

1 РАСЧЁТ ТРЁХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

1.1 Составление схемы замещения, для расчета симметричного КЗ

Как отображено на рисунке 1, ШСВ1 и ШСВ2 разомкнуты, таким образом исходная схема преобразуется до вида показанного на рисунке 2.

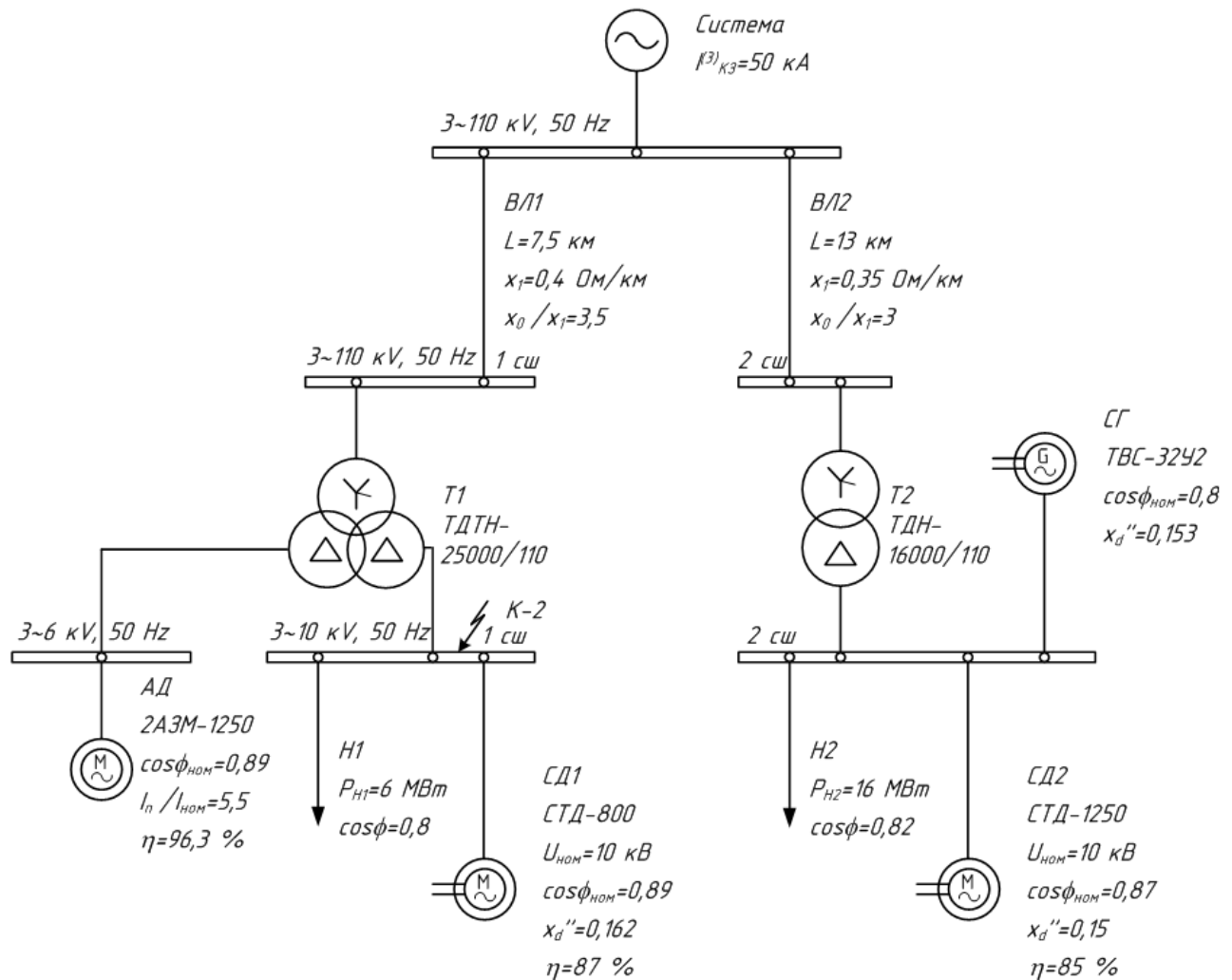


Рисунок 2 – Электрическая схема для расчета токов КЗ в точке К-2

На основе полученной электрической схемы составляем схему замещения. Схема замещения является эквивалентной схемой, в которой все реальные элементы замещены максимально близкими по функциональности цепями (могут состоять из нескольких элементов, например трансформатор или источник питания) из идеальных элементов. Схема замещения для расчета тока трехфазного КЗ приведена на рисунке 3.

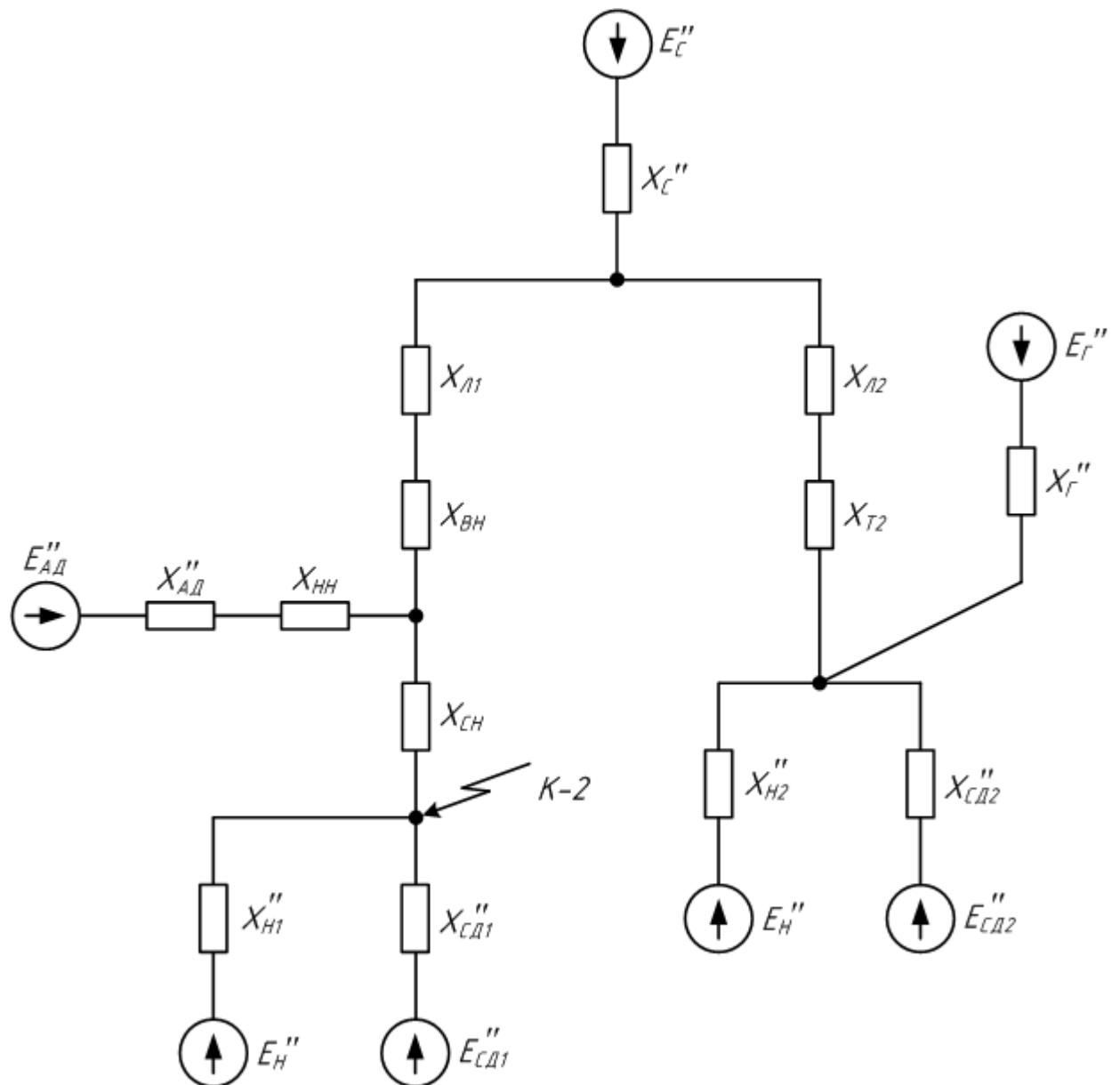


Рисунок 3 – Схема замещения для расчёта трёхфазного КЗ

1.2 Расчёт параметров схемы замещения в именованных единицах

Определяем параметры схемы замещения в именованных единицах с точным приведением к ступени напряжения, где произошло КЗ, в данном случае это шины напряжением 10 кВ.

Сопротивление системы:

$$X''_C = \frac{U_{\text{ср}C}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{КЗ}}^{(3)}} \cdot K_{\text{ТКСВ}}^2, \quad (1)$$

здесь $U_{\text{ср}C} = 115$ кВ – среднее номинальное напряжение на шинах системы;

$I_{K3}^{(3)}=50$ кА – ток трехфазного КЗ на шинах системы по заданию;

$K_{T1CB} = U_{T1CH}/U_{T1BH}=11/115$ – действительный коэффициент трансформации трансформатора Т1;

$$X''_C = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 50} \cdot \left(\frac{11}{115} \right)^2 = 0,0121 \text{ Ом.}$$

Сверхпереходное фазное значение ЭДС системы относительно шин, на которых произошло короткое замыкание:

$$E''_C = \frac{U_{cpC}}{\sqrt{3}} \cdot K_{T1CB}; \quad (2)$$

$$E''_C = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot \frac{11}{115} = 6,351 \text{ кВ.}$$

Сопротивления ВЛ, приведенные к уровню напряжения точки КЗ:

$$X_{Л} = x_1 \cdot L \cdot K_{T1CB}^2, \quad (3)$$

где x_1 – удельное сопротивление прямой последовательности ВЛ;

L – длина линии;

$$X_{Л1} = 0,4 \cdot 7,5 \cdot \left(\frac{11}{115} \right)^2 = 0,027 \text{ Ом;}$$

$$X_{Л2} = 0,35 \cdot 13 \cdot \left(\frac{11}{115} \right)^2 = 0,042 \text{ Ом.}$$

Сопротивления обмоток трехобмоточного трансформатора находятся по выражениям:

$$X_T = \frac{u_{K, \%}}{100} \cdot \frac{U_{T1CH}^2}{S_{НОМ}}; \quad (4)$$

$$u_{к BH}=0,5(u_{к BH-HH}+u_{к BH-CH}-u_{к CH-HH}); \quad (5)$$

$$u_{к CH}=0,5(u_{к BH-CH}+u_{к CH-HH}-u_{к BH-HH}); \quad (6)$$

$$u_{к HH}=0,5(u_{к BH-HH}+u_{к CH-HH}-u_{к BH-CH}), \quad (7)$$

где $u_{к, \%}$ – напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора или одной обмотки трехобмоточного трансформатора;

U_{T1CH} – номинальное напряжение обмотки трансформатора, обращенной в сторону КЗ;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора;

$u_{к BH-HH}$, $u_{к BH-CH}$, $u_{к CH-HH}$ – напряжения короткого замыкания пар обмоток трехобмоточного трансформатора;

$$u_{к BH}=0,5 \cdot (17,5+10,5-6,5)=10,75\%;$$

$$u_{к CH}=0,5 \cdot (10,5+6,5-17,5)=-0,25\%,$$

поскольку значение отрицательное, то принимаем $u_{к CH}=0$;

$$u_{к HH}=0,5 \cdot (17,5+6,5-10,5)=6,75\%;$$

$$X_{BH}=\frac{10,75}{100} \cdot \frac{11^2}{25}=0,520 \text{ Ом};$$

$$X_{CH}=0;$$

$$X_{HH}=\frac{6,75}{100} \cdot \frac{11^2}{25}=0,327 \text{ Ом}.$$

Сопротивление трансформатора Т2:

$$X_{T2}=\frac{u_{к, \%}}{100} \cdot \frac{U_{T2BH}^2}{S_{ном}} \cdot K_{T1CB}^2; \quad (8)$$

$$X_{T2}=\frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{16} \cdot \left(\frac{11}{115}\right)^2=0,794 \text{ Ом}.$$

Значения сверхпереходного сопротивления синхронного генератора, при-

веденные к напряжению места КЗ:

$$X''_{\Gamma(\text{НОМ})} = X''_{d*} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{T1CB}}^2 \cdot K_{\text{T2BH}}^2 ; \quad (9)$$

где X''_{d*} – сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси, приведенное к номинальной мощности генератора;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение генератора;

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность генератора;

$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности генератора;

$$X''_{\Gamma(\text{НОМ})} = 0,153 \cdot \frac{10,5^2}{32} \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{11}{115}\right)^2 \cdot \left(\frac{115}{11}\right)^2 = 0,422 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток генератора:

$$I_{\Gamma\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}} ; \quad (10)$$

$$I_{\Gamma\text{НОМ}} = \frac{32}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,8} = 2,199 \text{ кА.}$$

Сверхпереходное фазное значение ЭДС генератора:

$$E''_{\Gamma} = \sqrt{(U_{\text{НОМ.ф}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}})^2 + (U_{\text{НОМ.ф}} \cdot \sin\varphi_{\text{НОМ}} + X''_{\Gamma(\text{НОМ})} \cdot I_{\Gamma\text{НОМ}})^2} ; \quad (11)$$

$$E''_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,8\right)^2 + \left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,6 + 0,422 \cdot 2,199\right)^2} = 6,660 \text{ кВ.}$$

Сопротивление синхронных двигателей СД, включенных на шины, где произошло КЗ, в сверхпереходном режиме определяется по формуле:

$$X''_{\text{СД1}} = X''_{d*} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta ; \quad (12)$$

$$X_{\text{CD2}}'' = X_{\text{d}^*}'' \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta \cdot K_{\text{T1CB}}^2 \cdot K_{\text{T2BH}}^2, \quad (13)$$

где X_{d^*}'' – сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронного двигателя по продольной оси, приведенное к номинальной мощности двигателя;

$U_{\text{НОМ}}=10$ кВ – номинальное напряжение синхронного двигателя;

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность синхронного двигателя;

$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности синхронного двигателя;

η – КПД синхронного двигателя;

$$X_{\text{CD1}}'' = 0,162 \cdot \frac{10^2}{0,8} \cdot 0,89 \cdot 0,87 = 15,680 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{CD2}}'' = 0,15 \cdot \frac{10^2}{1,25} \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{11}{115}\right)^2 \cdot \left(\frac{115}{11}\right)^2 = 8,874 \text{ Ом}.$$

Номинальный ток синхронного двигателя:

$$I_{\text{CDНОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta}; \quad (14)$$

$$I_{\text{CD1НОМ}} = \frac{0,8}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,89 \cdot 0,87} = 0,060 \text{ кА};$$

$$I_{\text{CD2НОМ}} = \frac{1,25}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,87 \cdot 0,85} = 0,098 \text{ кА}.$$

Сверхпереходное фазное значение ЭДС СД1 определим по следующей формуле, принимая, что СД1 работает с перевозбуждением:

$$E''_{\text{CD}} = \sqrt{(U_{\text{НОМ.ф}} + X''_{\text{CD}} \cdot I_{\text{CDНОМ}} \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (X''_{\text{CD}} \cdot I_{\text{CDНОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2}; \quad (15)$$

$$E''_{\text{CD1}} = \sqrt{\left(\frac{10}{\sqrt{3}} + 15,680 \cdot 0,060 \cdot 0,456\right)^2 + (15,680 \cdot 0,060 \cdot 0,89)^2} = 6,259 \text{ кВ};$$

Для ЭДС СД2 учитываем точные коэффициенты трансформации:

$$E''_{\text{СД2}} = \sqrt{\left(\frac{10}{\sqrt{3}} + 8,874 \cdot 0,098 \cdot 0,493\right)^2 + (8,874 \cdot 0,098 \cdot 0,87)^2} \cdot \frac{11}{115} \cdot \frac{115}{11} = 6,248 \text{ кВ.}$$

Сверхпереходное сопротивление АД, приведенное к номинальным параметрам и к уровню напряжения точки КЗ:

$$X''_{\text{АД(НОМ)}} = \frac{1}{I_{\text{п}}/I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta; \quad (16)$$

$$X''_{\text{АД}} = X''_{\text{АД(НОМ)}} \cdot K_{\text{Т1СН}}^2, \quad (17)$$

где $I_{\text{п}}/I_{\text{НОМ}}$ – кратность пускового тока АД по отношению к его номинальному току;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение асинхронного двигателя;

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная активная мощность асинхронного двигателя;

$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности асинхронного двигателя;

η – КПД асинхронного двигателя;

$K_{\text{Т1СН}} = U_{\text{Т1СН}}/U_{\text{Т1НН}} = 11/6,6$ – действительный коэффициент трансформации трансформатора Т1 между средней и низкой стороной;

$$X''_{\text{АД(НОМ)}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{6^2}{1,25} \cdot 0,89 \cdot \frac{96,3}{100} = 4,488 \text{ Ом;}$$

$$X''_{\text{АД}} = 4,488 \cdot \left(\frac{11}{6,6}\right)^2 = 12,467 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток асинхронного двигателя:

$$I_{\text{АД}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta}; \quad (18)$$

$$I_{\text{АД}} = \frac{1,25}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,89 \cdot 0,963} = 0,140 \text{ кА.}$$

Сверхпереходное значение ЭДС АД, приведенное к уровню напряжения точки КЗ:

$$E''_{\text{АД}} = \sqrt{(U_{\text{ном.ф}} - X''_{\text{АД(ном)}} I_{\text{АД}} \sin \varphi_{\text{ном}})^2 + (X''_{\text{АД(ном)}} I_{\text{АД}} \cos \varphi_{\text{ном}})^2} \cdot K_{\text{Т1СН}}; \quad (19)$$

$$E''_{\text{АД}} = \sqrt{\left(\frac{6}{\sqrt{3}} - 4,488 \cdot 0,140 \cdot 0,456\right)^2 + (4,488 \cdot 0,140 \cdot 0,89)^2} \cdot \frac{11}{6,6} = 5,377 \text{ кВ.}$$

Сопротивление нагрузки:

$$X_{\text{Н}} = X_{\text{Н(ном)*}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{ном}}} \cdot \cos \varphi, \quad (20)$$

где $X_{\text{Н(ном)*}} = 0,35$ – сопротивление обобщенной нагрузки в относительных единицах, приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению нагрузки [1, с. 204];

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение нагрузки;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность нагрузки;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки;

$$X_{\text{Н1}} = 0,35 \cdot \frac{10^2}{6} \cdot 0,8 = 4,667 \text{ Ом};$$

Для Н2 учитываем точные коэффициенты трансформации

$$X_{\text{Н2}} = 0,35 \cdot \frac{10^2}{16} \cdot 0,82 \cdot \left(\frac{11}{115}\right)^2 \cdot \left(\frac{115}{11}\right)^2 = 1,794 \text{ Ом.}$$

Сверхпереходное фазное значение ЭДС нагрузки:

$$E''_{\text{Н}} = E''_{\text{Н*}} \cdot U_{\text{ном.ф}}, \quad (21)$$

где $E''_{\text{Н*}} = 0,85$ – относительное значение ЭДС обобщенной нагрузки [1, с. 204];

$$U_{\text{ном}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ кВ} - \text{номинальное фазное напряжение нагрузки};$$

$$E''_{\text{H1}} = E''_{\text{H2}} = 0,85 \cdot \frac{10}{\sqrt{3}} = 4,907 \text{ кВ}.$$

1.3 Расчёт параметров схемы замещения в относительных единицах

За основную ступень напряжения принимаем уровень напряжения места КЗ – $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$. Принимаем за базисную мощность – $S_6 = 1000 \text{ МВА}$, за базисное напряжение – $U_6 = U_{6.\text{осн}} = 10,5 \text{ кВ}$. Поскольку коэффициенты трансформации K_{T1BC} (между высокой и средней обмотками Т1) и K_{T2BH} (между высокой и низкой обмотками Т2) равны между собой, то базисное напряжение на шинах генератора будет равно основному базисному напряжению – $U_{6\Gamma} = U_{6.\text{осн}} = 10,5 \text{ кВ}$

Определяем базисные напряжения на других ступенях напряжения, используя действительные коэффициенты трансформации трансформаторов:

$$U_{6110} = U_{6.\text{осн}} \cdot \frac{U_{\text{T1BH}}}{U_{\text{T1CH}}}; \quad (22)$$

$$U_{66} = U_{6.\text{осн}} \cdot \frac{U_{\text{T1HH}}}{U_{\text{T1CH}}}, \quad (23)$$

где $U_{\text{T1BH}} = 115 \text{ кВ}$, $U_{\text{T1CH}} = 11 \text{ кВ}$, $U_{\text{T1HH}} = 6,6 \text{ кВ}$ – номинальные напряжения обмоток ВН и НН трансформатора Т1;

$$U_{6110} = 10,5 \cdot \frac{115}{11} = 109,773 \text{ кВ};$$

$$U_{66} = 10,5 \cdot \frac{6,6}{11} = 6,3 \text{ кВ}.$$

Сопротивление системы, приведённое к базисным условиям:

$$X''_{\text{C}^*6} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{K3}}^{(3)} \cdot U_{\text{срC}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{срC}}}{U_{6110}} \right)^2; \quad (24)$$

$$X''_{C*6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 115} \cdot \left(\frac{115}{109,773} \right)^2 = 0,1102 \text{ о.е.}$$

Значение ЭДС системы, приведённое к базисным условиям:

$$E''_{C*6} = U_{cpC} / U_{6110}; \quad (25)$$

$$E''_{C*6} = 115 / 109,773 = 1,048 \text{ о.е.}$$

Сопротивления ВЛ, приведённые к базисным условиям:

$$X_{Л*6} = x_1 \cdot L \cdot \frac{S_6}{U_{6110}^2}; \quad (26)$$

$$X_{Л1*6} = 0,4 \cdot 7,5 \cdot \frac{1000}{109,773^2} = 0,249 \text{ о.е.};$$

$$X_{Л2*6} = 0,35 \cdot 13 \cdot \frac{1000}{109,773^2} = 0,378 \text{ о.е.}$$

Сопротивления обмоток трансформаторов, приведённые к базисным условиям:

$$X_{T*6} = \frac{u_{к, \%}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном}} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_6} \right)^2; \quad (27)$$

$$X_{ВН*6} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{1000}{25} \cdot \left(\frac{115}{109,773} \right)^2 = 4,719 \text{ о.е.};$$

$$X_{СН*6} = 0;$$

$$X_{НН*6} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{1000}{25} \cdot \left(\frac{6,6}{6,3} \right)^2 = 2,963 \text{ о.е.};$$

$$X_{Т2*6} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{16} \cdot \left(\frac{115}{109,773} \right)^2 = 7,202 \text{ о.е.}$$

Сопротивление и ЭДС СГ в сверхпереходном режиме, приведённые к базисным условиям:

$$X_{\Gamma*6}'' = X_{d*}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6} \right)^2; \quad (28)$$

$$E_{\Gamma*6}'' = \sqrt{(X_{d*}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (1 + X_{d*}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6}; \quad (29)$$

$$X_{\Gamma*6}'' = 0,153 \cdot \frac{1000}{32} \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 3,825 \text{ о.е.};$$

$$E_{\Gamma*6}'' = \sqrt{(0,153 \cdot 0,8)^2 + (1 + 0,153 \cdot 0,6)^2} \cdot \frac{10,5}{10,5} = 1,099 \text{ о.е.}$$

ЭДС и сопротивление СД в сверхпереходном режиме, приведённые к базисным условиям:

$$E_{\text{CD}*6}'' = \sqrt{(X_{d*}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (1 + X_{d*}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6}; \quad (30)$$

$$X_{\text{CD}*6}'' = X_{d*}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_6} \right)^2; \quad (31)$$

$$E_{\text{CD1}*6}'' = \sqrt{(0,162 \cdot 0,89)^2 + (1 + 0,162 \cdot 0,456)^2} \cdot \frac{10}{10,5} = 1,032 \text{ о.е.};$$

$$X_{\text{CD1}*6}'' = 0,162 \cdot \frac{1000}{0,8} \cdot 0,89 \cdot 0,87 \cdot \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 142,218 \text{ о.е.};$$

$$E_{\text{CD2}*6}'' = \sqrt{(0,15 \cdot 0,87)^2 + (1 + 0,15 \cdot 0,493)^2} \cdot \frac{10}{10,5} = 1,030 \text{ о.е.};$$

$$X_{\text{CD2}*6}'' = 0,15 \cdot \frac{1000}{1,25} \cdot 0,87 \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 84,278 \text{ о.е.}$$

Сопротивление и ЭДС АД в сверхпереходном режиме, приведённые к ба-

зисным условиям:

$$X_{\text{АД}*\delta}'' = \frac{1}{I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{S_{\delta}}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta\delta}} \right)^2; \quad (32)$$

$$E_{\text{АД}*\delta}'' = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \right)^2 + \left(1 - \frac{1}{I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}}} \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta\delta}}; \quad (33)$$

$$X_{\text{АД}*\delta}'' = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{1000}{1,25} \cdot 0,89 \cdot 0,963 \cdot \left(\frac{6}{6,3} \right)^2 = 113,075 \text{ о.е.};$$

$$E_{\text{АД}*\delta}'' = \sqrt{\left(\frac{1}{5,5} \cdot 0,89 \right)^2 + \left(1 - \frac{1}{5,5} \cdot 0,456 \right)^2} \cdot \frac{6}{6,3} = 0,887 \text{ о.е.}$$

Сопротивление нагрузки, приведённое к базисным условиям:

$$X_{\text{Н}*\delta} = X_{\text{Н(НОМ)}*} \cdot \frac{S_{\delta}}{P_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta}} \right)^2; \quad (34)$$

$$X_{\text{Н1}*\delta} = 0,35 \cdot \frac{1000}{6} \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 42,328 \text{ о.е.};$$

$$X_{\text{Н2}*\delta} = 0,35 \cdot \frac{1000}{16} \cdot 0,82 \cdot \left(\frac{10}{10,5} \right)^2 = 16,270 \text{ о.е.}$$

Значение ЭДС нагрузки Н, приведённое к базисным условиям:

$$E_{\text{Н}*\delta}'' = E_{\text{Н}*}'' \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta}}; \quad (35)$$

$$E_{\text{Н}*\delta}'' = 0,85 \cdot \frac{10}{10,5} = 0,81 \text{ о.е.}$$

1.4 Расчёт периодических составляющих тока трёхфазного КЗ в именованных единицах

Преобразуем схему, показанную на рисунке 3, складывая последовательные сопротивления:

$$X_1 = X''_{AD} + X_{HH}; \quad (36)$$

$$X_2 = X_{BH} + X_{Л1}; \quad (37)$$

$$X_3 = X_{T2} + X_{Л2}; \quad (38)$$

$$X_1 = 12,467 + 0,327 = 12,794 \text{ Ом};$$

$$X_2 = 0,520 + 0,027 = 0,547 \text{ Ом};$$

$$X_3 = 0,794 + 0,042 = 0,836 \text{ Ом}.$$

Сопротивление $X_{BH} = 0$. Таким образом, схема упрощается до вида, показанного на рисунке 4.

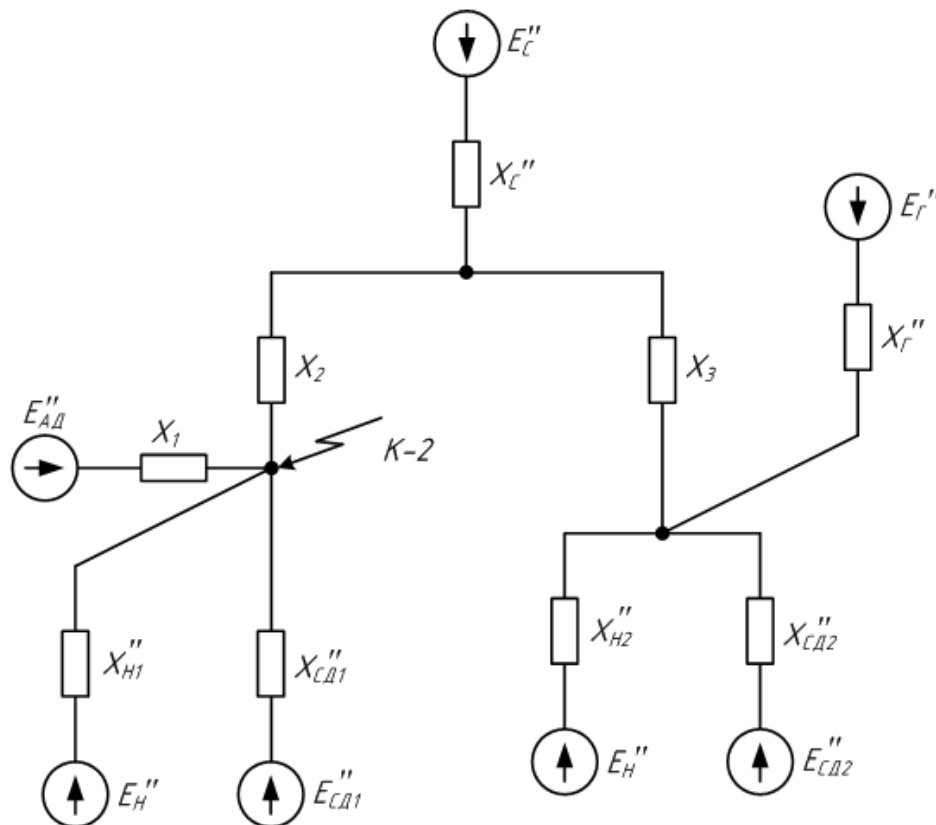


Рисунок 4 – Сложение последовательных сопротивлений

Далее избавляемся от ветви содержащей сопротивление X_3 [5, стр. 136-137]:

$$X_{\Sigma} = \left(\frac{1}{X_{\Gamma}} + \frac{1}{X_{\text{сд2}}} + \frac{1}{X_{\text{н2}}} \right)^{-1}; \quad (39)$$

$$X_{\Sigma} = \left(\frac{1}{0,422} + \frac{1}{8,874} + \frac{1}{1,794} \right)^{-1} = 0,329 \text{ Ом.}$$

Определяем коэффициенты распределения по ветвям:

$$C_i = X_{\Sigma} / X_i; \quad (40)$$

$$C_1 = 0,329 / 0,422 = 0,780;$$

$$C_2 = 0,329 / 8,874 = 0,037;$$

$$C_3 = 0,329 / 1,794 = 0,183.$$

Определяем результирующие сопротивления

$$X_{\text{эКВ}} = X_{\Sigma} + X_3; \quad (41)$$

$$X_j = X_{\text{эКВ}} / C_i; \quad (42)$$

$$X_{\text{эКВ}} = 0,329 + 0,836 = 1,165 \text{ Ом;}$$

$$X_4 = 1,165 / 0,780 = 1,494 \text{ Ом;}$$

$$X_5 = 1,165 / 0,037 = 31,486 \text{ Ом;}$$

$$X_6 = 1,165 / 0,183 = 6,366 \text{ Ом.}$$

Упрощенная схема показана на рисунке 5.

Следующее преобразование выполняется аналогично – методом коэффициентов, по выражениям (39) – (42). В отличие от предыдущего расчета параллельных ветвей будет четыре.

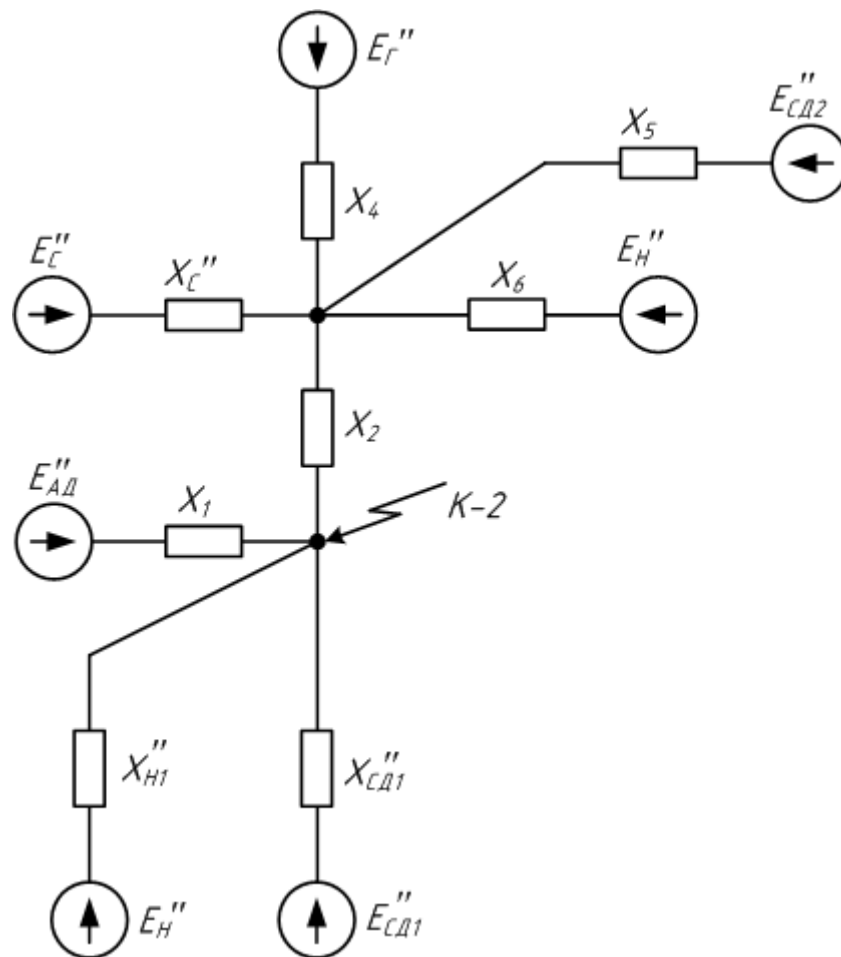


Рисунок 5 – Преобразование схемы методом коэффициентов

$$X_{\Sigma} = \left(\frac{1}{0,0121} + \frac{1}{1,494} + \frac{1}{31,486} + \frac{1}{6,366} \right)^{-1} = 0,01198 \text{ Ом};$$

$$C_1 = 0,01198 / 0,0121 = 0,9899;$$

$$C_2 = 0,01198 / 1,494 = 0,0079;$$

$$C_3 = 0,01198 / 31,486 = 0,0004;$$

$$C_4 = 0,01198 / 6,366 = 0,0018;$$

$$X_{\text{экв}} = 0,01198 + 0,547 = 0,55898 \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0,55898 / 0,9899 = 0,565 \text{ Ом};$$

$$X_8 = 0,55898 / 0,0079 = 70,757 \text{ Ом};$$

$$X_9 = 0,55898 / 0,0004 = 1397,450 \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 0,55898 / 0,0018 = 310,544 \text{ Ом}.$$

Окончательная схема замещения для расчета тока КЗ от каждого из источников приведена на рисунке 6.

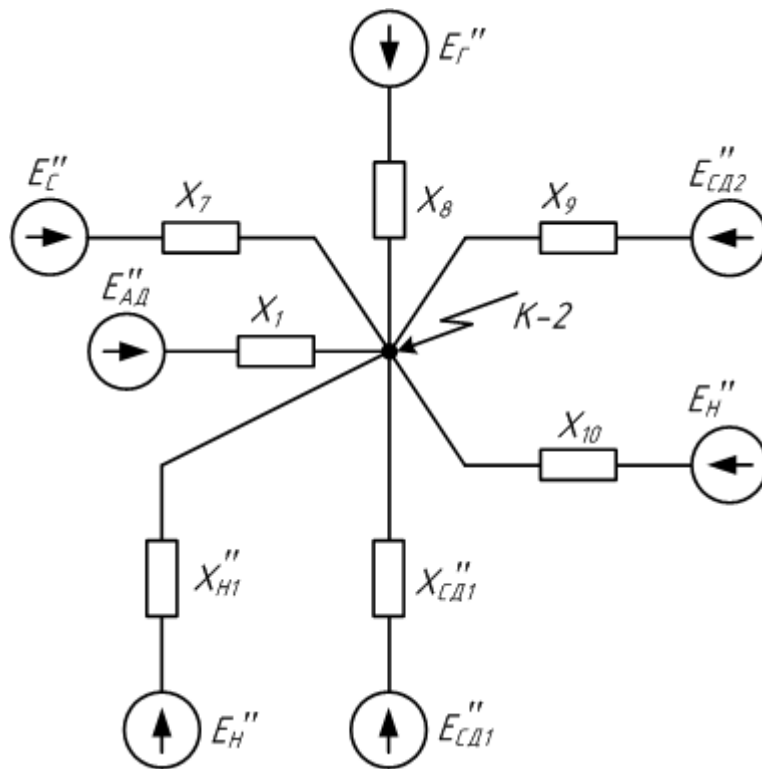


Рисунок 6 – Окончательная схема замещения для расчета трехфазного КЗ

Согласно заданию, необходимо найти токи короткого замыкания в точке КЗ и на шинах всех источников питания. Первым этапом определяем токи короткого замыкания от каждого источника. Вторым этапом определяем суммарный ток в точке КЗ. Третьим этапом определяем ток на шинах всех источников.

Периодическая составляющая тока в начальный момент времени от каждого из источников, в соответствии с рисунком 6:

$$I_{п0i} = \frac{E''_i}{X''_i}; \quad (43)$$

где E''_i и X''_i – соответственно фазная ЭДС и сопротивление ветви i -го источника;

$$I_{п0C} = \frac{6,351}{0,565} = 11,241 \text{ кА};$$

$$I_{п0Г} = \frac{6,660}{70,757} = 0,094 \text{ кА};$$

$$I_{п0CД1} = \frac{6,259}{15,680} = 0,399 \text{ кА};$$

$$I_{п0CД2} = \frac{6,248}{1397,450} = 0,004 \text{ кА};$$

$$I_{п0Н1} = \frac{4,907}{4,667} = 1,057 \text{ кА};$$

$$I_{п0Н2} = \frac{4,907}{310,544} = 0,016 \text{ кА};$$

$$I_{п0 АД} = \frac{5,377}{12,794} = 0,420 \text{ кА}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в заданной точке:

$$I_{п0} = I_{п0C} + I_{п0Г} + I_{п0CД1} + I_{п0CД2} + I_{п0Н1} + I_{п0Н2} + I_{п0АД}; \quad (44)$$

$$I_{п0} = 11,241 + 0,094 + 0,399 + 0,004 + 1,057 + 0,016 + 0,420 = 13,231 \text{ кА}.$$

Начальные значения периодических составляющих тока трёхфазного КЗ на шинах системы, генератора и асинхронного двигателя, приведенные к соответствующим уровням напряжений шин источников:

$$I_{п0C} = (I_{п0C} + I_{п0Г} + I_{п0CД2} + I_{п0Н2}) \cdot K_{Т1СВ}; \quad (45)$$

$$I_{п0АД} = I_{п0 АД} \cdot K_{Т1НС}; \quad (46)$$

$$I_{п0Г} = I_{п0Г} + I_{п0CД2} + I_{п0Н2}; \quad (47)$$

$$I_{п0C} = (11,241 + 0,094 + 0,004 + 0,016) \cdot \frac{11}{115} = 1,086 \text{ кА};$$

$$I_{п0АД} = 0,420 \cdot \frac{11}{6,6} = 0,700 \text{ кА};$$

$$I_{п0Г} = 0,094 + 0,004 + 0,016 = 0,114 \text{ кА}.$$

1.5 Расчёт периодических составляющих тока трёхфазного КЗ в относительных единицах

Для преобразования схемы воспользуемся выражениями (36) – (42) и рисунками 4 – 6:

$$X_1=113,075+2,963=116,038 \text{ о.е.};$$

$$X_2=4,719+0,249=4,968 \text{ о.е.};$$

$$X_3=7,202+0,378=7,580 \text{ о.е.};$$

$$X_{\Sigma}=\left(\frac{1}{3,825} + \frac{1}{84,278} + \frac{1}{16,270}\right)^{-1}=2,987 \text{ о.е.}$$

Коэффициенты распределения найдены выше:

$$C_1=0,780;$$

$$C_2=0,037;$$

$$C_3=0,183;$$

$$X_{\text{экв}}=2,987+7,580=10,567 \text{ о.е.};$$

$$X_4=10,567/0,780=13,547 \text{ о.е.};$$

$$X_5=10,567/0,037=285,595 \text{ о.е.};$$

$$X_6=10,567/0,183=57,743 \text{ о.е.};$$

$$X_{\Sigma}=\left(\frac{1}{0,1102} + \frac{1}{13,547} + \frac{1}{285,569} + \frac{1}{57,743}\right)^{-1}=0,10906 \text{ о.е.}$$

Коэффициенты распределения найдены выше:

$$C_1=0,9899;$$

$$C_2=0,0079;$$

$$C_3=0,0004;$$

$$C_4=0,0018;$$

$$X_{\text{экв}}=0,10906+4,968=5,07706 \text{ о.е.};$$

$$X_7=5,07706/0,9899=5,129 \text{ о.е.};$$

$$X_8=5,07706/0,0079=642,666 \text{ о.е.};$$

$$X_9=5,07706/0,0004=12692,65 \text{ о.е.};$$

$$X_{10}=5,07706/0,0018=2820,589 \text{ о.е.}$$

Определяем базисные токи для всех уровней напряжения:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}; \quad (48)$$

$$I_{610} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,986 \text{ кА};$$

$$I_{6110} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 109,775} = 5,259 \text{ кА};$$

$$I_{66} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,643 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока в начальный момент времени от каждого из источников, в соответствии с рисунком 6:

$$I_{п0 i} = \frac{E_{i*6}''}{X_{i*6}''} \cdot I_6; \quad (49)$$

$$I_{п0 C} = \frac{1,048}{5,129} \cdot 54,986 = 11,235 \text{ кА};$$

$$I_{п0 \Gamma} = \frac{1,099}{642,666} \cdot 54,986 = 0,094 \text{ кА};$$

$$I_{п0 CД1} = \frac{1,032}{142,218} \cdot 54,986 = 0,399 \text{ кА};$$

$$I_{п0 CД2} = \frac{1,030}{12692,65} \cdot 54,986 = 0,004 \text{ кА};$$

$$I_{п0 H1} = \frac{0,81}{42,328} \cdot 54,986 = 1,052 \text{ кА};$$

$$I_{п0 H2} = \frac{0,81}{2820,589} \cdot 54,986 = 0,016 \text{ кА};$$

$$I_{п0 AД} = \frac{0,887}{116,038} \cdot 54,986 = 0,420 \text{ кА}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в заданной точке:

$$I_{п0}=11,235+0,094+0,399+0,004+1,057+0,016+0,420=13,225 \text{ кА.}$$

Начальные значения периодических составляющих тока трёхфазного КЗ на шинах системы, генератора и асинхронного двигателя, приведенные к соответствующим уровням напряжений шин источников:

$$I_{п0C}=\left(\frac{1,048}{5,129}+\frac{1,099}{642,666}+\frac{1,030}{12692,65}+\frac{0,81}{2820,589}\right)\cdot 5,259=1,085 \text{ кА;}$$

$$I_{п0АД}=\frac{0,887}{116,038}\cdot 91,643=0,701 \text{ кА;}$$

$$I_{п0Г}=0,094+0,004+0,016=0,114 \text{ кА.}$$

Токи рассчитанные двумя методами совпадают.

1.6 Расчёт ударного тока

Ударный ток в месте КЗ определяется по значению сверхпереходной периодической составляющей тока КЗ:

$$i_{уд}=\sqrt{2}\cdot I_{п0}\cdot K_{уд}, \quad (50)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент [6, таблица 3.6].

$$i_{удC}=\sqrt{2}\cdot 11,235\cdot 1,90=30,189 \text{ кА;}$$

$$i_{удГ}=\sqrt{2}\cdot 0,094\cdot 1,95=0,259 \text{ кА;}$$

$$i_{удCД1}=\sqrt{2}\cdot 0,399\cdot 1,369=0,722 \text{ кА;}$$

$$i_{удCД2}=\sqrt{2}\cdot 0,004\cdot 1,369=0,008 \text{ кА;}$$

$$i_{удН1}=\sqrt{2}\cdot 1,052\cdot 1,369=2,037 \text{ кА;}$$

$$i_{удН2}=\sqrt{2}\cdot 0,016\cdot 1,369=0,031 \text{ кА;}$$

$$i_{удАД}=\sqrt{2}\cdot 0,420\cdot 1,369=0,813 \text{ кА.}$$

Ударный ток в месте КЗ:

$$i_{уд}=30,189+0,259+0,722+0,008+2,037+0,031+0,813=34,059 \text{ кА.}$$

1.7 Расчёт тока КЗ в заданный момент времени

Определяем ток трехфазного КЗ в точке КЗ к моменту его снятия ($t_{откл}=0,1$ с). Находим отношения периодических составляющих тока от синхронного генератора, СД и АД в начальный момент КЗ к номинальным токам этих источников:

$$I_{п0}^{*(ном)} = I_{п0} / I_{ном} ; \quad (51)$$

$$I_{п0}^{*(ном)Г} = 0,094 / 2,199 = 0,042;$$

$$I_{п0}^{*(ном)СД1} = 0,399 / 0,060 = 6,65;$$

$$I_{п0}^{*(ном)СД2} = 0,004 / 0,098 = 0,041;$$

$$I_{п0}^{*(ном)АД} = 0,700 / 0,140 = 5,000.$$

$I_{п0}^{*(ном)} < 2$ для СГ и СД2, следовательно для этих машин ток КЗ во времени не изменяется. Для момента времени $t_{откл}=0,1$ с по значениям $I_{п0}^{*(ном)СД}$ и $I_{п0}^{*(ном)АД}$ определяем значения γ [4, рис. 5.8, 5.9]:

$$\gamma_{СД1} = 0,55;$$

$$\gamma_{АД} = 0,24.$$

Принимаем, что переодические составляющие тока трёхфазного КЗ для нагрузки и системы не изменяются во времени, тогда:

$$I_{п0,1} = I_{п0 С} + I_{п0 Г} + \gamma_{СД1} \cdot I_{п0 СД1} + I_{п0 СД2} + I_{п0 Н1} + I_{п0 Н2} + \gamma_{АД} \cdot I_{п0 АД} ; \quad (52)$$

$$I_{п0,1} = 11,235 + 0,094 + 0,55 \cdot 0,399 + 0,004 + 1,057 + 0,016 + 0,24 \cdot 0,420 = 12,726 \text{ кА}.$$

2 РАСЧЁТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

2.1 Составление схем замещения, для расчета несимметричных КЗ

Расчётная схема для определения токов несимметричного КЗ показана на рисунке 7.

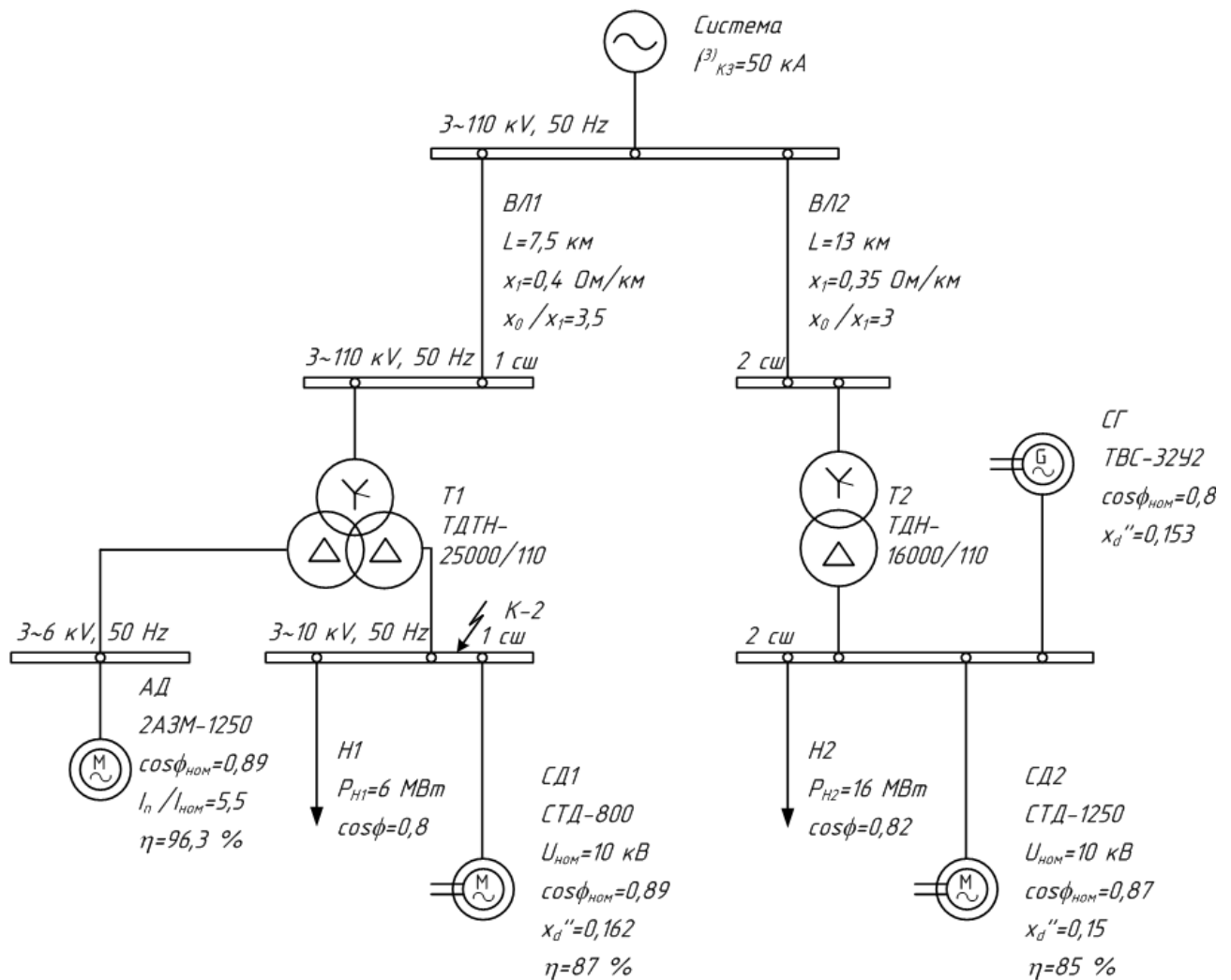


Рисунок 7 – Расчётная схема для расчета токов несимметричного КЗ

Для расчета несимметричного КЗ будем использовать метод симметричных составляющих. Для каждой симметричной составляющей токов КЗ составляется своя схема замещения. В точке К-2 – двухфазное короткое замыкание. Для двухфазного короткого замыкания составляем схемы замещения прямой и обратной последовательностей. Схема замещения прямой последовательности идентична схеме замещения приведенной на рисунке 3. Схему замещения обратной последовательности покажем на рисунке 8.

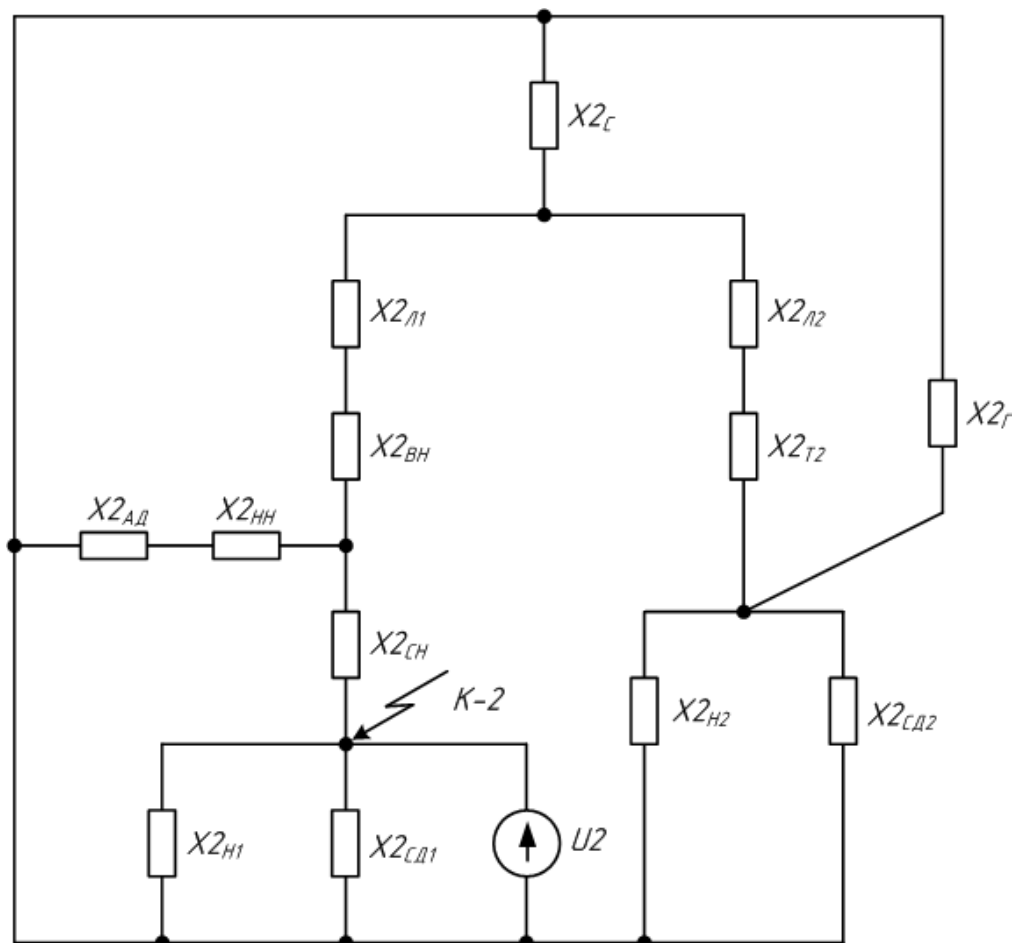


Рисунок 8 – Схема замещения обратной последовательности

2.2 Расчёт параметров элементов схем замещения

Согласно заданию, расчёт проводится с приближенным учетом коэффициентов трансформации. В данном случае, для расчёта параметров схемы замещения, будем использовать именованные единицы. Все сопротивления и ЭДС приводим к ступени напряжения 10 кВ, используя среднее номинальное напряжение $U_{cp10}=10,5$ кВ.

Сопротивления прямой и обратной последовательностей системы:

$$X_C=X_{2C}=\frac{U_{cp110}}{\sqrt{3} \cdot I_{K3}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_{cp10}}{U_{cp110}} \right)^2; \quad (53)$$

$$X_C=X_{2C}=\frac{115}{\sqrt{3} \cdot 50} \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,0111 \text{ Ом.}$$

Фазное значение ЭДС системы:

$$E''_C = \frac{U_{cp10}}{\sqrt{3}}; \quad (54)$$

$$E''_C = \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,062 \text{ кВ.}$$

Значения сопротивлений прямой и обратной последовательностей ВЛ:

$$X_{Л1} = X_{Л2} = x_1 \cdot L \cdot \left(\frac{U_{cp10}}{U_{cp110}} \right)^2, \quad (55)$$

где x_1 – удельное сопротивление прямой последовательности ВЛ;

L – длина линии;

$$X_{Л1} = 0,4 \cdot 7,5 \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,025 \text{ Ом};$$

$$X_{Л2} = 0,35 \cdot 13 \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,038 \text{ Ом.}$$

Сопротивления трансформаторов:

$$X_T = X_{T2} = \frac{u_{к, \%}}{100} \cdot \frac{U_{cp10}^2}{S_{ном}}; \quad (56)$$

$$X_{BH} = \frac{10,75}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,474 \text{ Ом};$$

$$X_{CH} = 0;$$

$$X_{HH} = \frac{6,75}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,298 \text{ Ом};$$

$$X_{T2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{16} = 0,724 \text{ Ом.}$$

Значение сопротивления прямой последовательности синхронного генератора, приведенное к напряжению места КЗ:

$$X_{\Gamma} = X_{d*}'' \cdot \frac{U_{cp10}^2}{P_{ном}} \cdot \cos \varphi_{ном}, \quad (57)$$

$$X_{\Gamma} = 0,153 \cdot \frac{10,5^2}{32} \cdot 0,8 = 0,422 \text{ Ом.}$$

Сопротивление обратной последовательности синхронного генератора, приведенное к напряжению места КЗ:

$$X_{\Gamma} = X_{2*} \cdot \frac{U_{cp10}^2}{P_{ном}} \cdot \cos \varphi_{ном}, \quad (58)$$

где $X_{2*} = 0,174$ – сопротивление генератора обратной последовательности, приведенное к номинальным параметрам генератора [3, с. 80];

$$X_{2\Gamma} = 0,174 \cdot \frac{10,5^2}{32} \cdot 0,8 = 0,480 \text{ Ом.}$$

ЭДС генератора, приведенная к напряжению места КЗ:

$$E''_{\Gamma} = \sqrt{(U_{ном.ф} \cdot \cos \varphi_{ном})^2 + (U_{ном.ф} \cdot \sin \varphi_{ном} + X''_{\Gamma(ном)} \cdot I_{\Gamma(ном)})^2}, \quad (59)$$

здесь $U_{cp \Gamma} = U_{cp 10} = 10,5$ кВ – среднее номинальное напряжение ступени, на которую включен генератор;

$$E''_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,8\right)^2 + \left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 0,6 + 0,422 \cdot 2,199\right)^2} = 6,660 \text{ кВ.}$$

Сопротивления синхронных двигателей прямой и обратной последовательностей, приведенные к напряжению места КЗ:

$$X_{сд} = X_{2сд} = X_{d*}'' \cdot \frac{U_{cp10}^2}{P_{ном}} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta; \quad (60)$$

$$X_{сд1} = 0,162 \cdot \frac{10,5^2}{0,8} \cdot 0,89 \cdot 0,87 = 17,287 \text{ Ом;}$$

$$X_{сД2} = 0,15 \cdot \frac{10,5^2}{1,25} \cdot 0,87 \cdot 0,85 = 9,784 \text{ Ом.}$$

ЭДС синхронных двигателей, приведенные к напряжению места КЗ:

$$E''_{сД} = \sqrt{(U_{ср10} + X''_{сД(ном)} \cdot I_{сДном} \cdot \sin \varphi_{ном})^2 + (X''_{сД(ном)} \cdot I_{сДном} \cdot \cos \varphi_{ном})^2}; \quad (61)$$

$$E''_{сД1} = \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} + 17,287 \cdot 0,060 \cdot 0,493\right)^2 + (17,287 \cdot 0,060 \cdot 0,87)^2} = 6,635 \text{ кВ};$$

$$E''_{сД2} = \sqrt{\left(\frac{10,5}{\sqrt{3}} + 9,784 \cdot 0,098 \cdot 0,527\right)^2 + (9,784 \cdot 0,098 \cdot 0,85)^2} = 6,618 \text{ кВ.}$$

Сопротивления АД прямой и обратной последовательностей, приведенные к уровню напряжения КЗ:

$$X_{АД} = X_{2АД} = \frac{1}{I_{п}/I_{ном}} \cdot \frac{U_{ср10}^2}{P_{ном}} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta; \quad (62)$$

$$X_{АД} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{10,5^2}{1,250} \cdot 0,89 \cdot 0,963 = 13,744 \text{ Ом.}$$

ЭДС асинхронного двигателя, приведенная к уровню напряжения КЗ:

$$E''_{АД} = \sqrt{(U_{ном.ф} - X''_{АД(ном)} I_{АД} \sin \varphi_{ном})^2 + (X''_{АД(ном)} I_{АД} \cos \varphi_{ном})^2} \cdot \frac{U_{ср10}}{U_{срАД}}, \quad (63)$$

где $U_{ср АД} = U_{ср 6} = 6,3 \text{ кВ}$ – среднее номинальное напряжение ступени, на которую включен АД;

$$E''_{АД} = \sqrt{\left(\frac{6}{\sqrt{3}} - 4,488 \cdot 0,140 \cdot 0,456\right)^2 + (4,488 \cdot 0,140 \cdot 0,89)^2} \cdot \frac{10,5}{6,3} = 5,377 \text{ кВ.}$$

Сопротивления прямой и обратной последовательностей обобщенной нагрузки [1, с. 204; 5, с. 21]:

$$X_{H(ном)*}=X_{2 H(ном)*}=0,35 \text{ о.е.}$$

Приводим значения сопротивлений нагрузок прямой обратной последовательностей к ступени напряжения, где произошло КЗ:

$$X_H=X_{2 H}=X_{H(ном)*} \cdot \frac{U_{cp10}^2}{P_{ном}} \cdot \cos\varphi; \quad (64)$$

$$X_{H1}=0,35 \cdot \frac{10,5^2}{6} \cdot 0,8=5,145 \text{ Ом};$$

$$X_{H2}=0,35 \cdot \frac{10,5^2}{16} \cdot 0,82=1,972 \text{ Ом.}$$

Фазное значение ЭДС нагрузки, приведенное к ступени 10 кВ:

$$E''_H=E''_{H*} \cdot \frac{U_{cpC}}{\sqrt{3}}, \quad (65)$$

$$E''_{H1}=E''_{H2}=0,85 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3}}=5,153 \text{ кВ.}$$

2.3 Преобразование схем замещения

Преобразуем схему замещения используя выражения (36) – (42):

$$X_1=13,744+0,298=14,042 \text{ Ом};$$

$$X_2=0,474+0,025=0,499 \text{ Ом};$$

$$X_3=0,724+0,038=0,762 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma}=\left(\frac{1}{0,422} + \frac{1}{9,784} + \frac{1}{1,972}\right)^{-1}=0,336 \text{ Ом};$$

$$C_1=0,336/0,422=0,796;$$

$$C_2=0,336/9,784=0,034;$$

$$C_3=0,336/1,972=0,170;$$

$$X_{\text{эКВ}}=0,336+0,762=1,098 \text{ Ом};$$

$$X_4=1,098/0,796=1,379 \text{ Ом};$$

$$X_5=1,098/0,034=32,294 \text{ Ом};$$

$$X_6 = 1,098 / 0,170 = 6,459 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma} = \left(\frac{1}{0,0111} + \frac{1}{1,379} + \frac{1}{32,294} + \frac{1}{6,459} \right)^{-1} = 0,01099 \text{ Ом};$$

$$C_1 = 0,01099 / 0,0111 = 0,9901;$$

$$C_2 = 0,01099 / 1,379 = 0,0079;$$

$$C_3 = 0,01099 / 32,294 = 0,0003;$$

$$C_4 = 0,01099 / 6,459 = 0,0017;$$

$$X_{\text{экв}} = 0,01099 + 0,499 = 0,50999 \text{ Ом};$$

$$X_7 = 0,50999 / 0,9901 = 0,515 \text{ Ом};$$

$$X_8 = 0,50999 / 0,0079 = 64,556 \text{ Ом};$$

$$X_9 = 0,50999 / 0,0003 = 1699,967 \text{ Ом};$$

$$X_{10} = 0,50999 / 0,0017 = 299,994 \text{ Ом}.$$

Делаем аналогичные преобразования для схемы обратной последовательности (рисунки 9 – 10)

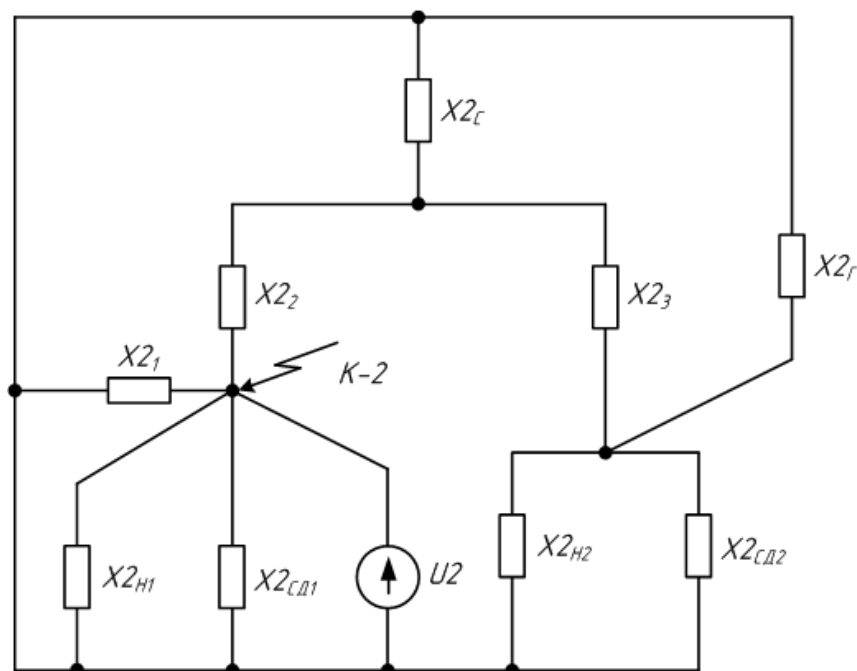


Рисунок 9 – Преобразование схемы замещения обратной последовательности

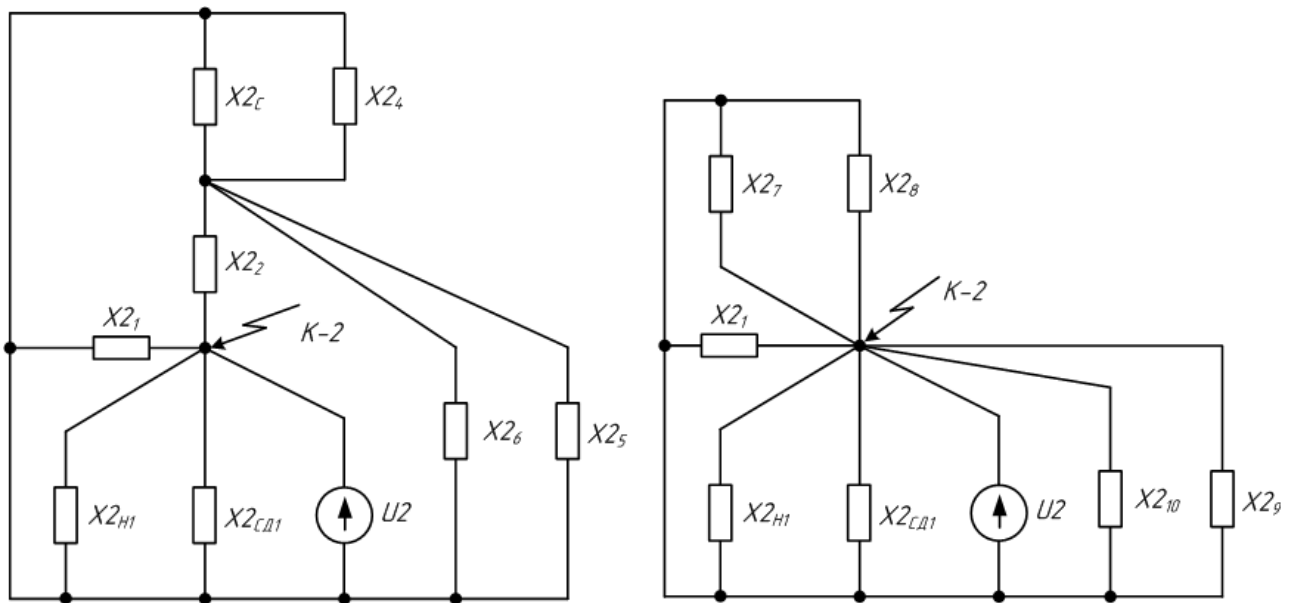


Рисунок 10 – Преобразование схемы замещения обратной последовательности

$$X_{21}=13,744+0,298=14,042 \text{ Ом};$$

$$X_{22}=0,474+0,025=0,499 \text{ Ом};$$

$$X_{23}=0,724+0,038=0,762 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma}=\left(\frac{1}{0,480}+\frac{1}{9,784}+\frac{1}{1,972}\right)^{-1}=0,371 \text{ Ом};$$

$$C_1=0,371/0,480=0,773;$$

$$C_2=0,371/9,784=0,038;$$

$$C_3=0,371/1,972=0,188;$$

$$X_{\text{эКВ}}=0,371+0,762=1,133 \text{ Ом};$$

$$X_{24}=1,133/0,773=1,466 \text{ Ом};$$

$$X_{25}=1,133/0,038=29,816 \text{ Ом};$$

$$X_{26}=1,133/0,188=6,027 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma}=\left(\frac{1}{0,0111}+\frac{1}{1,466}+\frac{1}{29,816}+\frac{1}{6,027}\right)^{-1}=0,01099 \text{ Ом};$$

$$C_1=0,01099/0,0111=0,9901;$$

$$C_2=0,01099/1,466=0,0077;$$

$$C_3=0,01099/29,816=0,0004;$$

$$C_4=0,01099/6,027=0,0018;$$

$$X_{\text{эКВ}}=0,01099+0,499=0,50999 \text{ Ом};$$

$$X_{27}=0,50999/0,9901=0,515 \text{ Ом};$$

$$X_{28}=0,50999/0,0077=66,232 \text{ Ом};$$

$$X_{29}=0,50999/0,0004=1274,975 \text{ Ом};$$

$$X_{210}=0,50999/0,0018=283,328 \text{ Ом}.$$

2.4 Расчёт двухфазного короткого замыкания

Дополнительное сопротивление для расчёта тока прямой последовательности неповреждённой фазы:

$$\Delta X_i^{(2)} = X_{2_{\text{рез } i}}; \quad (66)$$

Все значения дополнительных сопротивлений определены выше.

Токи прямой и обратной последовательностей неповреждённой фазы А от каждого источника:

$$\underline{I}_{\text{кА1i}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2i}}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\text{Эi}}}{j(X_i + \Delta X_i^{(2)})}; \quad (67)$$

$$\underline{I}_{\text{кА1C}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2C}}^{(2)} = \frac{j6,062}{j(0,515 + 0,515)} = 5,885 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{кА1Г}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2Г}}^{(2)} = \frac{j6,660}{j(64,556 + 66,232)} = 0,051 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{кА1Н1}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2Н1}}^{(2)} = \frac{j5,153}{j(5,145 + 5,145)} = 0,501 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{кА1СД1}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2СД1}}^{(2)} = \frac{j6,635}{j(17,287 + 17,287)} = 0,192 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{кА1Н2}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2Н2}}^{(2)} = \frac{j5,153}{j(299,994 + 283,328)} = 0,009 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{кА1СД2}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{кА2СД2}}^{(2)} = \frac{j6,618}{j(1699,967 + 1274,975)} = 0,002 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{KA1 AД}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{KA2 AД}}^{(2)} = \frac{j5,377}{j(14,042 + 14,042)} = 0,191 \text{ кА.}$$

Определяем суммарный ток в точке короткого замыкания, как сумму всех полученных токов по выражению (44):

$$\underline{I}_{\text{KA1}}^{(2)} = -\underline{I}_{\text{KA2}}^{(2)} = 5,885 + 0,051 + 0,501 + 0,192 + 0,009 + 0,002 + 0,191 = 6,831 \text{ кА.}$$

Токи в фазах при КЗ в фазах В и С:

$$\underline{I}_{\text{KA}}^{(2)} = 0; \quad (68)$$

$$\underline{I}_{\text{KB}}^{(2)} = -j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{\text{KA1}}^{(2)}; \quad (69)$$

$$\underline{I}_{\text{KC}}^{(2)} = j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{\text{KA1}}^{(2)}; \quad (70)$$

$$\underline{I}_{\text{KA}}^{(2)} = 0;$$

$$\underline{I}_{\text{KB}}^{(2)} = -j \cdot \sqrt{3} \cdot 6,831 = -j11,832 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{KC}}^{(2)} = j \cdot \sqrt{3} \cdot 6,831 = j11,832 \text{ кА.}$$

Токи прямой и обратной последовательностей неповреждённой фазы А на шинах источников (45) – (47):

$$\underline{I}_{\text{п0C}} = (5,885 + 0,051 + 0,009 + 0,002) \cdot \frac{10,5}{115} = 0,543 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{п0Г}} = 0,051 + 0,009 + 0,002 = 0,062 \text{ кА.}$$

$$\underline{I}_{\text{п0AД}} = 0,191 \cdot \frac{10,5}{6,3} = 0,318 \text{ кА};$$

Фазные значения токов на шинах источников при двухфазном КЗ в точке К-1 рассчитываются по выражениям (68)–(70):

$$\underline{I}_{\text{KA110}}^{(2)} = 0,543 - 0,543 + 0 = 0 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{KB110}}^{(2)} = 0,543 \cdot e^{j240} - 0,543 \cdot e^{j120} + 0 = -j0,941 \text{ кА};$$

$$\underline{I}_{\text{KC110}}^{(2)} = 0,543 \cdot e^{j120} - 0,543 \cdot e^{j240} + 0 = j0,941 \text{ кА};$$

$$I_{\kappa A 10}^{(2)} = 0,062 - 0,062 + 0 = 0;$$

$$I_{\kappa B 10}^{(2)} = 0,062 \cdot e^{j240} - 0,062 \cdot e^{j120} + 0 = -j0,107 \text{ кА};$$

$$I_{\kappa C 10}^{(2)} = 0,062 \cdot e^{j120} - 0,062 \cdot e^{j240} + 0 = j0,107 \text{ кА};$$

$$I_{\kappa A 6}^{(2)} = 0,318 - 0,318 + 0 = 0;$$

$$I_{\kappa B 6}^{(2)} = 0,318 \cdot e^{j240} - 0,318 \cdot e^{j120} + 0 = -j0,551 \text{ кА};$$

$$I_{\kappa C 6}^{(2)} = 0,318 \cdot e^{j120} - 0,318 \cdot e^{j240} + 0 = j0,551 \text{ кА}.$$

На рисунке 11 показана векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ.

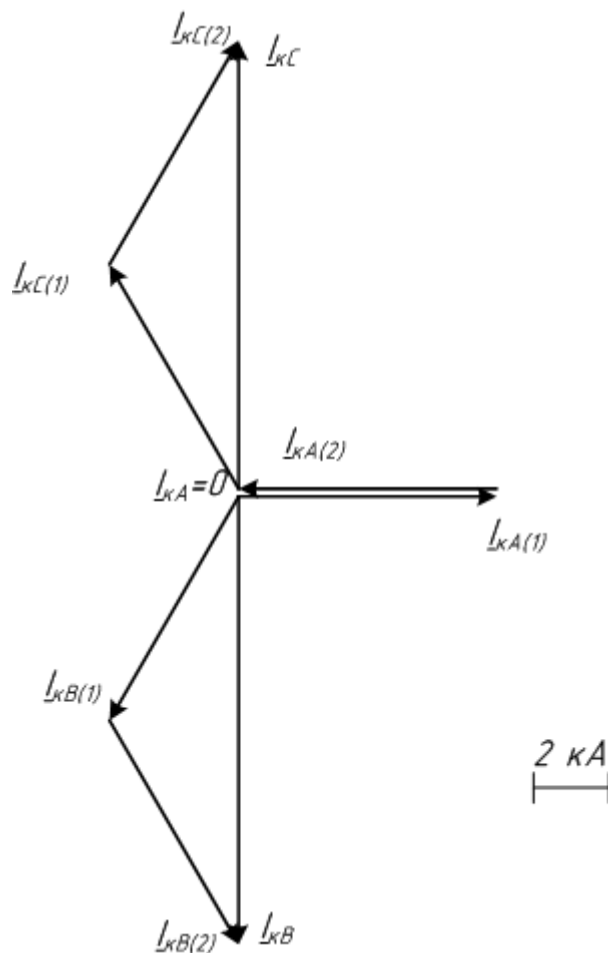


Рисунок 11 – Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ