



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»

Методические указания
к практикуму по дисциплине
**Переходные электромагнитные
процессы в энергетических системах**

Автор
Шелест В.А.



Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

Методические указания предназначены для подготовки бакалавров заочной формы обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и профилю «Электроэнергетические системы и сети».

Автор

к.т.н., доцент кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»

Шелест В.А.



Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	5
ПЗ №1. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ СВЕРХПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	6
ПЗ №2. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ОБОБЩЕННОЙ НАГРУЗКИ.....	12
ПЗ №3. РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И УДАРНОГО ТКЗ.....	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	27

ВВЕДЕНИЕ

В настоящих указаниях рассматриваются методы расчетов электромагнитных переходных процессов в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы.

Уделено внимание важному вопросу расчета начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания. Применены точные и приближенные методы расчета токов короткого замыкания в именованных и относительных единицах.

Выполняется расчет токов трехфазного короткого замыкания с учетом электрических двигателей и обобщенной нагрузки. Токи короткого замыкания определяются отдельно от каждого источника с последующим суммированием.

Подробно рассмотрены методы расчетов несимметричных токов коротких замыканий и ударного т.к.з. Выполняются расчеты двухфазного, однофазного и двухфазного короткого замыкания на землю. Ударный ток короткого замыкания рассчитывается для первого периода с максимальной апериодической составляющей.

Успешному выполнению заданий по практическим занятиям способствует знание основ электротехники и электроники.

Применение компьютерных технологий позволяет ускорить анализ, исследования и расчеты по практическим заданиям. Рекомендуется использовать программу Microsoft Office.

Темы практических занятий соответствуют рабочей программе изучаемой дисциплины.

Методика проведения практических занятий содержит элементы научных исследований.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.

1.Выполнению заданий предшествует изучение методов расчета токов коротких замыканий по дисциплине «Переходные электромагнитные процессы в энергосистемах».

2.Практические занятия состоят из 3 частей:

- Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания.
- Расчет токов трехфазного короткого замыкания с учетом электрических двигателей и обобщенной нагрузки.
- Расчет несимметричных токов коротких замыканий и ударного т.к.з.

3.Индивидуальные задания по практическим занятиям выдаются преподавателем.

4.Рекомендуется выполненные задания печатать (формат А4). Текст и формулы набираются в редакторе Word. Рисунки и графики выполняются в графическом редакторе.

5.Необходимо использовать титульный лист установленного образца.

6.Результаты выполненных практических заданий печатаются в общем отчете.

7.При защите необходимо показать знание материала, изложенного в отчете.

Без защищенных выполненных заданий студент к экзамену не допускается.

Практическое занятие № 1

**РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ СВЕРХПЕРЕХОДНЫХ ТОКОВ
ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Пример 1.1. Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном повреждении в точке k для заданного участка энергосистемы (рис.1.7) в именованных и относительных базисных единицах с точным и приближенным приведением коэффициентов трансформации. Оба генератора до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

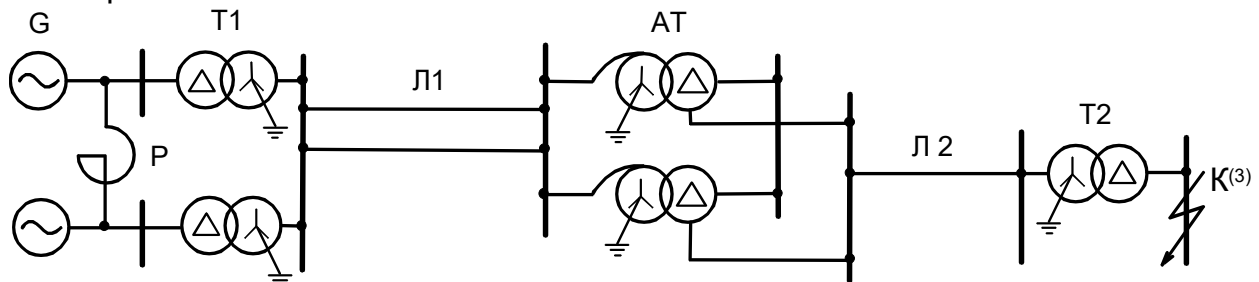


Рис.1.1 Схема энергосистемы с односторонним питанием..

Параметры элементов схемы:

- Генератор ТВФ-100-2: $P_i = 100$ МВт; $U_i = 10,5$ кВ; $\cos \varphi = 0,85$; $x_d'' = 0,183$;
- Трансформатор Т1: ТЦ-12500/220: $S_i = 125$ МВА; $U_{ii} = 10,5$ кВ; $U_{Ai} = 242$ кВ; $U_{k\%} = 11\%$;
- Автотрансформатор АТДЦТН-200000/220/110 $S_i = 200$ МВА; $U_{Ai} = 220$ кВ; $U_{Ci} = 121$ кВ; $U_{ii} = 38,5$ кВ; $U_{k*Ai} = 34\%$; $U_{k*AC} = 11\%$; $U_{k*CH} = 21\%$;
- Трансформатор Т2 ТРДЦН-125000/110: $S_i = 125$ МВА; $U_{Ai} = 110$ кВ; $U_{ii} = 11$ кВ; $U_{k\%} = 10,5\%$;
- Двухцепная линия: длина Л1 = 60 км, погонное сопротивление $x_{ii\tilde{a}} = 0,4$ Ом/км;
- Одноцепная линия: длина Л2 = 25 км, погонное сопротивление $x_{ii\tilde{a}} = 0,4$ Ом/км.

Используя рекомендации п.1.3, составим схему замещения (рис.1.2). Генераторы, трансформаторы, двухцепная линия, автотрансформаторы, используя принцип симметрии, изображаются одним элементом, а наличие параллельного элемента учитывается при вычислении сопротивления. По реактору и обмоткам низшего напряжения автотрансформаторов ток КЗ не протекает, поэтому на схеме замещения они отсутствуют.

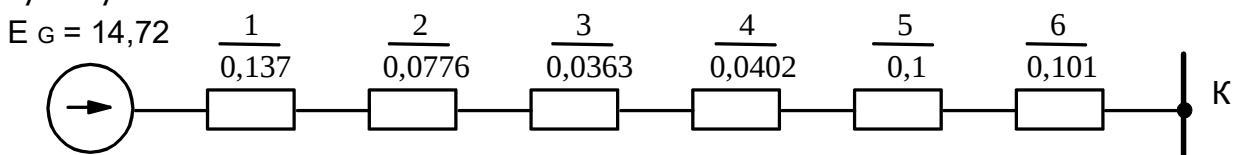


Рис.1.2. Схема замещения для энергосистемы.

В качестве основной ступени принимается та ступень, где произошло КЗ. Напряжение на этой ступени 11 кВ.

Расчет токов КЗ в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации.

Сопротивления всех элементов и ЭДС генераторов выразим в именованных единицах.

Сопротивление генератора, приведенное к его номинальным параметрам

$$x_G = x_d'' \frac{U_i^2 \cos \varphi}{P_i} = 0,183 \frac{10,5^2 \cdot 0,85}{100} = 0,171 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух генераторов, приведенное к ОС

$$x_1 = \frac{x_G}{2} \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = \frac{0,171}{2} \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 0,137 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора Т1, приведенное к обмотке низкого напряжения

$$x_{T1} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{S_i} = \frac{11}{100} \frac{10,5^2}{125} = 0,097 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух трансформаторов Т1, приведенное к ОС

$$x_2 = \frac{x_{T1}}{2} \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = \frac{0,097}{2} \left(\frac{242}{10,5} \right)^2 \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 0,0776 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одной цепи двухцепной линии Л1

$$x_{\tilde{e}1} = \tilde{\alpha}_{\tilde{n}\tilde{a}} \cdot l = 0,4 \cdot 60 = 24 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двухцепной линии Л1, приведенное к ОС

$$x_3 = \frac{x_{\tilde{e}1}}{2} \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = \frac{24}{2} \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 0,0363 \text{ Ом.}$$

Сопротивление автотрансформатора, приведенное к обмотке высокого напряжения

$$x_{AT} = \frac{U_{k\tilde{A}\tilde{N}\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{S_i} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{200} = 26,62 \text{ Ом.}$$

Сопротивление двух автотрансформаторов, приведенное к ОС,

$$x_4 = \frac{x_{AT}}{2} \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = \frac{26,62}{2} \left(\frac{121}{220} \right)^2 \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 0,0402 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одноцепной линии Л2

$$x_{\tilde{e}2} = \tilde{\alpha}_{\tilde{n}\tilde{a}} \cdot l = 0,4 \cdot 25 = 10 \text{ Ом.}$$

Сопротивление одноцепной линии Л2, приведенное к ОС,

$$x_5 = x_{\tilde{e}1} \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 10 \cdot \left(\frac{11}{110} \right)^2 = 0,1 \text{ Ом.}$$

Сопротивление трансформатора Т2, приведенное к обмотке низкого напряжения, т.е. к ОС

$$x_6 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{S_i} = \frac{10,5}{100} \frac{11^2}{125} = 0,101 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,492 \text{ Ом.}$$

ЭДС генератора в относительных номинальных единицах

$$\begin{aligned} A_{G*1}'' &= \sqrt{(U_{*1} \cos \varphi_1)^2 + (U_{*1} \sin \varphi_1 + I_{*1} x_d'')^2} = \\ &= \sqrt{1 \cdot 0,85^2 + (1 \cdot 0,527 + 1 \cdot 0,183)^2} = 1,107. \end{aligned}$$

ЭДС генератора в именованных единицах

$$E_{G1}'' = E_{G*1}'' U_1 = 1,107 \cdot 10,5 = 11,62 \text{ кВ.}$$

ЭДС генератора, приведенная к ОС,

$$\overset{\circ}{E}_{G\dot{y}}'' = E_{G1}'' \left(\frac{242}{10,5} \frac{121}{220} \frac{11}{110} \right) = 11,62 \frac{242}{10,5} \frac{121}{220} \frac{11}{110} = 14,72 \text{ кВ.}$$

Сверхпереходный ток КЗ ОС

$$I_k'' = \frac{\overset{\circ}{E}_{G\dot{y}}''}{\sqrt{3} \overset{\circ}{x}_{\dot{y}}} = \frac{14,72}{\sqrt{3} \cdot 0,492} = 17,29 \text{ кА.}$$

Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации.

Выбираем базисную мощность $S_{\dot{a}} = 1000 \text{ МВА}$ и базисные напряжения ступеней. В качестве первой ступени принимается ступень, где произошло КЗ. Базисное напряжение первой ступени принимается равным действительному напряжению на этой ступени $U_{\dot{a}I} = 11 \text{ кВ}$. Относительные базисные напряжения остальных ступеней.

$$U_{\dot{a}II} = U_{\dot{a}I} \frac{110}{11} = 11 \frac{110}{11} = 110 \text{ кВ;}$$

$$U_{\dot{a}III} = U_{\dot{a}II} \frac{220}{121} = 110 \frac{220}{121} = 200 \text{ кВ;}$$

$$U_{\dot{a}IV} = U_{\dot{a}III} \frac{220}{121} = 110 \frac{10,5}{242} = 8,67 \text{ кВ.}$$

Сопротивление двух генераторов

$$x_{1*\dot{a}} = x_d'' \frac{S_{\dot{a}} \cos \varphi}{2 P_1} \left(\frac{U_1}{U_{\dot{a}IV}} \right)^2 = 0,183 \frac{1000 \cdot 0,85}{2 \cdot 100} \left(\frac{10,5}{8,67} \right)^2 = 1,14.$$

Сопротивление двух трансформаторов Т1

$$x_{2*\dot{a}} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\dot{a}}}{2 S_1} \left(\frac{U_1}{U_{\dot{a}IV}} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 125} \left(\frac{10,5}{8,67} \right)^2 = 0,65.$$

Сопротивление двухцепной линии Л1

$$x_{3*\dot{a}} = \frac{x_{\dot{a}\dot{a}} l_1}{2} \frac{S_{\dot{a}}}{U_{\dot{a}III}^2} = \frac{0,4 \cdot 60}{2} \frac{1000}{200^2} = 0,3.$$

Сопротивление обмоток В-С напряжения двух автотрансформаторов

$$x_{4*\dot{a}} = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\dot{a}}}{2 S_1} \left(\frac{U_1}{U_{\dot{a}III}} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 200} \left(\frac{220}{200} \right)^2 = 0,333.$$

Сопротивление одноцепной линии Л2

$$x_{5*á} = x_{\tilde{a}\tilde{a}} l_2 \frac{S_{á}}{U_{áII}^2} = 0,4 \cdot 25 \frac{1000}{110^2} = 0,826.$$

Сопротивление трансформатора Т2

$$x_{6*á} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{á}}{S_I} = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{125} \left(\frac{10,5}{8,67} \right)^2 = 0,84.$$

Суммарное сопротивление цепи

$$x_{\acute{y}*á} = x_{1*á} + x_{2*á} + x_{3*á} + x_{4*á} + x_{5*á} + x_{6*á} = 4,086.$$

ЭДС генератора в относительных базисных единицах

$$E''_{G*á} = \frac{E''_G}{U_{áIV}} = \frac{11,62}{8,67} = 1,34.$$

Относительный базисный ток КЗ

$$I''_{k*á} = \frac{E''_{G*á}}{x_{\acute{y}*á}} = \frac{1,34}{4,086} = 0,328.$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I''_k = I_{k*á} I_{áI} = I_{k*á} \frac{S_{á}}{\sqrt{3} U_{áI}} = 0,328 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 17,23 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ в именованных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

Действительные напряжения элементов схемы заменим средними значениями.

Сопротивления элементов схемы, приведенные к ОС

$$x_1 = x_d'' \frac{U_i^2 \cos \varphi}{2 P_i} \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,183 \frac{10,5^2 0,85}{2 \cdot 100} = 0,0857 \text{ Ом},$$

$$x_2 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{2 S_i} \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{10,5^2}{2 \cdot 125} = 0,0485 \text{ Ом},$$

$$x_3 = \frac{x_{\tilde{a}\tilde{a}} l_1}{2} \left(\frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,025 \text{ Ом},$$

$$x_4 = \frac{U_{k\hat{N}\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{2 S_i} \left(\frac{10,5}{230} \right)^2 = \frac{11}{100} \frac{230^2}{2 \cdot 125} \left(\frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,0485 \text{ Ом},$$

$$x_5 = x_{\tilde{a}\tilde{a}} l_2 \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,084 \text{ Ом},$$

$$x_6 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{S_i} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{125} = 0,0926 \text{ Ом}.$$

Суммарное сопротивление цепи, приведенное к ОС

$$x_{\acute{y}} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 0,384 \text{ Ом}.$$

ЭДС генератора, приведенная к ОС

$$E''_{G\acute{y}} = U_i \frac{10,5}{10,5} = 10,5 \text{ кВ}.$$

Сверхпереходный ток КЗ ОС

$$I_k'' = \frac{E_{G\dot{y}}''}{\sqrt{3} x_{\dot{y}}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,384} = 15,81 \text{ кА.}$$

Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

Выбираем базисную мощность $S_{\dot{a}} = 1000 \text{ МВА}$ и базисные напряжения ступеней. Базисные напряжения ступеней принимаются равным средним напряжениям на соответствующих ступенях: $U_{\dot{a}I} = 10,5 \text{ кВ}$, $U_{\dot{a}II} = 115 \text{ кВ}$; $U_{\dot{a}III} = 230 \text{ кВ}$; $U_{\dot{a}IV} = 10,5 \text{ кВ}$. Определяем относительные сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям:

$$x_{1*\dot{a}} = x_d'' \frac{S_{\dot{a}} \cos \varphi}{2 P_i} = 0,183 \frac{1000 \cdot 0,85}{2 \cdot 100} = 0,777 ;$$

$$x_{2*\dot{a}} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\dot{a}}}{2 S_i} = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 125} = 0,44 ;$$

$$x_{3*\dot{a}} = \frac{x_{\dot{a}\dot{a}} l_1}{2} \frac{S_{\dot{a}}}{U_{\dot{a}III}^2} = \frac{0,4 \cdot 60}{2} \frac{1000}{230^2} = 0,226 ;$$

$$x_{4*\dot{a}} = \frac{U_{kBC\%}}{100\%} \frac{S_{\dot{a}}}{2 S_i} = \frac{11}{100} \frac{1000}{2 \cdot 200} = 0,275 ;$$

$$x_{5*\dot{a}} = x_{\dot{a}\dot{a}} l_2 \frac{S_{\dot{a}}}{U_{\dot{a}II}^2} = 0,4 \cdot 25 \frac{1000}{115^2} = 0,756 ;$$

$$x_{6*\dot{a}} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\dot{a}}}{S_i} = \frac{10,5}{100} \frac{1000}{125} = 0,84 .$$

Суммарное сопротивление цепи

$$x_{\dot{y}*\dot{a}} = x_{1*\dot{a}} + x_{2*\dot{a}} + x_{3*\dot{a}} + x_{4*\dot{a}} + x_{5*\dot{a}} + x_{6*\dot{a}} = 3,314 .$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I_k'' = \frac{E_{*\dot{a}}''}{x_{\dot{y}*\dot{a}}} I_{\dot{a}I} = \frac{E_{*\dot{a}}''}{x_{\dot{y}*\dot{a}}} \frac{S_{\dot{a}}}{\sqrt{3} U_{\dot{a}I}} = \frac{1}{3,314} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 16,61 \text{ кА. } \triangleright$$

Практическое занятие № 2

РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ОБОБЩЕННОЙ НАГРУЗКИ

Пример 2.1. Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ для заданного участка энергосистемы (рис.2.1) при трехфазном КЗ в точке k в именованных и относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Электрические двигатели до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

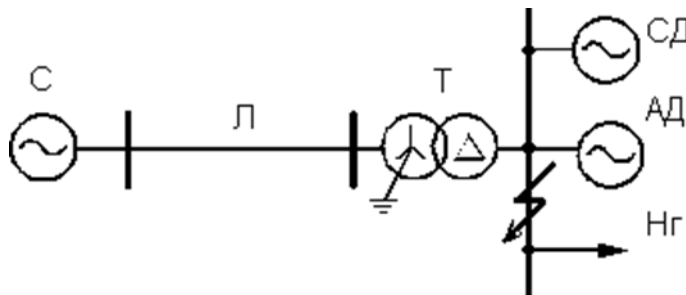


Рис.2.1. Схема участка энергосистемы

Параметры элементов системы:

- система: $S_c = 150$ МВА;
- линия Л: длина $l = 30$ км, погонное сопротивление $x_{\text{ли}} = 0,4$ Ом/км;
- трансформатор Т: ТРДЦН-60000/110: $S_t = 60$ МВА; $U_{\text{вн}} = 110$ кВ; $U_{\text{вн}} = 11$ кВ; $U_{k\%} = 11\%$;
- синхронный электродвигатель (СД): $P_{\text{н}} = 6,3$ МВт; $U_t = 6$ кВ; $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,9$; $x_d'' = 0,144$;
- асинхронный электродвигатель (АД): $P_{\text{н}} = 1,25$ МВт; $U_t = 6$ кВ; $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,905$; $k_{\text{сн}} = 6,6$;
- обобщенная нагрузка (Нг): $S_{\text{н}} = 2$ МВА; $U_t = 6,3$ кВ; $E_{\text{н}}^* = 0,85$; $\delta_{\text{н}}^* = 0,35$.

◁ Схема замещения приведена на рис.2.2.

Расчет токов КЗ в именованных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Действительные напряжения элементов схемы заменим средними. В качестве основной ступени принимается ступень напряжения 6,3 кВ – место повреждения.

Выразим сопротивления элементов схемы в именованных единицах и приведем их к основной ступени:

система

$$x_1 = \frac{U_c^2}{S_c} \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = \frac{115^2}{150} \frac{6,3^2}{115^2} = 0,265 \text{ Ом,}$$

линия

$$x_2 = x_{i\tilde{n}\tilde{a}} l \left(\frac{6,3}{115} \right)^2 = 0,036 \text{ Ом},$$

трансформатор

$$x_3 = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_i^2}{S_i} = \frac{11}{100} \frac{6,3^2}{60} = 0,073 \text{ Ом},$$

синхронный электродвигатель

$$x_4 = x_{N\tilde{A}}'' \frac{U_i^2 \cos \varphi_{N\tilde{A}}}{P_{N\tilde{A}}} = 0,144 \frac{6,3^2 0,9}{6,3} = 0,816 \text{ Ом},$$

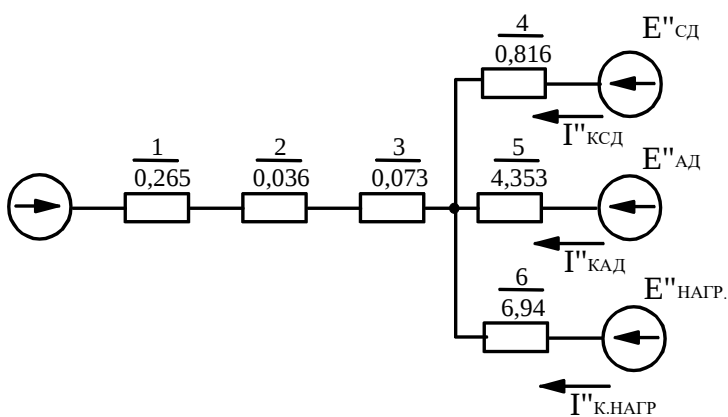
асинхронный электродвигатель

$$x_5 = x_{A\tilde{A}}'' \frac{U_i^2 \cos \varphi_{A\tilde{A}}}{P_{A\tilde{A}}} = \frac{1}{k_{i\tilde{o}\tilde{n}\tilde{e}}} \frac{U_i^2 \cos \varphi_{A\tilde{A}}}{P_{A\tilde{A}}} = \frac{1}{6,6} \frac{6,3^2 0,905}{1,25} = 4,353 \text{ Ом},$$

обобщенная нагрузка

$$x_6 = x_{i\hat{a}\tilde{a}\tilde{d}}'' \frac{U_i^2}{S_{i\hat{a}\tilde{a}\tilde{d}}} = 0,35 \frac{6,3^2}{2} = 6,94 \text{ Ом}.$$

При приближенном приведении коэффициентов трансформации ЭДС всех источ-



ников тока КЗ равны среднему номинальному напряжению ОС, - 6,3 кВ, следовательно,

$$E_{\tilde{y}}'' = 6,3 \text{ кВ}.$$

Заданная схема является радиальной, поэтому при расчете токов трехфазного КЗ, (в схеме нет элементов, по которым протекают токи от смежных ЭДС), токи отдельных ветвей вычисляются независимо.

Рис.2.2. Схема замещения участка энергосистемы

Токи в ветвях схемы:

система (для ветви системы $x_{\tilde{y}c} = x_1 + x_2 + x_3 = 0,374 \text{ Ом}$)

$$I_{kc}'' = \frac{E_{\tilde{y}}''}{\sqrt{3} x_{\tilde{y}c}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,374} = 9,736 \text{ кА},$$

синхронный электродвигатель

$$I''_{k\tilde{N}\tilde{A}} = \frac{E''_{\tilde{y}}}{\sqrt{3} x_4} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,816} = 4,46 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{k\tilde{A}\tilde{A}} = \frac{E''_{\tilde{y}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 4,353} = 0,836 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{k.\tilde{i}\tilde{a}\tilde{\delta}} = \frac{E''_{\tilde{y}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 6,94} = 0,524 \text{ кА}.$$

Полный ток в месте КЗ равен сумме токов всех присоединений

$$I''_k = 9,736 + 4,46 + 0,836 + 0,524 = 15,556 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

Выбираем базисную мощность $S_{\tilde{a}} = 1000 \text{ МВА}$ и базисные напряжения ступеней. Базисные напряжения ступеней принимаются равным средним напряжениям на соответствующих ступенях: $U_{\tilde{a}I} = 6,3 \text{ кВ}$, $U_{\tilde{a}II} = 115 \text{ кВ}$. Определяем относительные сопротивления элементов схемы, приведенные к базисным условиям:

$$x_{1*\tilde{a}} = \frac{U_c^2}{S_c} \frac{S_{\tilde{a}}}{U_{\tilde{a}II}^2} = \frac{S_{\tilde{a}}}{S_c} = \frac{1000}{150} = 6,67;$$

$$x_{2*\tilde{a}} = x_{\tilde{i}\tilde{a}} l \frac{S_{\tilde{a}}}{U_{\tilde{a}II}^2} = 0,4 \cdot 30 \frac{1000}{115^2} = 0,907;$$

$$x_{3*\tilde{a}} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\tilde{a}}}{S_f} = \frac{11}{100} \frac{1000}{60} = 1,83;$$

$$x_{4*\tilde{a}} = x''_{\tilde{N}\tilde{A}} \frac{S_{\tilde{a}} \cos \varphi_{C\tilde{A}}}{P_{\tilde{N}\tilde{A}}} = 0,144 \frac{1000 \cdot 0,9}{6,3} = 20,571;$$

$$x_{5*\tilde{a}} = x''_{\tilde{A}\tilde{A}} \frac{S_{\tilde{a}} \cos \varphi_{\tilde{A}\tilde{A}}}{P_{\tilde{A}\tilde{A}}} = \frac{1}{k_{\tilde{i}\tilde{o}\tilde{n}\tilde{e}}} \frac{S_{\tilde{a}} \cos \varphi_{\tilde{A}\tilde{A}}}{P_{\tilde{A}\tilde{A}}} = \frac{1}{6,6} \frac{1000 \cdot 0,905}{1,25} = 109,7;$$

$$x_{6*\tilde{a}} = x_{\tilde{i}\tilde{a}\tilde{\delta}*} \frac{S_{\tilde{a}}}{S_{\tilde{i}\tilde{a}\tilde{\delta}*}} = 0,35 \frac{1000}{2} = 175.$$

При приближенном приведении коэффициентов трансформации ЭДС всех источников тока КЗ равны 1.

Токи в ветвях схемы:

система (для ветви системы $x_{\tilde{y}*\tilde{a}} = x_{1*\tilde{a}} + x_{2*\tilde{a}} + x_{3*\tilde{a}} = 9,41$)

$$I''_{kc} = \frac{E''_{*\tilde{a}}}{x_{\tilde{y}*\tilde{a}}} I_{\tilde{a}I} = \frac{E''_{*\tilde{a}}}{x_{\tilde{y}*\tilde{a}}} \frac{S_{\tilde{a}}}{\sqrt{3} U_{\tilde{a}I}} = \frac{1}{9,41} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,726 \text{ кА},$$

синхронный электродвигатель

$$I''_{k\tilde{N}\tilde{A}} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{4*\dot{a}}} I_{\dot{a}I} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{4*\dot{a}}} \frac{S_{\dot{a}}}{\sqrt{3}U_{\dot{a}I}} = \frac{1}{20,571} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 4,46 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{k\tilde{A}\tilde{A}} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{5*\dot{a}}} I_{\dot{a}I} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{5*\dot{a}}} \frac{S_{\dot{a}}}{\sqrt{3}U_{\dot{a}I}} = \frac{1}{109,7} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,836 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{k.\dot{i}\dot{a}\tilde{a}\tilde{\delta}} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{6*\dot{a}}} I_{\dot{a}I} = \frac{E''_{\dot{a}}}{x_{6*\dot{a}}} \frac{S_{\dot{a}}}{\sqrt{3}U_{\dot{a}I}} = \frac{1}{175} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,524$$

Полный ток в месте КЗ равен 15,556 кА. ▷

Пример 2.2. Для схемы из примера 2.1 произвести расчет сверхпереходных токов КЗ, протекающих от синхронного двигателя, асинхронного двигателя и обобщенной нагрузки в именованных единицах с точным приведением коэффициентов трансформации при трехфазном повреждении в точке k . Электрические двигатели до возникновения повреждения и нагрузка до повреждения работали в номинальном режиме.

◁ Определим сопротивления электрических двигателей и нагрузки, приведенные к основной ступени:

$$x_4 = x''_{\tilde{N}\tilde{A}} \frac{U_i^2 \cos \varphi_{\tilde{N}\tilde{A}}}{P_{\tilde{N}\tilde{A}}} = 0,144 \frac{6^2 \cdot 0,9}{6,3} = 0,741 \text{ Ом},$$

$$x_5 = x''_{\tilde{A}\tilde{A}} \frac{U_i^2 \cos \varphi_{\tilde{A}\tilde{A}}}{P_{\tilde{A}\tilde{A}}} = \frac{1}{k_{\dot{i}\dot{o}\tilde{n}\tilde{e}}} \frac{U_i^2 \cos \varphi_{\tilde{A}\tilde{A}}}{P_{\tilde{A}\tilde{A}}} = \frac{1}{6,6} \frac{6^2 \cdot 0,905}{1,25} = 3,94 \text{ Ом},$$

$$x_6 = x_{нагр*} \frac{U_n^2}{S_{нагр}} = 0,35 \frac{6,3^2}{2} = 6,95 \text{ Ом}.$$

Определим ЭДС электрических двигателей и нагрузки в именованных единицах, приведенные к ОС:

в относительных единицах

$$E''_{CD*н} = U_{*н} + I_{*н} x''_{CD} \sin \varphi_{CD} = 1 + 1 \cdot 0,144 \cdot 0,436 = 1,063$$

в именованных -

$$\dot{E}''_{CD} = E''_{CD*н} U_n = 1,063 \cdot 6 = 6,378 \text{ кВ};$$

в относительных единицах

$$E''_{\tilde{A}\tilde{A}*i} = U_{*i} - I_{*i} x''_{\tilde{A}\tilde{A}} \sin \varphi_{\tilde{A}\tilde{A}} = 1 - 1 \cdot \frac{1}{6,6} 0,425 = 0,935,$$

в именованных -

$$\dot{E}''_{\tilde{A}\tilde{A}} = E''_{\tilde{A}\tilde{A}*i} U_i = 0,935 \cdot 6 = 5,61 \text{ кВ};$$

в именованных -

$$\dot{E}''_{нагр} = E''_{нагр*} U_n = 0,85 \cdot 6,3 = 5,355 \text{ кВ}.$$

Токи в ветвях схемы:

$$I''_{kCD} = \frac{\dot{E}''_{CD}}{\sqrt{3} x_4} = \frac{6,378}{\sqrt{3} \cdot 0,741} = 4,975 \text{ кА},$$

асинхронный электродвигатель

$$I''_{k\Delta\Delta} = \frac{\overset{\circ}{E''_{\Delta\Delta}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{5,61}{\sqrt{3} \cdot 3,94} = 0,823 \text{ кА},$$

обобщенная нагрузка

$$I''_{к.нагр} = \frac{\overset{\circ}{E''_{нагр}}}{\sqrt{3} x_5} = \frac{5,355}{\sqrt{3} \cdot 6,95} = 0,445 \text{ кА.} \quad \triangleright$$

Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И УДАРНОГО ТКЗ

Пример 3.1. Для схемы, приведенной на рис.3.1. произвести расчет токов в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации при всех видах несимметричных КЗ.

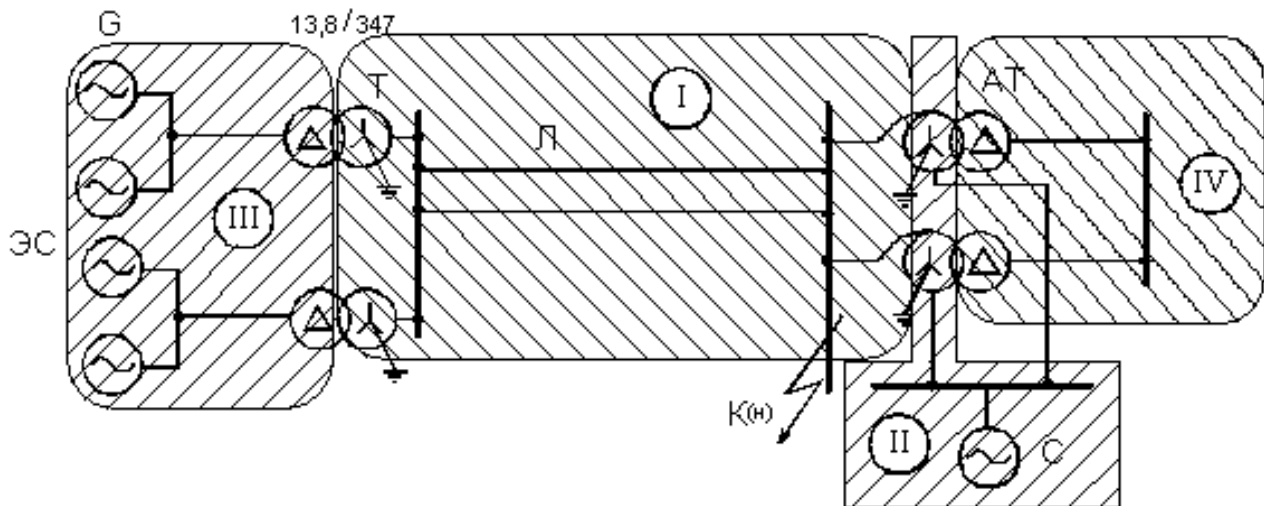


Рис. 3.1. Схема энергосистемы

Параметры элементов схемы:

- Генератор СВ1160/180-72: $S_G = 103,5$ МВА; $U_G = 13,8$ кВ; $x_d'' = 0,24$;
- Трансформатор Т: ТДЦ-250000/330: $S_T = 250$ МВА; $U_{II} = 13,8$ кВ; $U_{AI} = 347$ кВ; $U_{k\%} = 11\%$;
- Автотрансформатор АТДЦТН-240000/330/220 $S_{AT} = 240$ МВА; $U_{AI} = 330$ кВ; $U_{CI} = 220$ кВ; $U_{II} = 11,0$ кВ; $U_{k*AI} = 9,5\%$; $U_{k*AI} = 74\%$; $U_{k*CH} = 60\%$;
- Линия Л1: длина $l = 250$ км, погонное сопротивление $x_{ii\tilde{a}} = 0,32$ Ом/км, линия имеет стальные грозозащитные тросы, заземленные на каждой опоре;
- Система: $S_C = 1200$ МВА, $x_0 = 4 * x_1$

◁ Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей приведены соответственно на рис.3.2, а, б и в. Выбираем базисные условия: базисную мощность $S_{\acute{a}} = 1000$ МВА и базисные напряжения ступеней, которые принимаем равными средним напряжениям: $U_{\acute{a}I} = 340$ кВ, $U_{\acute{a}II} = 230$ кВ, $U_{\acute{a}III} = 13,8$ кВ, $U_{\acute{a}IV} = 10,5$ кВ. Сопротивления элементов схемы замещения прямой последовательности выражаем в относительных единицах и приводим к принятым базисным условиям:

$$x_{1*\acute{a}} = \frac{1}{4} x_d'' \frac{S_{\acute{a}}}{S_G} = \frac{1}{4} 0,24 \frac{1000}{103,5} = 0,579,$$

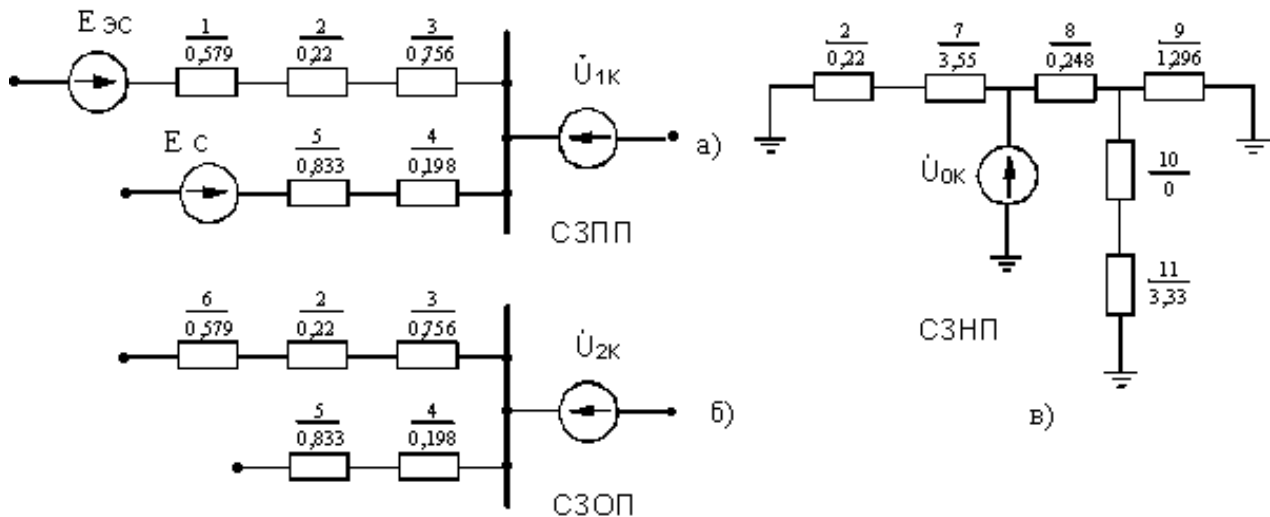


Рис. 3.2. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей энергосистемы

$$x_{2*á} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{á}}{S_f} = \frac{11}{100} \frac{1000}{250} = 0,22,$$

$$x_{3*á} = x_{\tilde{n}\tilde{a}} l \frac{S_{á}}{U_{áI}^2} = \frac{1}{2} 0,32 \cdot 250 \frac{1000}{340^2} = 0,346,$$

$$x_{4*á} = \frac{1}{2} \frac{U_{k\tilde{A}\tilde{N}\%}}{100\%} \frac{S_{á}}{S_f} = \frac{1}{2} \frac{9,5}{100} \frac{1000}{240} = 0,198,$$

$$x_{5*á} = \frac{U_c^2}{S_c} \frac{S_{á}}{U_{áII}^2} = \frac{S_{á}}{S_c} = \frac{1000}{1200} = 0,833.$$

Сворачивая схему замещения прямой последовательности найдем эквивалентное сопротивление прямой последовательности

$$x_{1\tilde{y}} = \frac{(x_1 + x_2 + x_3)(x_4 + x_5)}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5} = \frac{(0,579 + 0,22 + 0,346)(0,198 + 0,833)}{0,579 + 0,22 + 0,346 + 0,198 + 0,833} = 0,542.$$

При приближенном приведении ЭДС генератора и системы в относительных единицах равны 1, поэтому и эквивалентная ЭДС $E_{\tilde{y}*á} = 1$.

В схеме замещения обратной последовательности величина сопротивление генератора в общем случае отличается от сопротивления прямой последовательности (поэтому использован другой порядковый номер). Однако КЗ электрически удалено от генератора, поэтому будем считать сопротивление генератора обратной последовательности равным прямой. Так как все остальные элементы схем замещения прямой и обратной последовательностей одинаковы, то их эквивалентные сопротивления равны между собой $x_{2\tilde{y}} = x_{1\tilde{y}} = 0,542$.

В схеме замещения нулевой последовательности сопротивления линии и системы отличаются от сопротивлений прямой (обратной) последовательностей. Для указанной

линии $\frac{x_0}{x_1} = 4,7$, поэтому

$$x_{7*á} = 4,7 x_{3*á} = 4,7 \cdot 0,346 = 1,626.$$

В схеме замещения нулевой последовательности участвуют все обмотки автотрансформатора:

$$U_{kB\%} = \frac{1}{2}(U_{kBC\%} + U_{kBH\%} - U_{kCH\%}) = \frac{1}{2}(9,5 + 74 - 60) = 11,75 \%,$$

$$U_{kC\%} = U_{kBC\%} - U_{kB\%} = 9,5 - 11,75 = -2,25 \%,$$

$$U_{kH\%} = U_{kBH\%} - U_{kB\%} = 74 - 11,75 = 62,25 \%,$$

соответствующие им сопротивления

$$x_{8*á} = \frac{1}{2} \frac{U_{kA\%}}{100\%} \frac{S_{á}}{S_f} = \frac{1}{2} \frac{11,75}{100} \frac{1000}{240} = 0,242 ,$$

$$x_{9*á} = \frac{1}{2} \frac{U_{kH\%}}{100\%} \frac{S_{á}}{S_f} = \frac{1}{2} \frac{62,25}{100} \frac{1000}{240} = 1,296 .$$

$$x_{11*\sigma} = 4 * x_{5*\sigma} = 4 * 0,833 = 3,33$$

Так как $U_{kC\%}$ представляет собой небольшую отрицательную величину, то сопротивление $x_{10*á}$ можно принять равным нулю.

Сворачивая схему замещения нулевой последовательности, находим эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$x_{0\dot{y}} = (\tilde{o}_{2*á} + \tilde{o}_{7*á}) / ((\tilde{o}_{8*á} + \tilde{o}_{9*á} // (\tilde{o}_{10*á} + \tilde{o}_{11*á}))) = \\ = (0,22 + 1,626) / (0,248 + 1,298 // 3,33) = 0,719.$$

Используя приведенные выше формулы, вычисляем токи двухфазного, однофазного и двухфазного КЗ на землю:

$$I_k^{(2)} = I_{k*á} I_{á} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{\dot{y}*á}}{x_{1\dot{y}} + x_{2\dot{y}}} \frac{S_{á}}{\sqrt{3} U_{áI}} = \frac{\sqrt{3}}{0,542 + 0,542} \frac{1000}{\sqrt{3} 340} = 1,595 \text{ кА},$$

$$I_k^{(1)} = I_{k*á} I_{á} = \frac{3 \cdot E_{\dot{y}*á}}{x_{1\dot{y}} + x_{2\dot{y}} + x_{0\dot{y}}} \frac{S_{á}}{\sqrt{3} U_{áI}} = \frac{3}{0,542 + 0,542 + 0,719} \frac{1000}{\sqrt{3} 340} = 1,663 \text{ кА},$$

$$I_k^{(1,1)} = I_{k*á} I_{á} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\dot{y}} x_{0\dot{y}}}{x_{2\dot{y}} + x_{0\dot{y}}}} \frac{E_{\dot{y}*á}}{x_{1\dot{y}} + x_{2\dot{y}} // x_{0\dot{y}}} \frac{S_{á}}{\sqrt{3} U_{áI}} = \\ = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0,542 \cdot 0,719}{0,542 + 0,719}} \frac{1}{0,542 + 0,542 // 0,719} \frac{1000}{\sqrt{3} 340} = 1,777$$

Ток трехфазного КЗ

$$I_k^{(3)} = I_{k*á} I_{á} = \frac{E_{\dot{y}*á}}{x_{1\dot{y}}} \frac{S_{á}}{\sqrt{3} U_{áI}} = \frac{1}{0,542} \frac{1000}{\sqrt{3} 340} = 3,23 \text{ кА. } \triangleright$$

Пример 3.2. Для схемы, приведенной на рис 3.3. произвести расчет сверхпереходного и ударного токов КЗ в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации при трехфазном КЗ.

Параметры элементов схемы:

- Генератор ТВМ-300: $P_f = 300$ МВт; $U_f = 20$ кВ; $x_d'' = 0,2$; $\cos \varphi = 0,85$;
- Трансформатор Т: ТДЦ-400000/330: $S_f = 400$ МВА; $U_{ff} = 20$ кВ; $U_{Af} = 347$ кВ; $U_{k\%} = 11\%$;

- Линия Л: длина $l = 200$ км, погонное сопротивление $x_{\tilde{ii}\tilde{a}} = 0,393$ Ом/км, провод АСО-600;

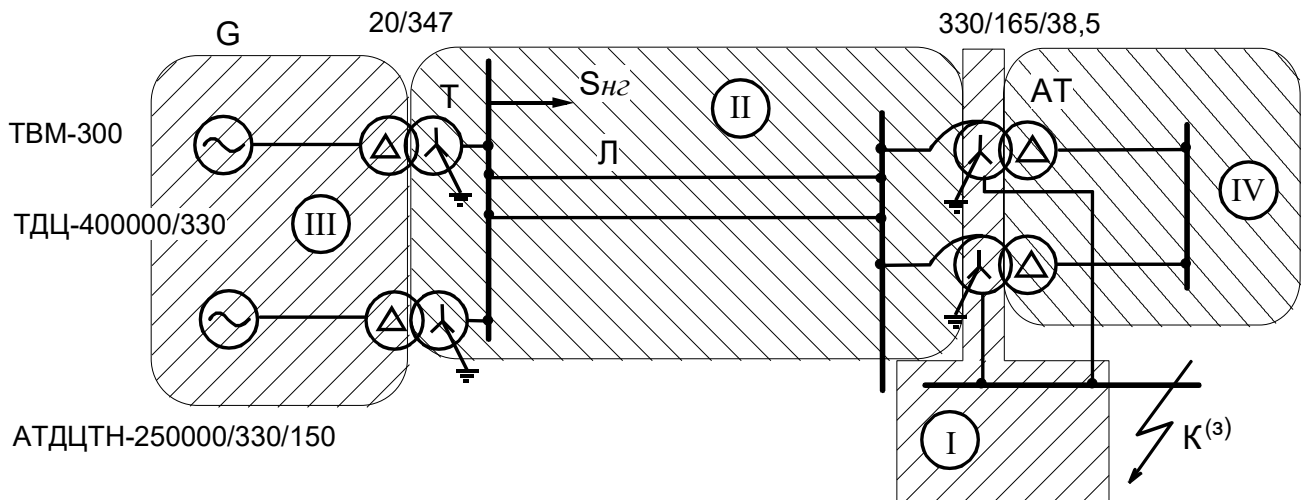


Рис.3.3. Схема участка энергосистемы.

- Автотрансформатор АТДЦТН-250000/330/150 $S_{\hat{I}} = 250$ МВА; $U_{\hat{A}\hat{I}} = 330$ кВ; $U_{C\hat{I}} = 165$ кВ; $U_{\hat{II}} = 38,5$ кВ; $U_{k*\hat{A}C} = 9,5\%$; $U_{k*\hat{A}\hat{I}} = 74\%$; $U_{k*CH} = 60\%$.

◁ Схема замещения для расчета сверхпереходного тока приведена на рис.3.4. Здесь указаны только элементы, по которым протекает ток КЗ. Сопротивление x_4 – для обмоток ВН и СН автотрансформатора.

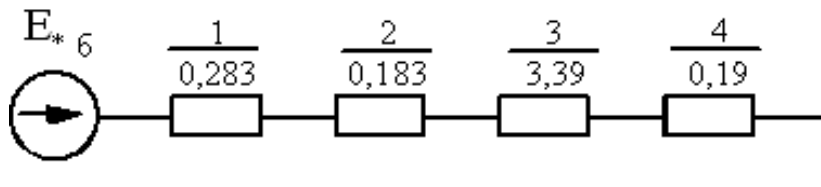


Рис.3.4. Схема замещения с индуктивными сопротивлениями.

Выбираем базисные условия: базисную мощность $S_{\hat{a}} = 1000$ МВА и базисные напряжения ступеней, которые принимаем равными средним напряжениям: $U_{\hat{aI}} = 154$ кВ, $U_{\hat{aII}} = 340$ кВ, $U_{\hat{aIII}} = 20$ кВ. При приближенном приведении ЭДС генератора в относительных единицах равна 1. Индуктивные сопротивления элементов схемы замещения выражаем в относительных единицах и приводим к принятым базисным условиям:

$$x_{1*\hat{a}} = \frac{1}{2} x_d'' \frac{S_{\hat{a}} \cos \varphi}{P_{\hat{I}}} = \frac{1}{2} 0,2 \frac{1000 \cdot 0,85}{300} = 0,283,$$

$$x_{2*\hat{a}} = \frac{1}{2} \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_{\hat{a}}}{S_{\hat{I}}} = \frac{1}{2} \frac{11}{100} \frac{1000}{400} = 0,137,$$

$$x_{3*á} = \frac{1}{2} x_{\tilde{a}\tilde{a}} l \frac{S_{\tilde{a}}}{U_{\tilde{a}II}^2} = \frac{1}{2} 0,393 \cdot 200 \frac{1000}{340^2} = 0,339,$$

$$x_{4*á} = \frac{1}{2} \frac{U_{k\tilde{a}\tilde{a}}}{100\%} \frac{S_{\tilde{a}}}{S_i} = \frac{1}{2} \frac{9,5}{100} \frac{1000}{250} = 0,19.$$

Суммарное индуктивное сопротивление цепи

$$x_{\tilde{y}*á} = x_{1*á} + x_{2*á} + x_{3*á} + x_{4*á} = 0,949.$$

Сверхпереходный ток КЗ

$$I_k'' = \frac{E_{*á}''}{x_{\tilde{y}*á}} I_{\tilde{a}I} = \frac{E_{*á}''}{x_{\tilde{y}*á}} \frac{S_{\tilde{a}}}{\sqrt{3} U_{\tilde{a}I}} = \frac{1}{0,949} \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 154} = 3,95 \text{ кА}.$$

Схема замещения для расчета активных сопротивлений схемы замещения приведена на рис. 4.7.

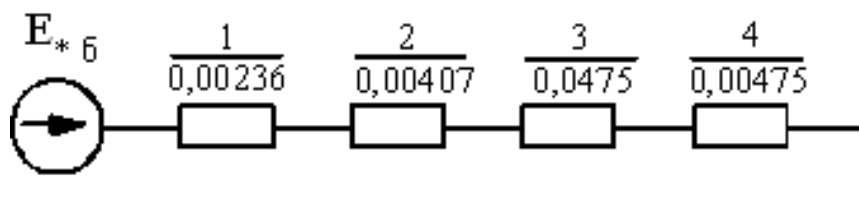


Рис.3.5. Схема замещения с активными сопротивлениями.

Определяем активные сопротивления элементов схемы замещения, приведенные к выбранным базисным условиям (отношения $\frac{X}{R}$ из табл. 4.1):

$$R_{1*á} = x_{1*á} / \left(\frac{X}{R} \right)_{\tilde{a}\tilde{a}I} = \frac{0,283}{120} = 0,00236,$$

$$R_{2*á} = x_{2*á} / \left(\frac{X}{R} \right)_{\tilde{o}\tilde{o}} = \frac{0,137}{45} = 0,003,$$

$$R_{3*á} = R_{\tilde{a}\tilde{a}} l \frac{S_{\tilde{a}}}{U_{\tilde{a}II}^2} = \frac{1}{2} 0,055 \cdot 200 \frac{1000}{340^2} = 0,00475,$$

$$R_{4*á} = x_{4*á} / \left(\frac{X}{R} \right)_{am} = \frac{0,19}{40} = 0,00475.$$

Так как активное сопротивление линии значительно превышает активные сопротивления других элементов схемы, то его расчет выполнен более точно с использованием реального значения из приложения.

Находим суммарное активное сопротивление заданного участка цепи

$$R_{\tilde{y}*á} = R_{1*á} + R_{2*á} + R_{3*á} + R_{4*á} = 0,153.$$

и эквивалентную постоянную времени

$$T_{a\tilde{y}} = \frac{X_{\tilde{y}*á}}{\omega R_{\tilde{y}*á}} = \frac{0,949}{314 \cdot 0,153} = 0,198 \frac{1}{\tilde{n}}. \quad \left(\frac{X_{\tilde{y}*á}}{R_{\tilde{y}*á}} \right) = 62,03$$

Определяем ударный коэффициент

$$k_{\tilde{o}\tilde{a}} = 1 + \exp(-0,01/T_a) = 1 + \exp(-0,01/0,198) = 1,951$$

и ударный ток

$$i_{\acute{o}\ddot{a}} = \sqrt{2} k_{\acute{o}\ddot{a}} I_k'' = \sqrt{2} \cdot 1,951 \cdot 3,95 = 10,866 \text{ кА.} \quad \triangleright$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 519 с.
2. Ульянов С.А. Сборник задач по переходным электромагнитным процессам. - М.: Энергия, 1968. – 496 с.
3. Дроздов А.Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1976. – 79 с.
4. Дроздов А.Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1977. – 75 с.
5. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электро-энергетических специальностей: Учебное пособие/ В.М. Блок, Г.К. Обушев, Л.Б. Паперно, С.А. Гусева и др. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.
6. Гармаш В.А., Подгорный Э.В. Методические указания по курсу Электромагнитные переходные процессы. - Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 39 с.
7. Цыгулев Н.И. Токи короткого замыкания в электрических системах: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 70 с.