}^{(2)} = 0;$$

$$\dot{i}_{C0}^{(2)} = 0;$$

Токи в поврежденных фазах :

$$\dot{i}_A^{(2)} = \dot{i}_{A1}^{(2)} + \dot{i}_{A2}^{(2)} + \dot{i}_{A0}^{(2)} = 24.594e^{j-90} + 24.594e^{j90} + 0 = 0;$$

$$\dot{i}_B^{(2)} = \dot{i}_{B1}^{(2)} + \dot{i}_{B2}^{(2)} + \dot{i}_{B0}^{(2)} = 24.594e^{j150} + 24.594e^{j210} + 0 = 49.188e^{j180} \text{ кА};$$

$$\dot{i}_C^{(2)} = \dot{i}_{C1}^{(2)} + \dot{i}_{C2}^{(2)} + \dot{i}_{C0}^{(2)} = 24.594e^{j30} + 24.594e^{j330} + 0 = 42,598e^{j0} \text{ кА};$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{U}_{A1*} = \dot{U}_{A2*} = jx_{2\Sigma} \dot{I}_{A1} = j0,232 \cdot (-j24.594) = 5.706e^{j0} \text{ кВ.}$$

$$\dot{U}_{B1} = \dot{U}_{C2} = a^2 \dot{U}_{A1} = e^{j240} 5.706e^{j0} = 5.706e^{j240} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{B2} = \dot{U}_{C1} = a \dot{U}_{A1} = e^{j120} 5.706e^{j0} = 5.706e^{j120} \text{ кВ.}$$

Напряжения на фазах:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} = 5.706e^{j0} + 5.706e^{j0} = 11.412e^{j0} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} = 5.706e^{j240} + 5.706e^{j120} = 5.706e^{j180} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} = 5.706e^{j120} + 5.706e^{j240} = 5.706e^{j180} \text{ кВ.}$$

Векторная диаграмма токов и напряжений в точке КЗ приведена на рисунке 4.1.

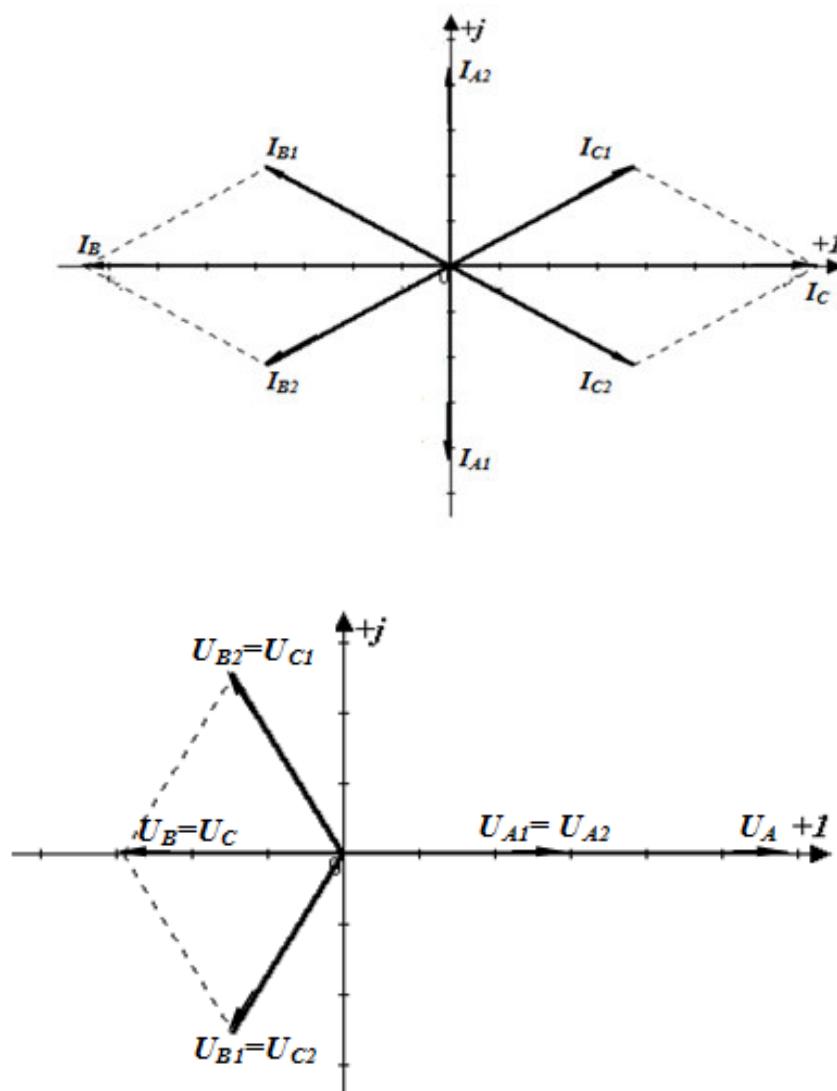


Рис. 4.1 Векторная диаграмма токов и напряжений в точке КЗ

Граничные условия при $K^{(2)}$: $\dot{I}_A^{(2)} = 0$, $\dot{I}_B^{(2)} = -\dot{I}_C^{(2)}$, $\dot{U}_B^{(2)} = \dot{U}_C^{(2)}$, $\dot{I}_0^{(2)} = 0$ соблюдаются, расчеты выполнены верно.

Определим ток, протекающий через ветвь с выключателем. Для этого вернёмся к схеме в методе эквивалентных ЭДС (см. рис. 2.16). Схема замещения прямой последовательности имеет вид

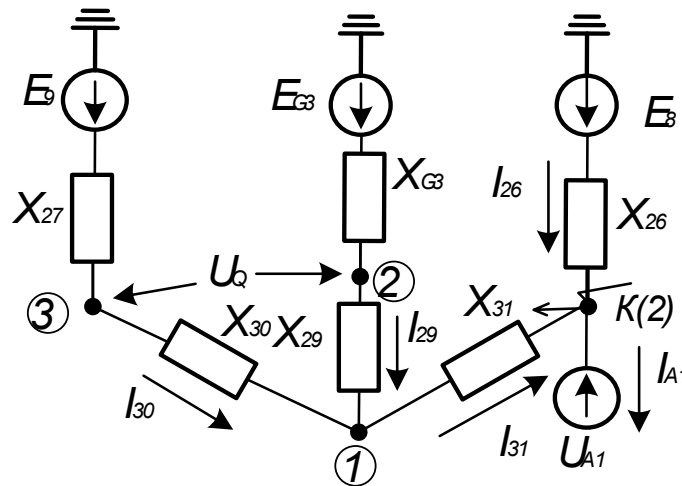


Рис. 4.2 Схема замещения прямой последовательности при расчете I_{QA1} (ток прямой последовательности в ветви с выключателем)

Ток в ветви с X_{26} :

$$\dot{i}_{26} = \frac{\dot{E}_8 - \dot{U}_{A1}}{jX_{26}} = \frac{11.411 - 5.706}{j0.372} = -j15.336 \text{ (кА)}$$

Ток в ветви с X_{31} :

$$\dot{i}_{31} = \dot{I}_{A1} - \dot{i}_{26} = -j24.594 - (-j15.336) = -j9.258 \text{ (кА)}$$

Напряжение прямой последовательности для первого узла:

$$\dot{U}_{(1)A1} = \dot{U}_{A1} + \dot{i}_{31} \cdot jX_{31} = 5.706 + (-j9.258) \cdot j0.205 = 7.604 \text{ (кВ)}$$

Ток в ветви с X_{29} :

$$\dot{i}_{29} = \frac{\dot{E}_{G3} - \dot{U}_{(1)A1}}{j(X_{G3} + X_{29})} = \frac{11.401 - 7.604}{j(0.42 + 0.041)} = -j8.236 \text{ (кА)}$$

Напряжение прямой последовательности для второго узла:

$$\dot{U}_{(2)A1} = \dot{U}_{(1)A1} + \dot{i}_{29} \cdot jX_{29} = 7.604 + (-j8.236) \cdot j0.041 = 7.942 \text{ (кВ)}$$

Ток в ветви с X_{30} :

$$\dot{i}_{30} = \dot{i}_{31} - \dot{i}_{29} = -j9.258 - (-j8.236) = -j1.022 \text{ (кА)}$$

Напряжение прямой последовательности для третьего узла:

$$\dot{U}_{(3)A1} = \dot{U}_{(1)A1} + \dot{i}_{30} \cdot jX_{30} = 7.604 + (-j1.022) \cdot j2.331 = 9.986 \text{ (кВ)}$$

Ток прямой последовательности в ветви с выключателем:

$$\dot{i}_{QA1} = \frac{\dot{U}_{(3)A1} - \dot{U}_{(2)A1}}{j(X_{W7} + X_{T3})} = \frac{9.986 - 7.942}{j(0.893 + 1.946)} = -j0.72 = 0.72e^{j-90}(\text{кА})$$

Пересчитаем периодическую составляющую тока прямой последовательности в ветви с выключателем на действительное напряжение:

$$\dot{i}_{QA1} \cdot k_{T3} = -j0.72 \cdot \frac{10,5}{37} = -j0.204(\text{кА})$$

Напряжение прямой последовательности в ветви с выключателем:

$$\dot{U}_{QA1} = \dot{U}_{(3)A1} - \dot{U}_{(2)A1} = 9.986 - 7.942 = 2,044(\text{кВ})$$

Пересчитаем напряжение в ветви с выключателем на действительную ступень напряжения:

$$\frac{\dot{U}_{QA1}}{k_{T6}} = 2,044 \cdot \frac{37}{10,5} = 7,203(\text{кВ})$$

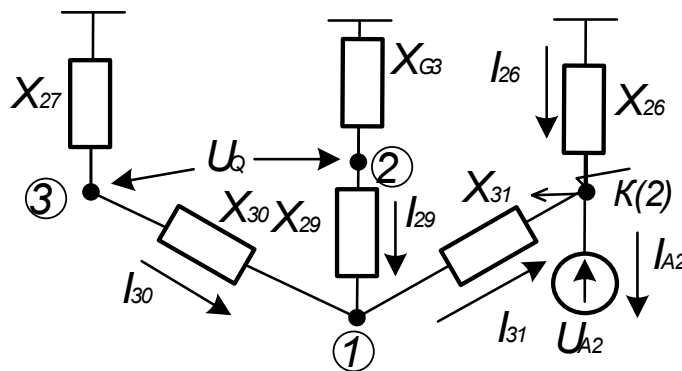


Рис. 4.3 Схема замещения обратной последовательности при расчете I_{QA2} (ток обратной последовательности в ветви с выключателем)

Ток в ветви с X_{26} :

$$\dot{i}_{26} = \frac{-\dot{U}_{A2}}{jX_{26}} = \frac{-5,706}{j0,372} = j15,339(\text{кА})$$

Ток в ветви с X_{31} :

$$\dot{i}_{31} = \dot{I}_{A2} - \dot{I}_{26} = j24.594 - j15.339 = j9,255(\text{кА})$$

Напряжение обратной последовательности для первого узла:

$$\dot{U}_{(1)A2} = \dot{U}_{A2} + \dot{i}_{31} \cdot jX_{31} = 5,706 + j9.255 \cdot j0,205 = 3.809(\text{кВ})$$

Ток в ветви с X_{29} :

$$i_{29} = \frac{-\dot{U}_{(1)A2}}{j(X_{G3} + X_{29})} = \frac{-3.809}{j(0.42 + 0.041)} = j8.263(\text{кА})$$

Напряжение обратной последовательности для второго узла:

$$\dot{U}_{(2)A2} = \dot{U}_{(1)A2} + i_{29} \cdot jX_{29} = 3,809 + j8.236 \cdot j0.041 = 3,471 (\text{кВ})$$

Ток в ветви с X_{30} :

$$i_{30} = i_{31} - i_{29} = j9.255 - j8.263 = j0,992 (\text{кА})$$

Напряжение обратной последовательности для третьего узла:

$$\dot{U}_{(3)A2} = \dot{U}_{(1)A2} + i_{30} \cdot jX_{30} = 3.809 + j0.992 \cdot j2.331 = 1.497 (\text{кВ})$$

Ток обратной последовательности в ветви с выключателем:

$$i_{QA2} = \frac{\dot{U}_{(3)A2} - \dot{U}_{(2)A2}}{j(X_{W7} + X_{T3})} = \frac{1.497 - 3.471}{j(0.893 + 1.946)} = j0.695 = 0.695e^{j90} (\text{кА})$$

Пересчитаем периодическую составляющую тока прямой последовательности в ветви с выключателем на действительное напряжение:

$$i_{QA2} \cdot k_{T3} = j0,695 \cdot \frac{10,5}{37} = j0.197(\text{кА})$$

Напряжение обратной последовательности в ветви с выключателем:

$$\dot{U}_{QA2} = \dot{U}_{(3)A2} - \dot{U}_{(2)A2} = 1.497 - 3.471 = -1,974 (\text{кВ})$$

Пересчитаем напряжение в ветви с выключателем на действительную ступень напряжения:

$$\frac{\dot{U}_{QA2}}{k_{T6}} = -1.974 \cdot \frac{37}{10,5} = -6.956(\text{кВ})$$

Следует учитывать что при трансформации векторов тока и напряжения через трансформатор $T_3(T_4)$ (см. рис. 1.1) имеющего нечетную группу соединений-11 (с треугольника на звезду) происходит смещение векторов прямой последовательности на угол -30° , а обратной – на угол $+30^\circ$ относительно угла векторов в точке КЗ.

Т.е. когда первичная обмотка соединена в треугольник, а вторичная в звезду, из-за того, что линейное напряжение первичной обмотки соответствует фазному напряжению вторичной обмотки, получается естественный поворот векторов напряжения на 30 градусов.

Поэтому

$$i_{QA1}^{(2)} = 0.204e^{j-90} \cdot e^{j-30} = 0,204e^{j-120}(\text{кА})$$

$$i_{QA2}^{(2)} = 0.197e^{j90} \cdot e^{j30} = 0.197e^{j120}(\text{кА})$$

$$\dot{U}_{QA1}^{(2)} = 7.203 \cdot e^{j-30} = 7.203e^{j-30} (\text{кВ})$$

$$\dot{U}_{QA2}^{(2)} = 6.956 \cdot e^{j30} = 6.956e^{j30} (\text{кВ})$$

Поскольку двухфазное КЗ не связано с землей, то токи нулевой последовательности протекать не будут, то есть периодическая составляющая тока нулевой последовательности фаз А, В, С в ветви с

выключателем равна нулю: $I_{QA0}^{(2)} = I_{QB0}^{(2)} = I_{QC0}^{(2)} = 0$.

Симметричные составляющие токов в месте установки выключателя:

$$\dot{I}_{QA} = (\dot{I}_{QA1} + \dot{I}_{QA2}) = (0.204e^{j-120} + 0.197e^{j120}) = 0,201e^{j181.732} (\text{кА})$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{QB} &= (a^2 \cdot \dot{I}_{QA1} + a \cdot \dot{I}_{QA2}) = (e^{j240} \cdot 0.204e^{j-120} + e^{j120} \cdot 0.197e^{j120}) = \\ &= (0.204e^{j120} + 0.197e^{j240}) = 0,163e^{j178.268} (\text{кА}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{QC} &= (a \cdot \dot{I}_{QA1} + a^2 \cdot \dot{I}_{QA2}) = (e^{j120} \cdot 0.204e^{j-120} + e^{j240} \cdot 0.197e^{j120}) = \\ &= (0.204e^{j0} + 0.197e^{j360}) = 0,401 (\text{кА}) \end{aligned}$$

Тогда напряжения фаз в месте установки выключателя:

$$\dot{U}_{QA} = (\dot{U}_{QA1} + \dot{U}_{QA2}) = (7.203e^{j-30} + 6.956e^{j30}) = 12,263 e^{j-0,577} (\text{кВ})$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{QB} &= (a^2 \cdot \dot{U}_{QA1} + a \cdot \dot{U}_{QA2}) = (7.203e^{j-30} e^{j240} + 6.956e^{j30} e^{j120}) = \\ &= (7.203e^{j210} + 6.956e^{j150}) = 12,263e^{j180,577} (\text{кВ}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{QC} &= (a \cdot \dot{U}_{QA1} + a^2 \cdot \dot{U}_{QA2}) = (7.203e^{j-30} e^{j120} + 6.956e^{j240}) = \\ &= (7.203e^{j90} + 6.956e^{j270}) = 0,247e^{j90} (\text{кВ}) \end{aligned}$$

Векторная диаграмма токов и напряжений в месте установки выключателя приведена на рис. 4.4

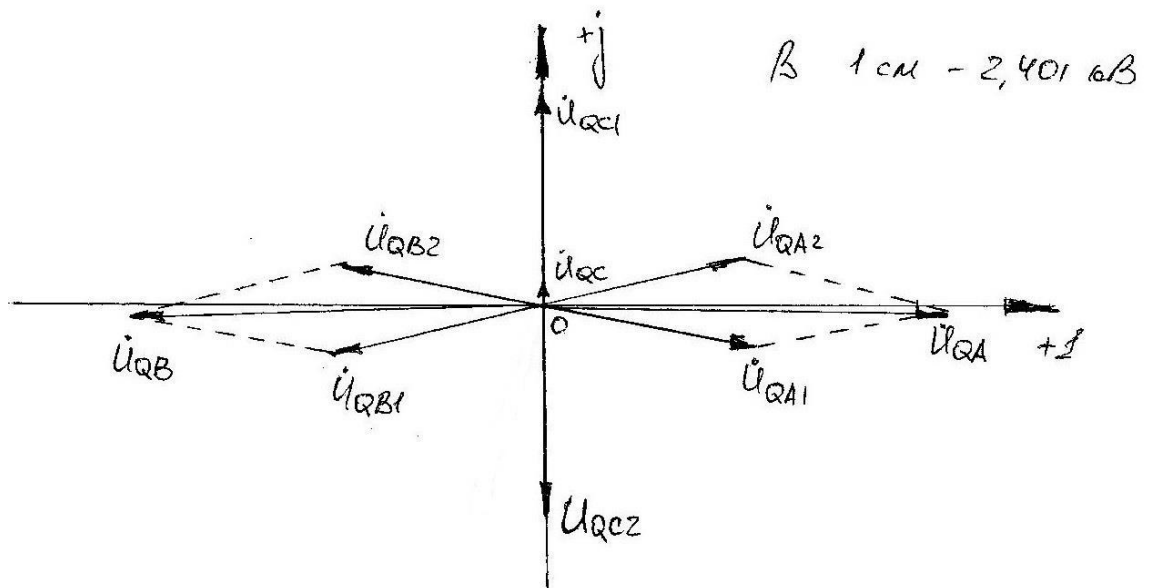
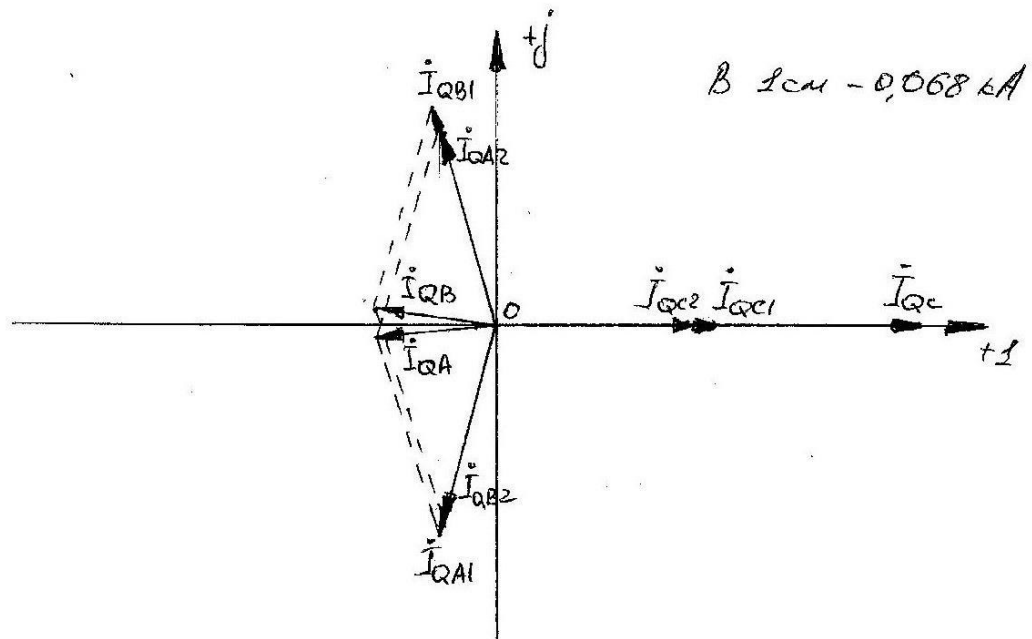


Рис. 4.4 Векторная диаграмма токов и напряжений в месте установки выключателя.

Модуль фазного тока в месте КЗ можно определить по следующему общему выражению: $I^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{A1}^{(n)}$,

где $m^{(n)}$ - коэффициент, рассчитываемый для определенного вида КЗ. В данном случае для двухфазного КЗ: $m^{(2)} = \sqrt{3}$.

Тогда модуль фазного тока: $I^{(2)} = m^{(2)} \cdot I_{A1}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 24.594 = 42.598 \text{ кА}$.

5. Сравнение полученных результатов

Результаты вычислений сводим в таблицу 3

Таблица 3

№ п/п	Величина	Метод эквивалентных ЭДС	Метод типовых кривых	Метод симметричных составляющих
1	Периодическая составляющая тока КЗ в месте повреждения, кА	28,461	28,47	42,598
2	Ударный ток в точке КЗ, кА	78,085	-	-
3	Ударный ток в ветви с выключателем, кА	2,623	-	-

Расчет периодической составляющей тока КЗ (и соответственно остальных величин переходного процесса) методом типовых кривых дает небольшую погрешность в пределах нормы для нулевого момента времени.

Указанные кривые позволяют определить изменение периодической слагающей тока прямой последовательности за время 3τ от начала переходного процесса.

Сделаем краткий итог по проделанной работе.

Задачей данного курсового проекта являлась рассчитать только начало возникновения аварийного режима в системе электроснабжения, поскольку установившиеся режимы, а именно нормальный и послеаварийный, мы разбирали в курсе «Электроэнергетика».

Во втором разделе, пользуясь методом эквивалентных ЭДС, мы произвели расчет токов трехфазного короткого замыкания для точки КЗ и для ветви с выключателем в нулевой момент времени. Поскольку характер изменения тока КЗ во времени является довольно сложной функцией (см. рис. 5.5 [2]), то в первом приближении ток КЗ можно представить как сумму периодической составляющей и аperiodической, в первый полупериод