### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

## КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики и технологии металлов

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к практическим занятиям по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Курган 2012

Кафедра: «Энергетики и технология металлов»

Дисциплина: «Переходные процессы в электроэнергетических системах» (специальность 140211)

Составил: доцент, канд. техн. наук В.И. Мошкин

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний «Конспект практических занятий» по дисциплине ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ / Сост. В.Н. СЕРЕБРЯКОВ – Саратов: Изд-во СГТУ, 2005. - 66с.

Утверждены на заседании кафедры 3 декабря 2011 г.

Рекомендованы методическим советом университета «19» октября 2012 г.

#### Практическое занятие № 1

#### Тема «Порядок составления схемы замещения и расчет параметров ее элементов. Трёхфазное короткоезамыкание (к.з.) в точке системы, питющейся от источника бесконечной мощности»

Задача 1-1. Для расчетной схемы (рис.1-1) составить схему замещения и рассчитать ее параметры в именованных и относительных единицах с точным и приближенным приведением к основной ступени напряжения. Определить начальные значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания (к.з.) поочередно в точках K - 1 и K - 2.



Рис.1-1. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

Система:  $S_c = \infty$ ; трансформаторы T-1: 63MB·A; $u_K = 10,5\%$ ; $k_{T(T1)} = 110/11$ ; T- 2: 160MB·A; $u_K = 10,5\%$ ;  $k_{T(T2)} = 242/13,8$ ; T-3: 16 MB·A; $u_K = 8\%$ ;  $k_{T(T3)} = 35/6,6$ ; AT: 120 MB·A; $u_{K-BC} = 9\%$ ;  $u_{K-BH} = 32\%$ ;  $u_{K-CH} = 18\%$ ;  $k_{AT} = 220/121/38,5$ ; реактор:  $X_P = 4\%$ ;  $U_{HOM,P} = 10$  кВ;  $I_{HOM,P} = 0,3$  кА; кабельная линия КЛ:  $X_o = 0,08$  Ом/км;  $R_o = 0,45$  Ом/км.

#### Решение

# А. Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах с точным приведением их к основной ступени напряжения.

На рис.1-2 приведена схема замещения, составленная на одну фазу (однолинейная схема замещения), с учетом следующего [1-3]:

1. Исходная расчетная схема имеет шесть номинальных ступеней напряжения (обозначены римскими цифрами).

2. В качестве основной ступени напряжения выбрана ступень с номинальным напряжением 110 кВ (выбор основной ступени напряжения произволен).

3. Удельное индуктивное сопротивление 1 км воздушных линий принято равным 0,4 Ом/км;

4. На схеме замещения все сопротивления имеют порядковые номера и числовые значения, которые записаны в форме дроби: в числителе - номер сопротивления, в знаменателе - его величина.

5. Так как по условию задачи расчета тока к.з. в точке *К* – 3 не требуется, то из схемы замещения исключена холостая ветвь, содержащая трансформатор Т-3 и линию ВЛ-3.

6. Все высоковольтные элементы расчетной схемы вводятся в схему замещения только реактивными сопротивлениями, а кабельная линия (КЛ)- активной и реактивной составляющими полного сопротивления.



Расчет величин фазной ЭДС  $E_{c\phi}$  и сопротивлений схемы замещения, приведенных к основной ступени напряжения (ступень II):

$$\overset{\circ}{E}_{C} = \frac{U_{HOM,H(T2)}}{\sqrt{3}} \cdot K_{T(T2)} \cdot K_{AT} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot \frac{242}{13,8} \cdot \frac{121}{220} = 76,8 \text{ kB}.$$

Здесь коэффициенты трансформации составлены (согласно ГОСТ Р 52735-2007 [4]) в направлении от основной ступени напряжения к той ступени, на которой находится элемент (источник ЭДС *E*<sub>c</sub>)

- 1. Сопротивление системы:  $X_1 = 0$  (так как мощность системы  $S_C = \infty$ );
- 2. Сопротивление трансформатора  $T_2$ :  $X_2 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM.B}^2}{S_{HOM}^2} \cdot K_{AT}^2 =$

$$=\frac{14}{100}\cdot\frac{242^2}{160}\cdot(\frac{121}{220})^2=15,5 \text{ Om};$$

3. Сопротивление линии ВЛ-1:  $X_3 = X_0 \cdot \ell_1 \cdot K_{AT}^2 = 0.4 \cdot 150 \cdot (\frac{121}{220})^2 = 18.2$  Ом;

4. Сопротивление обмоток автотрансформатора АТ:

Определяем напряжение короткого замыкания в процентах обмоток высшего и среднего напряжений по формулам:

$$\begin{split} & u_{K-B} = 0,5(u_{K-BH} + u_{K-BC} - u_{K-CH}) = 0,5(9 + 32 - 18) = 11,5\%; \\ & u_{K-C} = u_{K-BC} - u_{K-B} = 9 - 11,5 = -2,5\%; \end{split}$$

тогда сопротивление обмотки высшего напряжения

$$X_4 = \frac{u_{K-B}\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,C}^2}{S_{HOM}} = \frac{11.5}{100} \cdot \frac{121^2}{120} = 14 \text{ Om};$$

сопротивление обмотки среднего напряжения

$$X_5 = \frac{u_{K-C}\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,C}^2}{S_{HOM}} = \frac{-2,5\%}{100} \cdot \frac{121^2}{120} = -3 \text{ Om};$$

5. Сопротивление ВЛ-2:  $X_6 = X_0 \cdot \ell_2 = 0, 4 \cdot 60 = 24$  Ом;

6. Сопротивление трансформатора Т-1:

$$X_7 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM.B}^2}{S_{HOM}} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{110^2}{63} = 20,17 \text{ Om};$$

7. Сопротивление реактора:

$$X_8 = \frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM.P}}{\sqrt{3} \cdot I_{HOM.P}} K_{T1}^2 = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0.3} \cdot (\frac{110}{11})^2 = 77 \,\mathrm{Om};$$

8. Сопротивления кабельной линии:

$$X_9 = X_0 \cdot \ell_{K\!\!7} \cdot K_{T1}^2 = 0,08 \cdot 2,5 \cdot (\frac{110}{11})^2 = 20 \text{ Ом}; \ R_{10} = 0,45 \cdot 2,5 \cdot (\frac{110}{11})^2 = 113 \text{ Ом}.$$
  
Расчет токов к.з. в точках  $K - 1 u K - 2$ :

Точка К-1:

Суммарное сопротивление цепи к.з. до точки K-1:

 $X_{\Sigma 1} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 = 0 + 15,5 + 18,2 + 14 - 3 + 24 + 20,17 = 88,9 \text{ Om};$ 

Ток в линии ВЛ-2 при к.з. в точке K-1:  $I_{J-2} = \dot{E}_C / X_{\Sigma 1} = 76,8/88,9 = 0,864$  кА; Тогда ток к.з. в точке *K-1* (на ступени I) будет:

$$I_{K-1} = I_{J-2} \cdot K_{T1} = 0,864 \cdot 10 = 8,64 \text{ kA}.$$

**Точка** *K*-2:

Суммарное индуктивное сопротивление цепи к.з. до точки K - 2:  $X_{\Sigma,2} = X_{\Sigma,1} + X_8 + X_9 = 88,9 + 77 + 20 = 185,9$  Om;

Суммарное активное сопротивление цепи к.з. до точки К – 2 равно

$$R_{\Sigma 2} = R_{10} = 113$$
 Ом. Так как  $R_{\Sigma 2} > \frac{1}{3}X_{\Sigma 2}$ , то расчет тока к.з. следует вести с

учетом полного сопротивления цепи к.з.:  $Z_{\Sigma 2} = \sqrt{X_{\Sigma 2}^{2} + R_{\Sigma 2}^{2}} = \sqrt{185,9^{2} + 113^{2}} = 217,5$  Ом;

Ток в линии ВЛ-2 при к.з. в точке *K* – 2 :

 $I_{\mathcal{I}-2} = E_C / Z_{\Sigma 2} = 76,8 / 217,5 = 0,353$ кА; Тогда ток к.з. в точке K - 2 (на ступени I) будет:  $I_{K-2} = I_{J-2} \cdot K_{T1} = 0,353 \cdot 10 = 3,53 \text{ kA}.$ 

#### Б. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах с точным приведением их к основной ступени напряжения.

Конфигурация схемы замещения останется прежней, а параметры ее элементов рассчитываются с учетом следующего:

- в качестве основной ступени напряжения взята ступень II с номинальным напряжением 110 кВ, для которой примем базисную мощность  $S_{\rm E} = 1000 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}$  и базисное напряжение на основной ступени  $U_{\rm EII} = 115 \,{\rm kB}$ ;

- для остальных ступеней напряжения основные базисные единицы ( $S_{\mathbf{b}_i}, U_{\mathbf{b}_i}$ ) определим, исходя из следующего:

1. Базисная мощность на всех ступенях напряжения одинакова и принята равной  $S_{\rm F} = 1000 \, {\rm MB} \cdot {\rm A};$ 

2. Базисные напряжения на других ступенях будем определять с учетом фактических коэффициентов трансформации;

3. Контроль за правильностью определения соответствующего базисного напряжения проводится с учетом следующего:

a) рассчитанное значение базисного напряжения должно быть близким к значению номинального напряжения определяемой ступени;

б) при определении базисного напряжения соответствующей ступени коэффициенты трансформации составляются в направлении от определяемой ступени к основной ступени напряжения (то есть наоборот!).

Таким образом, базисные напряжения на других ступенях напряжения принимают следующие значения:

 $U_{\rm EI} = U_{\rm EII} \cdot K_{T1} = 115 \cdot (11/110) = 11,5 \ \kappa {\rm B};$  $U_{\rm EIII} = U_{\rm EII} \cdot K_{AT} = 115 \cdot (220/121) = 209 \ \kappa {\rm B};$  $U_{\rm EIV} = U_{\rm EIII} \cdot K_{T2} = 209 \cdot (13,8/242) = 11,9 \ \kappa {\rm B}.$ 

Базисный ток каждой ступени напряжения рассчитаем по формуле:

$$I_{\mathrm{b}i} = S_{\mathrm{b}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{b}i}).$$

Таким образом:  $I_{\rm BI} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 11,5) = 50$  кА;  $I_{\rm BII} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 115) = 5$  кА;  $I_{\rm BIII} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 209) = 2,75$  кА;  $I_{\rm BIV} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 11,9) = 48,3$  кА.

Расчет величин фазной ЭДС 
$$E_{C\Phi}$$
 и сопротивлений схемы замещения:  
 $E_{*C(b)} = U_{HOM,HH(T2)} / U_{BIV} = 13,8/11,9 = 1,16;$   
 $X_{1*b} = 0; X_{2*(b)} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM,B}}{U_{BIII}})^2 = \frac{14}{100} \cdot \frac{1000}{160} \cdot (\frac{242}{209})^2 = 1,173;$   
 $X_{3*b} = X_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_b}{U_{BIII}^2} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{1000}{209^2} = 1,374;$   
 $X_{4-5*b} = \frac{u_{k-BC} \%}{100} \cdot \frac{S_b}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM,B}}{U_{BIII}})^2 = \frac{9}{100} \cdot \frac{1000}{120} \cdot (\frac{220}{209})^2 = 0,831;$   
 $X_{6*b} = X_0 \cdot \ell_2 \cdot \frac{S_b}{U_{BII}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,815;$ 

$$\begin{split} X_{7*E} &= \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} \cdot \left(\frac{U_{HOM,B}}{U_{EII}}\right)^2 = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{1000}{63} \cdot \left(\frac{110}{115}\right)^2 = 1.52 ;\\ X_{8*E} &= \frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{I_{HOM,P}} \cdot \frac{I_E}{U_{EI}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{0.3} \cdot \frac{50}{11.5} = 5.8 ;\\ X_{9*E} &= X_0 \cdot \ell_{KJI} \cdot \frac{S_E}{U_{EI}^2} = 0.08 \cdot 2.5 \cdot \frac{1000}{11.5^2} = 1.51 ;\\ R_{10*E} &= R_0 \cdot \ell_{KJI} \cdot \frac{S_E}{U_{EI}^2} = 0.45 \cdot 2.5 \cdot \frac{1000}{11.5^2} = 8.51 ; \end{split}$$

Расчет токов к.з. в точках K - 1 и K - 2: **Точка** K - 1: Суммарное сопротивление цепи к.з. до точки K - 1:  $X_{\Sigma 1*5} = X_{2*5} + X_{3*5} + X_{4-5*5} + X_{6*5} + X_{7*5} =$  = 1,173 + 1,374 + 0,831 + 1,815 + 1,52 = 6,713; Относительный ток к.з.  $I_{K-1*\delta} = E_{C*\delta} / X_{\Sigma 1*\delta} = 1,16/6,713 = 0,1738$ ; Тогда ток к.з. в точке K - 1 будет:  $I_{K1} = I_{K1*5} \cdot I_{5I} = 0,1728 \cdot 50 = 8,64$  кА. **Точка** K - 2: Суммарное индуктивное сопротивление цепи к.з. до точки K - 2:  $X_{\Sigma 2*5} = X_{\Sigma 1*5} + X_{8*5} + X_{9*5} = 6,713 + 5,8 + 1,51 = 14,023$  Ом;

Суммарное активное сопротивление цепи к.з. до точки К – 2 равно

$$R_{\Sigma^{2*B}} = R_{10*B} = 8,51 > \frac{1}{3} X_{\Sigma^{2*B}}; Z_{\Sigma^{2*B}} = \sqrt{14,023^2 + 8,51^2} = 16,403.$$

Относительный ток к.з. в точке K - 2:  $I_{K2*5} = E_{C*5} / Z_{\Sigma2*5} = 1,16/16,403 = 0,0707$ ; Тогда ток к.з. в точке K - 2 будет:  $I_{K2} = I_{K2*5} \cdot I_{5I} = 0,0707 \cdot 50 = 3,53$  кА.

#### В. Расчет параметров схемы замещения в именованных единицах с приближенным приведением их к основной ступени напряжения

В этом случае вместо заданных коэффициентов трансформации используют шкалу средних номинальных напряжений (ГОСТ Р 52735-2007 [4]). Расчет величин фазной ЭДС  $E_{C\Phi}$  и сопротивлений схемы замещения, приведенных к основной ступени напряжения (ступень II):

$$\overset{\circ}{E}_{C\hat{O}} = \frac{U_{CP.II}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66,39 \text{ kB};$$

1. Сопротивление системы:  $X_1 = 0$  (так как  $S_C = \infty$ );

2. Сопротивление трансформатора  $T_2$ :  $X_2 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{CP.II}^2}{S_{HOM}} =$ 

$$=\frac{14}{100}\cdot\frac{115^2}{160}=11,57$$
 OM;

3. Сопротивление линии ВЛ-1:

 $X_3 = X_0 \cdot \ell_1 \cdot (U_{CPII} / U_{CPIII})^2 = 0,4 \cdot 150 \cdot (115/230)^2 = 15 \text{ Om};$ 

4. Сопротивление обмоток автотрансформатора АТ:

Результирующее сопротивление обмоток высшего и среднего напряжений

$$X_{4-5} = \frac{u_{K-BC}\%}{100} \cdot \frac{U_{CPII}^{2}}{S_{HOM}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{115^{2}}{120} = 9,92 \text{ Om};$$

5. Сопротивление ВЛ-2:  $X_6 = X_0 \cdot \ell_2 = 0, 4 \cdot 60 = 24$  Ом;

6. Сопротивление трансформатора Т-1:

$$X_7 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{U_{CPII}^2}{S_{HOM}^2} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{115^2}{63} = 22,04 \text{ Om}$$

7. Сопротивление реактора:

$$X_8 = \frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{\sqrt{3} \cdot I_{HOM,P}} \cdot (\frac{U_{CPII}}{U_{CPI}})^2 = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0.3} \cdot (\frac{115}{10.5})^2 = 92,34 \,\mathrm{Om};$$

8. Сопротивления кабельной линии:

$$X_{9} = X_{0} \cdot \ell_{KJI} \cdot \left(\frac{U_{CPII}}{U_{CPI}}\right)^{2} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{115}{10,5}\right)^{2} = 24 \text{ Om}$$
$$R_{10} = 0,45 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{115}{10,5}\right)^{2} = 134,95 \text{ Om}.$$

Расчет токов к.з. в точках K-1 и K-2: Точка K-1:

Суммарное сопротивление цепи к.з. до точки K-1:  $X_{\Sigma 1} = X_2 + X_3 + X_{4-5} + X_6 + X_7 = 11,57 + 15 + 9,92 + 24 + 22,04 = 82,53 \text{ Ом};$ Ток в линии ВЛ-2 при к.з. в точке K-1:

$$I_{\mathcal{I}\mathcal{I}2} = \tilde{E}_{C\Phi} / X_{\Sigma 1} = 66,39 / 82,53 = 0,804 \text{ kA};$$

Тогда ток к.з. в точке K - 1 будет:  $I_{K1} = I_{JI2} \cdot \frac{U_{CPII}}{U_{CPI}} = 0,804 \cdot \frac{115}{10,5} = 8,806$  кА.

#### **Точка** *K* – 2 :

Суммарное индуктивное сопротивление цепи к.з. до точки K - 2:  $X_{\Sigma 2} = X_{\Sigma 1} + X_8 + X_9 = 82,53 + 92,34 + 24 = 198,87$  Ом;

Суммарное активное сопротивление цепи к.з. до точки К-2 равно

 $R_{\Sigma 2} = R_{10} = 134,9$  Ом. Так как  $R_{\Sigma 2} > \frac{1}{3}X_{\Sigma 2}$ , то расчет тока к.з. следует вести с учетом полного сопротивления цепи к.з.:

 $Z_{\Sigma 2} = \sqrt{X_{\Sigma 2}^{2} + R_{\Sigma 2}^{2}} = \sqrt{198,87^{2} + 134,9^{2}} = 240,31 \text{ Ом};$ Ток в линии ВЛ-2 при к.з. в точке K - 2:  $I_{J-2} = \dot{E}_{C} / Z_{\Sigma 2} = 66,39 / 240,31 = 0,276 \text{ кA};$ Тогда ток к.з. в точке K - 2 будет:  $I_{K-2} = I_{J-2} \cdot \frac{U_{CP,-II}}{U_{CP,-I}} = 0,276 \cdot \frac{115}{10,5} = 3,02 \text{ кA}.$ 

#### Г. Расчет параметров схемы замещения в относительных единицах с приближенным приведением их к основной ступени напряжения.

Конфигурация схемы замещения останется прежней, а параметры ее элементов рассчитываются с учетом следующего:

В качестве основной ступени напряжения взята ступень II с номинальным напряжением 110 кВ, для которой примем базисную мощность  $S_{\rm E} = 1000$  MB·A и базисное напряжение  $U_{\rm EII} = U_{CPII} = 115$  кВ.

Для остальных ступеней напряжения основные базисные единицы ( $S_{\text{Б}_i}, U_{\text{Б}_i}$ ) определим, исходя из следующего:

1. Базисная мощность на всех ступенях напряжения одинакова и принята равной  $S_{\rm B} = 1000 \, {\rm MB} \cdot {\rm A};$ 

2. Базисные напряжения на всех ступенях будем определять с учетом равенства  $U_{\text{Б}i} = U_{CP.i}$ : то есть  $U_{\text{Б}I} = 10,5 \text{ кB}; U_{\text{Б}III} = 230 \text{ кB}; U_{\text{Б}IV} = 13,8 \text{ кB}.$ 

Базисный ток каждой ступени напряжения рассчитаем по формуле:

$$I_{\mathrm{E}i} = S_{\mathrm{E}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{E}i}).$$

Таким образом:  $I_{\rm EI} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 10.5) = 54,99$  кА;  $I_{\rm EII} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 115) = 5$  кА;  $I_{\rm EIII} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 230) = 2,51$  кА;  $I_{\rm EIIV} = 1000/(\sqrt{3} \cdot 13,8) = 41,84$  кА.

Расчет величин фазной ЭДС  $E_{C\Phi}$  и сопротивлений схемы замещения:  $E_{C*F} = U_{CPIV} / U_{FIV} = 13,8/13,8 = 1;$ 

$$\begin{split} X_{1*E} &= 0 \; ; \; X_{2*E} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{1000}{160} = 0,875 \; ; \\ X_{3*E} &= X_0 \cdot \ell_1 \cdot \frac{S_E}{U_{CPIII}}^2 = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,134 \; ; \\ X_{4-5*E} &= \frac{u_{k-BC} \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{1000}{120} = 0,75 \; ; \\ X_{6*E} &= X_0 \cdot \ell_2 \cdot \frac{S_E}{U_{CPII}}^2 = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,815 \; ; \\ X_{7*E} &= \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,666 \; ; \\ X_{8*E} &= \frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{I_{HOM,P}} \cdot \frac{I_E}{U_{CPI}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{0,3} \cdot \frac{54,99}{10,5} = 6,98 \; ; \\ X_{9*E} &= X_0 \cdot \ell_{KII} \cdot \frac{S_E}{U_{CPI}}^2 = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 1,814 \; ; \\ R_{10*E} &= R_0 \cdot \ell_{KII} \cdot \frac{S_E}{U_{CPI}}^2 = 0,45 \cdot 2,5 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 10,2 \; . \end{split}$$

Расчет токов к.з. в точках K-1 и K-2: Точка K-1: Суммарное сопротивление цепи к.з. до точки K - 1:  $X_{\Sigma 1*E} = X_{2*E} + X_{3*E} + X_{4-5*E} + X_{6*E} + X_{7*E} =$ =0,875 + 1,134 + 0,75 + 1,815 + 1,666 = 6,24; Относительный ток к.з.  $I_{K-1*E} = E_{C*E} / X_{\Sigma 1*E} = 1/6,24 = 0,16$ ; Тогда ток к.з. в точке K - 1 будет:  $I_{K-1} = I_{K-1*E} \cdot I_{EI} = 0,16 \cdot 54,99 = 8,8$  кА. **Точка** K - 2: Суммарное индуктивное сопротивление цепи к.з. до точки K - 2:  $X_{\Sigma 2*E} = X_{\Sigma 1*E} + X_{8*E} + X_{9*E} = 6,24 + 6,98 + 1,814 = 15,034$  Ом; Суммарное активное сопротивление цепи к.з. до точки K - 2 равно  $R_{\Sigma 2*E} = R_{10*E} = 10,2 > \frac{1}{3} X_{\Sigma 2*E}; Z_{\Sigma 2*E} = \sqrt{15,034^2 + 10,2^2} = 18,168$ . Относительный ток к.з. в точке K - 2:  $I_{K-2*E} = E_{C*E} / Z_{\Sigma 2*E} = 1/18,168 = 0,055$ . Тогда ток к.з. в точке K - 2 будет:  $I_{K-2} = I_{K-2*E} \cdot I_{EI} = 0,055 \cdot 54,99 = 3,03$  кА.

Приведенный расчет показывает, что конечные результаты расчета токов к.з. не зависят от выбора системы единиц (именованные или относи- тельные).

#### Практическое занятие № 2

Тема «Расчет установившегося режима к.з. с генераторами без *АРВ* и с *АРВ* »

А) Расчет  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$  при отсутствии у источников автоматического регулирования возбуждения (APB)

Задача 2-1. Для расчетной схемы (рис.2-1)определить установившийся ток к.з.  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$ .



Рис.2-1. Расчетная схема электропередачи

#### Исходные данные:

Система:  $S_C = \infty$ ;  $T_1 - T_3$ : 40 MB·A;  $u_k = 9\%$ ;  $P_1 - P_2$ :  $X_P = 4\%$ ;  $U_{HOM,P} = 6$  кB;  $I_{HOM,P} = 0,2$  кA; KЛ1 - KЛ2:  $X_0 = 0,08$  Ом/км;  $R_0 = 0,35$  Ом/км.

*Решение*. Составляем схему замещения (рис.2-2) и определяем параметры ее элементов с учетом следующего: расчет будем вести в относительных единицах с приближенным приведением к основной ступени напряжения.

$$U_{c} = 1 + \frac{1/0,073}{4/0,09} + \frac{5/0,699}{6/0,699} + \frac{9/1,06}{6/0,699} \times \frac{10/1,06}{6/0,699} \times \frac{10/1,06}$$

Принимаем 
$$S_{\rm E} = 40 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}; \ U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3 \,{\rm \kappa}{\rm B}.$$
  
Тогда  $I_{\rm E} = \frac{S_{\rm E}}{\sqrt{3} \cdot U_{\rm E}} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 3,67 \,{\rm \kappa}{\rm A}; \ X_1 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{40}{115^2} = 0,073;$   
 $X_2 = X_3 = X_4 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{40}{40} = 0,09;$   
 $X_5 = X_6 = \frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{U_{\rm E}} \cdot \frac{I_{\rm E}}{I_{HOM,P}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{6}{6,3} \cdot \frac{3,67}{0,2} = 0,699;$   
 $X_7 = X_8 = X_0 \cdot \ell_{k\pi} \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 0,242;$   
 $R_9 = R_{10} = R_0 \cdot \ell_{k\pi} \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,35 \cdot 3 \cdot \frac{40}{6,3^2} = 1,06.$ 

Определяем результирующие сопротивления схемы замещения:

$$X_{\Sigma} = X_1 + \frac{1}{3} \cdot X_2 + \frac{1}{2}(X_5 + X_7) = 0,073 + \frac{1}{3} \cdot 0,09 + \frac{1}{2} \cdot (0,699 + 0,242) = 0,573;$$

Так как результирующее активное сопротивление схемы замещения соизмеримо с индуктивным, то есть  $R_{\Sigma} = \frac{1}{2} \cdot R_9 = 0,53 > \frac{1}{3} X_{\Sigma}$ , то дальнейший расчет нужно вести с учетом полного сопротивления цепи к.з.:

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{X_{\Sigma}^2 + R_{\Sigma}^2} = \sqrt{0.573^2 + 0.53^2} = 0.781.$$

Относительная величина установившегося тока к.з.  $I_{k\infty*}^{(3)}$  будет:

$$I_{k\infty*}^{(3)} = \frac{U}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{0,781} = 1,28$$
, где  $U = \frac{U_{CP.CT}}{U_{E}} = \frac{115}{115} = \frac{6,3}{6,3} = 1.$ 

Следовательно, искомый ток к.з. будет равен:

$$I_{k\infty}^{(3)} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot I_{\rm B} = 1,28 \cdot 3,67 = 4,7 \text{ KA}.$$

Задача 2-2. Для расчетной схемы (рис.2-3) определить установившийся ток к.з.  $I_{k\infty}^{(3)}$ , ток генератора  $I_{\Gamma}$  и мощность короткого замыкания  $S_{k\infty}^{(3)}$ .



Рис.2-3. Расчетная схема

#### Исходные данные:

Γ: 50 MB·A; OK3 = 0,6;  $I_{f*} = 2$ ; P:  $X_P = 5\%$ ;  $U_{HOM.P} = 6$  κB;  $I_{HOM.P} = 0,5$  κA; H: 20 MB·A.

#### Решение.

Составляем схему замещения (рис.2-4) и определяем параметры ее элементов с учетом следующего: расчет будем вести в относительных единицах, пользуясь шкалой средних номинальных напряжений.

Принимаем  $S_{\rm E} = 50 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}$ ;  $U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3 \,{\rm \kappa B}$ .



По формуле для спрямленной характеристики холостого хода определим ЭДС генератора:

Упрощаем исходную схему замещения путем замены двух параллельных ветвей ( с  $E_{1*}$  и  $E_{2*}$ ) одной эквивалентной (рис.2-5):

$$\mathbf{E}_{3}=1,2\,\mathbf{H} \xrightarrow{4/1} \mathbf{2}/0,436 \neq \mathbf{K}^{(3)}$$

Рис.2-5. Преобразованная схема замещения

$$E_{3*} = \frac{E_{1*} \cdot X_3 + 0}{X_{1*} + X_{3*}} = \frac{1,8 \cdot 3}{1,5+3} = 1,2; \ X_4 = X_1 / / X_3 = \frac{1,5 \cdot 3}{1,5+3} = 1.$$

Относительный ток короткого замыкания будет:

$$I_{k\infty *}^{(3)} = E_{3*}/(X_4 + X_2) = 1,2/(1+0,436) = 0,836.$$

Установившийся ток трехфазного к.з. будет равен:

$$I_{k\infty}^{(3)} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot I_{\rm E} = 0,836 \cdot 4,58 = 3,83 \text{ kA}.$$

Для определения тока генератора при к.з. найдем величину остаточного напряжения на зажимах статора:

$$U_{OCT.*} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot X_2 = 0,836 \cdot 0,436 = 0,364.$$

Тогда ток в цепи статора генератора будет:

$$I_{\Gamma} = \frac{E_{1*} - U_{OCT.*}}{X_1} \cdot I_{\mathrm{b}} = \frac{1.8 - 0.364}{1.5} \cdot 4.58 = 4.38 \text{ KA}.$$

Так как в системе относительных единиц величина относительной полной мощности к.з. численно равна величине относительного тока к.з, то запишем:

$$S_{k\infty}^{(3)} = I_{k\infty*}^{(3)}$$
  
 $S_{\rm E} = 0,836 \cdot 50 = 41,8 \text{ MB-A.}$ 

Б) Расчет тока к.з.  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$  при наличии у источников автоматического регулирования возбуждения (АРВ)

Задача 2-3. Для расчетной схемы (рис.2-6) определить ток  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$ .



Рис.2-6. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

 $\Gamma(T\Gamma)$ : 100 MBT;  $cos\phi = 0.85$ ; OK3 = 0.73;  $I_{f.np*} = 4.2$ ;

T: 125 MB·A;  $u_k = 10,5\%$ .

#### Решение.

( **a** )

Принимаем следующие базисные условия:

$$S_{\rm E} = 100 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}; \ U_{\rm E} = U_{CP} = 115 \,\,{\rm \kappa B};$$
 тогда  $I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,502 \,\,{\rm \kappa A}.$ 

Составляем схему замещения (рис.2-7) в предположении, что генератор при к.з. будет работать в режиме предельного возбуждения, рассчитаем ЭДС генератора и сопротивления ее элементов:



Рис.2-7. Схема замещения при работе генератора в режиме РПВ

$$E_{np*} = 0,2 + K \cdot I_{f.np*} = 0,2 + 0,8 \cdot 4,2 = 3,56;$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{np.*\mathrm{b}} = \frac{E_{np.*}}{OK3 \cdot I_{f.np*}} \cdot \frac{S_\mathrm{b}}{S_{HOM}} = \frac{3,56}{0,73 \cdot 4,2} \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{100} = 0,987; \\ X_2 &= \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_\mathrm{b}}{S_{HOM}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,084; \\ X_3 &= \frac{X_0 \cdot \ell \cdot S_\mathrm{b}}{U_{CP.CT}^2} = \frac{0,4 \cdot 100 \cdot 120}{115^2} = 0,363. \end{aligned}$$

Определим фактический режим работы генератора:  $X_{BH} = X_2 + X_3 = 0,084 + 0,363 = 0,447;$  $X_1 = 0,987 = 0.206$  И и и и

$$X_{KP} = \frac{X_1}{E_{np*} - 1} = \frac{0.987}{3.56 - 1} = 0.386$$
. Имеем  $X_{kp} < X_{BH} \rightarrow$  таким образом, генератор

работает в режиме номинального напряжения (РНН).

Следовательно, искомый ток к.з. будет:

$$I_{k\infty}^{(3)} = \frac{U_{HOM.*}}{X_{BH}} \cdot I_{\rm B} = \frac{1}{0,447} \cdot 0,502 = 1,123 \text{ kA}.$$

Задача 2-4. Для расчетной схемы (рис.2-8) определить установившийся ток к.з.  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$ .



Рис.2-8. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

Генератор  $\Gamma(T\Gamma)$ : 131,25 MB·A; OK3 = 0,65;  $I_{f.np*}$  = 3,8; Реактор:  $X_P = 4\%$ ;  $U_{HOM.P} = 10$  кB;  $I_{HOM.P} = 0,5$  кA; Нагрузки: H<sub>1</sub>- 8 MB·A; H<sub>2</sub>- 10 MB·A. *Решение.* 

Принимаем следующие базисные условия:

$$S_{\rm E} = 100 \,\mathrm{MB} \cdot \mathrm{A}; \ U_{\rm E} = U_{\rm CP} = 10,5 \,\mathrm{\kappa B}; \ \mathrm{тогдa} \ I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \,\mathrm{\kappa A}.$$

Составляем схему замещения (рис.2-9) в предположении, что генератор при к.з. будет работать в режиме предельного возбуждения, рассчитаем ЭДС генератора и сопротивления ее элементов:



$$\begin{split} E_{np*} &= 0,2 + K \cdot I_{f.np*} = 0,2 + 0,8 \cdot 3,8 = 3,24; \\ X_1 &= X_{np.*\mathrm{E}} = \frac{E_{np.*}}{OK3 \cdot I_{f.np*}} \cdot \frac{S_{\mathrm{E}}}{S_{HOM}} = \frac{3,24}{0,65 \cdot 3,8} \cdot \frac{100}{131,25} = 1; \\ X_2 &= \frac{\tilde{O}_D \%}{100} \cdot \frac{U_{\hat{I}\hat{I}\hat{I}}}{U_{\mathrm{A}}} \cdot \frac{D}{I_{\hat{I}\hat{I}\hat{I}}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{10}{10,5} \cdot \frac{5,5}{0,5} = 0,42; \end{split}$$

$$X_{3} = \frac{X_{0} \cdot \ell \cdot S_{\mathrm{E}}}{U_{CP,CT}^{2}} = \frac{0.08 \cdot 2.5 \cdot 100}{10.5^{2}} = 0.18; X_{4} = X_{H*} \cdot \frac{S_{\mathrm{E}}}{S_{HOM}} = 1.2 \cdot \frac{100}{8} = 15.5 \cdot 100$$

Определим фактический режим работы генератора:

 $X_{BH} = X_2 + X_3 / X_4 = 0,42 + \frac{0,18 \cdot 15}{0,18 + 15} = 0,598$ ; критическое сопротивление  $X_{KP} = \frac{X_1}{E_{np*} - 1} = \frac{1}{3,24 - 1} = 0,446$ . Имеем  $X_{kp} < X_{BH}$ , значит, генератор работает

в режиме номинального напряжения (РНН).

Определим ток генератора при к.з.:

$$I_{\Gamma*} = \frac{U_{HOM.*}}{X_{BH}} = \frac{1}{0,598} = 1,672$$

Следовательно, искомый ток к.з. будет:

$$I_{k\infty}^{(3)} = I_{\Gamma*} \cdot \frac{X_4}{X_3 + X_4} \cdot I_{\delta} = 1,672 \cdot \frac{15}{15,18} \cdot 5,5 = 9,09 \text{ KA}.$$

Задача 2-5. Для расчетной схемы (рис.2-10) определить  $I_{\kappa,\infty}^{(3)}$  и  $S_{k\infty}^{(3)}$ .

#### Исходные данные:

 $\Gamma_1(T\Gamma)$ : 23,55 MB·A; OK3 = 0,65;  $I_{f.np*} = 4$ ;  $\Gamma_2 - \Gamma_3(T\Gamma)$ : 15 MB·A; OK3 = 0,62;  $I_{f.np*} = 3,5$ ; T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>: 16 MB·A;  $u_k = 7,5\%$ ; P:  $X_P = 5\%$ ;  $U_{HOM,P} = 6 \text{ kB}$ ;  $I_{HOM,P} = 0.5 \text{ kA}$ ; H<sub>1</sub>: 25 MB·A; H<sub>2</sub>: 9 MB·A.





#### Решение.

Задачу решаем методом последовательного приближения по определению режимов работы генераторов.

Исходя из удаленности генераторов относительно точки к.з., предварительно задаемся для генераторов  $\Gamma_2$ - $\Gamma_3$  режимом нормального напряжения (PHH), а для генератора  $\Gamma_1$ - режимом предельного возбуждения.

В соответствии с принятыми режимами генераторов составляем схему замещения (рис.2-11) и рассчитываем параметры ее элементов.



Рис.2-11. Схема замещения с учетом предварительно принятых режимов генераторов

Принимаем базисные условия: 
$$S_{\rm E} = 100$$
 MB·A;  $U_{\rm E} = 6,3$  кВ, тогда  
 $I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16$  кА.  
 $E_{1np*} = 0,2 + K \cdot I_{f.np*} = 0,2 + 0,8 \cdot 4 = 3,4$ ;  
 $X_1 = X_{np.*{\rm E}} = \frac{E_{np.*}}{OK3 \cdot I_{f.np*}} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{3,4}{0,65 \cdot 4} \cdot \frac{100}{23,5} = 5,57$ ;  
 $X_2 = X_{H*} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 1,2 \cdot \frac{100}{25} = 4,8$ ;  $X_3 = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,468$ ;  
 $X_4 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,292$ ;  $X_5 = X_3$ ;  
 $X_{\rm E} = X_{H*} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 1,2 \cdot \frac{100}{9} = 13,3$ ;  $X_7 = X_8 = 0$ , так как для генераторов  
 $\Gamma_2 - \Gamma_3$  предварительно принят режим нормального напряжения, то можно записать:  $E_4 = E_5 = U_{HOM*} = 1$ .

$$X_{9} = \frac{X_{P}\%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{U_{E}} \cdot \frac{I_{E}}{I_{HOM,P}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{6,3} \cdot \frac{9,16}{0,5} = 0,872;$$
  
$$X_{10} = X_{0} \cdot \ell_{KT} \cdot \frac{S_{E}}{U_{CP,CT}^{2}} = 0,08 \cdot 3,5 \cdot \frac{100}{6,3^{2}} = 0,705.$$

Упрощаем исходную схему (рис.2-12) замещения путем замены ее ветвей, состоящих из последовательно включенных сопротивлений, их эквивалентами:

Рис.2-12. Преобразованная схема замещения

$$\begin{split} X_{11} &= X_1 / / X_2 = \frac{5,57 \cdot 4,8}{5,57 + 4,8} = 2,58 \ ; \\ X_{12} &= X_3 + X_4 + X_5 = 0,47 + 0,292 + 0,47 = 1,232 \ ; \\ X_{13} &= X_9 + X_{10} = 0,872 + 0,705 = 1,58 \ ; \ E_6 = \frac{E_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{3,4 \cdot 4,8}{5,57 + 4,8} = 1,574 \ . \end{split}$$

Далее, заменяя ветви 11 и 12 эквивалентной ветвью и складывая ее сопротивление с сопротивлением 13, получим схему замещения (рис.2-13), приведенную к простейшему виду:

$$\stackrel{\mathbf{E}_{7}=1,184}{\overset{\mathbf{H}_{7}$$

Рис.2-13. Схема замещения, приведенная к простейшему виду

$$X_{14} = \frac{X_{11} \cdot X_{12}}{X_{11} + X_{12}} + X_{13} = \frac{2,58 \cdot 1,232}{2,58 + 1,232} + 1,58 = 2,414;$$
  
$$E_7 = \frac{E_6 \cdot X_{12} + U_{HOM} \cdot X_{11}}{X_{11} + X_{12}} = \frac{1,57 \cdot 1,232 + 1 \cdot 2,58}{1,232 + 2,58} = 1,184$$

Относительный ток к.з. будет равен:

$$I_{k\infty *}^{(3)} = E_7 / X_{14} = 1,184/2,414 = 0,49$$

Проверка правильности выбора режимов генераторов:

Остаточное напряжение на шинах генератора  $\Gamma_1$ :

 $U_{OCT_*} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot X_{13} = 0,49 \cdot 1,58 = 0,774 < U_{HOM_*}$  Следовательно, генератор Г<sub>1</sub> работает в режиме РПВ.

Ток, посылаемый в место к.з. генераторами  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_3$ , будет:

$$I_{\mathcal{B}-\mathcal{A}} = \frac{U_{HOM,*} - U_{OCT,\cdot}}{X_{12}} = \frac{1 - 0.774}{1.232} = 0.183.$$

Ток каждого генератора ( $\Gamma_2, \Gamma_3$ ):

$$I_{\Gamma 2} = 0,5(I_{B-A} + I_{Harp.2}) = 0,5(0,183 + 1/13,3) = 0,129$$
.

Найдем величину критического тока генератора  $\Gamma_2$  с целью уточнения режима его работы:

$$E_{4np*} = 0,2 + 0,8 \cdot 3,5 = 3 \ ; \ X_{7np*} = \frac{E_{4np*}}{OK3 \cdot I_{f.np*}} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM}} = \frac{3}{0,62 \cdot 3,5} \cdot \frac{100}{15} = 9,22 \ .$$

Величина критического реактивного сопротивления  $\Gamma_2$  будет:

$$X_{kp*} = \frac{X_{7np*}}{E_{4np*} - 1} = \frac{9,22}{3 - 1} = 4,61;$$

тогда критический ток  $\Gamma_2$  составит:

$$I_{kp*} = \frac{U_{HOM_*}}{X_{kp*}} = \frac{1}{4,61} = 0,217.$$

Так как критический ток генератора превышает его фактический ток, то генератор  $\Gamma_2$  ( $\Gamma_3$ ) работает в режиме номинального напряжения, что совпадает с предварительно выбранным для него режимом.

Таким образом, искомые значения тока и мощности к.з. будут:

$$I_{k\infty}^{(3)} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot I_{\rm B} = 0,49 \cdot 9,16 = 4,49 \text{ KA};$$
  
$$S_{k\infty}^{(3)} = I_{k\infty*}^{(3)} \cdot S_{\rm B} = 0,49 \cdot 100 = 49 \text{ MB·A}.$$

#### Практическое занятие № 3

#### Тема «Начальный момент внезапного нарушения режима синхронной машины. Схемы замещения в сверхпереходном режиме»

Задача 3-1. Для приведенной расчетной схемы (рис.3-1)определить сверхпереходный  $(I''_k)$ ) и ударный  $(i'^{(3)}_y)$  токи при трехфазном к.з. в точке К.



Рис.3-1. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

генератор Г : 7,5 MB·A;  $X''_d = 0,14$ ; E'' = 1,09; реактор Р:  $X_P = 5\%$ ;  $U_{HOM,P} = 6$  кB;  $I_{HOM,P} = 0,3$  кA; нагрузка Н: 2,5 MB·A.

#### Решение.

Составляем схему замещения (рис.3-2) и рассчитываем параметры ее элементов с учетом того, что нагрузка *H* участвует в токе к.з.



Рис.3-2. Схема замещения электропередачи в сверхпереходном режиме

Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 10 \, {\rm MB} \cdot {\rm A}; \ U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3 \, {\rm \kappa B},$  тогда

$$\begin{split} &I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 0,916 \,\mathrm{kA}. \\ &X_1 = X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = 0,14 \cdot \frac{10}{7,5} = 0,187 \,; \\ &X_2 = \frac{X_P \%}{100} \cdot \frac{U_{HOM,P}}{U_{\rm E}} \cdot \frac{I_{\rm E}}{I_{HOM,P}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{6,3} \cdot \frac{0,916}{0,3} = 0,145 \\ &X_3 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,08 \cdot 3 \cdot \frac{10}{6,3^2} = 0,06 \,; \, X_4 = X_{H^*}'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,35 \cdot \frac{10}{2,5} = 1,4 \,. \end{split}$$

Упрощаем исходную схему (рис.3-3) замещения путем замены ее ветви, состоящей из последовательно включенных сопротивлений, ее эквивалентом:  $X_5 = X_1 + X_2 + X_3 = 0,187 + 0,145 + 0,06 = 0,392$ .

Определим токи, посылаемые генератором и нагрузкой в место к.з. в начальный момент времени:

$$I_{\Gamma}'' = \frac{E''}{X_5} \cdot I_{\rm E} = \frac{1,09}{0,392} \cdot 0,916 = 2,55 \text{ KA}; \ I_{H}'' = \frac{E_{H}''}{X_4} \cdot I_{\rm E} = \frac{0,85}{1,4} \cdot 0,916 = 0,56 \text{ KA}.$$



Рис.3-3. Упрощенная схема замещения

Сверхпереходный ток в месте к.з. будет:  $I'' = I''_{\Gamma} + I''_{H} = 2,55 + 0,56 = 3,11 \text{ кA}.$ 

Полагая, что к моменту времени 0,01*с* после к.з. сверхпереходные токи от генератора и нагрузки практически не изменятся, определим ударный ток к.з.:  $i_y^{(3)} = \sqrt{2}(k_{y,\Gamma} \cdot I_{\Gamma}'' + k_{y,H} \cdot I_{H}'') = \sqrt{2}(1,8 \cdot 2,55 + 1 \cdot 0,56) = 7,28$  кА.

Примечание: в задаче ударный коэффициент  $k_{y,\Gamma}$  принят равным 1,8 из-за большой электрической удаленности генератора от места к.з.

Задача 3-2. Для расчетной схемы (рис.3-4) определить ударный ток  $(i_y^{(3)})$  при трехфазном к.з. в точке К.



Рис.3-4. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

трансформатор Т: 40 МВ·А; $u_k = 10,5\%$ ; кабельная линия КЛ:  $X_0 = 0,08$  Ом/км; сечение каждой жилы F = 300 мм<sup>2</sup>; материал жил – медь.

#### Решение.

Составляем схему замещения (рис.3-5) и рассчитаем параметры ее элементов.



Рис.3-5. Схема замещения электропередачи

Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 100 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}; \ U_{\rm E} = U_{CP} = 10,5 \,{\rm \kappa B},$  тогда

$$I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5.5 \text{ kA.}$$
$$X_1 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0.262 \text{ ; } X_2 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP.CT}^2} = 0.08 \cdot 3 \cdot \frac{100}{10.5^2} = 0.218.$$

По справочным данным удельное сопротивление меди составляет:

 $\rho_{yd} = 18,8$  Ом·мм<sup>2</sup>/км, следовательно, активное сопротивление кабельной линии будет:

нии будет:  

$$R_2 = \rho_{YZ} \cdot \frac{\ell}{F} \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CT}^2} = 18,8 \cdot \frac{3}{300} \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,171$$
  
 $X_{\Sigma} = X_1 + X_2 = 0,262 + 0,218 = 0,48$ ; так как  $R_{\Sigma} = R_2 = 0,171 > \frac{1}{3} X_{\Sigma}$ , следова-

тельно, расчет будем вести с учетом полного сопротивления цепи к.з.:  $Z_{\Sigma} = \sqrt{X_{\Sigma}^2 + R_{\Sigma}^2} = \sqrt{0.48^2 + 0.171^2} = 0.51.$ 

Сверхпереходный ток в начальный момент к.з. будет:

$$I_k''^{(3)} = \frac{U_H}{Z_{\Sigma}} \cdot I_{\rm B} = \frac{1}{0.51} \cdot 5.5 = 10.78 \text{ KA}$$

Так как исходные данные позволяют рассчитать ударный коэффициент  $(k_y)$ , то воспользуемся этим обстоятельством и определим постоянную времени цепи к.з.  $(T_a)$  по выражению:

$$T_a = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = \frac{X_{\Sigma}}{\omega \cdot R_{\Sigma}} = \frac{0.48}{314 \cdot 0.171} = 0.0089 \text{ c.}$$

Следовательно, величина максимального значения ударного коэффициента будет:

$$K_y = 1 + e^{-0.01/T_a} = 1 + e^{-0.01/0.0089} = 1.325$$
.

Тогда искомый ударный ток будет:  $i_y^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k''^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,325 \cdot 10,78 = 20,2$  кА.

Заметим, что в приведенном примере рассчитанная величина ударного коэффициента существенно отличается от значения  $k_y = 1,8$ , принимаемого в расчетах при отсутствии необходимых данных (по таблицам).

Задача 3-3. Для расчетной схемы (рис.3-6) определить реактивное сопротивление реактора в %, при котором ударный ток при трехфазном к.з. в точке К не превысил бы значения 20 кА.



Рис.3-6. Расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

Трансформатор Т: 16 МВ·А;  $u_k = 9\%$ ; реакторы Р<sub>1</sub>-Р<sub>2</sub>:  $U_{HOM,P} = 6$  кВ;  $I_{HOM,P} = 0,68$  кА; кабельные линии КЛ<sub>1</sub>-КЛ<sub>2</sub>:  $X_0 = 0,08$  Ом/км.

#### Решение.

Составляем схему замещения (рис.3-7) и рассчитаем параметры ее элементов.



Рис.3-7. Схема замещения электропередачи

Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 16 \, {\rm MB} \cdot {\rm A}$ ;  $U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3 \, {\rm \kappa B}$ , тогда

$$I_{\rm E} = \frac{16}{\sqrt{3} \cdot 6.3} = 1,47 \,\text{kA}. \quad X_1 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = \frac{9}{100} \cdot \frac{16}{16} = 0,09 \,;$$
$$X_4 = X_5 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,08 \cdot 2.5 \cdot \frac{16}{6.3^2} = 0,081.$$

По допустимой величине ударного тока определим значение сверхпереходного тока, принимая величину ударного коэффициента  $k_v = 1.8$ :

 $I'' = \frac{i_y}{\sqrt{2} \cdot k_y} = \frac{20}{\sqrt{2} \cdot 1.8} = 7,86$  кА, что в относительных единицах с учетом базис-

ных условий составит:  $I_{*\mathrm{F}}'' = I'' / I_\mathrm{F} = 7,86 / 1,47 = 5,35$  .

Следовательно, суммарное сопротивление цепи к.з. будет:  $X_{\Sigma} = U / I''_{*E} = X_1 + 0.5 \cdot (X_2 + X_4) = 1/5,35 = 0,187$ , откуда найдем требуемую величину сопротивления кажлого реактора:

$$X_2 = 2 \cdot X_{\Sigma} - 2 \cdot X_1 - X_4 = 2(0,187 - 0,09) - 0,081 = 0,113.$$

Тогда необходимая величина сопротивления каждого реактора в процентах составит:

$$X_P\% = \frac{X_2 \cdot 100 \cdot I_{H.P} \cdot U_{\rm E}}{I_{\rm E} \cdot U_{H.P}} = \frac{0,113 \cdot 100 \cdot 0,68 \cdot 6,3}{1,47 \cdot 6} = 5,49\%$$

По найденному значению  $X_P$ % выбираем реактор.

Задача 3-4. Для расчетной схемы (рис.3-8) определить ударный ток  $(i_y^{(3)})$  при трехфазном к.з. в точке К.



Рис.3-8. Расчетная схема электроснабжения

Исходные данные:

Генератор Г : 117,5 MB·A;  $X''_d = 0,15$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ; трансформаторы T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>: 100 MB·A;  $u_k = 10,5\%$ ;

нагрузка Н: 10 МВ·А.

#### Решение.

Составляем схему замещения (рис.3-9) и рассчитываем параметры ее элементов с учетом того, что нагрузка *H* участвует в ударном токе к.з.



Рис.3-9. Схема замещения электропередачи в сверхпереходном режиме

Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 100$  MB·A;  $U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3$  кB, тогда

$$\begin{split} &I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \,\mathrm{\kappa A}. \\ &X_1 = X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{100}{117,5} = 0,128 \,; \, X_2 = X_4 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{100} = 0,105 \,; \\ &X_3 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15 \,; X_5 = X_{H^*}'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,35 \cdot \frac{100}{10} = 3,5 \,. \end{split}$$

Принимая, что параметры генератора по осям *d* и *q* одинаковы в сверхпереходном режиме, рассчитаем в относительных единицах его ЭДС по выражению:

 $E'' = \sqrt{(U_H \cdot \cos \varphi)^2 + (U_H \cdot \sin \varphi + I_H \cdot X_d'')^2} = \sqrt{(1 \cdot 0.85)^2 + (1 \cdot 0.527 + 1 \cdot 0.15)^2} = 1.087$ , или по упрощенной формуле:

 $E'' = U_H + I_H \cdot X''_d \cdot \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0.15 \cdot 0.527 = 1.079.$ 

Заметим, что полученные значения ЭДС близки друг к другу, что нередко применяют в практических расчетах.

Упрощаем исходную схему (рис.3-10) замещения путем замены ее ветви, состоящей из последовательно включенных сопротивлений, ее эквивалентом:  $X_6 = X_1 + 2 \cdot X_2 + X_3 = 0,128 + 2 \cdot 0,105 + 0,15 = 0,488$ .

$$\mathbf{E}^{\tilde{}}=1,087} \xrightarrow{\mathbf{6}/0,488} \xrightarrow{\mathbf{7}} 5/3,5} \xrightarrow{\mathbf{7}} \mathbf{E}_{H}^{\tilde{}}=0,85$$

Рис.3-10. Упрощенная схема замещения

Определим токи, посылаемые генератором и нагрузкой в место к.з. в начальный момент времени:

$$I_{\Gamma}'' = \frac{E''}{X_6} \cdot I_{\rm b} = \frac{1,087}{0,488} \cdot 9,16 = 20,4 \text{ kA}; \ I_{H}'' = \frac{E_{H}''}{X_4} \cdot I_{\rm b} = \frac{0,85}{3,5} \cdot 9,16 = 2,22 \text{ kA}.$$

Сверхпереходный ток в месте к.з. будет:  $I'' = I_{\Gamma}'' + I_{H}'' = 20,4 + 2,22 = 22,62 \text{ кA}.$ 

Полагая, что к моменту времени 0,01 с после к.з. сверхпереходные токи от генератора и нагрузки практически не изменятся, определим ударный ток к.з.:  $i_y^{(3)} = \sqrt{2}(k_{y,\Gamma} \cdot I_{\Gamma}'' + k_{y,H} \cdot I_{H}'') = \sqrt{2}(1,8 \cdot 20,4 + 1 \cdot 2,22) = 55,1$  кА.

Задача 3-5. Для расчетной схемы (рис.3-11)определить ударный ток  $(i_y^{(3)})$  при трехфазном к.з. в точке К.

#### Исходные данные:

генератор Г : 37,5 MB·A; E'' = 1,08;  $X''_d = 0,143$ ; синхронный компенсатор СК: 5 MB·A; E'' = 1,2;  $X''_d = 0,16$ ; трансформаторы T<sub>1</sub>: 40 MB·A; $u_k = 10,5\%$ ; T<sub>2</sub>: 40 MB·A; $u_{KBC} = 11\%$ ;  $u_{KBH} = 18\%$ ; $u_{KCH} = 7\%$ ; T<sub>3</sub>: 16 MB·A; $u_k = 7,5\%$ ; нагрузки H<sub>1</sub>: 15 MB·A. H<sub>2</sub>: 15 MB·A H<sub>3</sub>: 10 MB·A.



Рис.3-11. Расчетная схема электроснабжения

#### Решение

Составляем схему замещения (рис.3-12) и рассчитываем параметры ее элементов, предварительно полагая, что все нагрузки участвуют в ударном токе к.з. Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 100 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}$ ;  $U_{\rm E} = U_{CP} = 10,5 \,{\rm kB}$ , тогда

$$\begin{split} &I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \,\mathrm{KA}. \\ &X_1 = X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = 0,143 \cdot \frac{100}{37,5} = 0,128 \,; \ X_2 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,26 \,; \\ &X_3 = X_{H^*}'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,35 \cdot \frac{100}{15} = 2,33 \,; \\ &X_4 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,4 \cdot 300 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,91 \,; \end{split}$$

Определяем для обмоток трансформатора *T*<sub>2</sub> напряжение короткого замыкания в процентах по формулам:

$$u_{KB} = 0,5(u_{KBH} + u_{KBC} - u_{KCH}) = 0,5(18 + 11 - 7) = 11\%;$$
  
 $u_{KC} = u_{KBC} - u_{KB} = 11 - 11 = 0\%;$   $u_{KH} = u_{KBH} - u_{KB} = 18 - 11 = 7\%;$ тогда

$$X_{5} = \frac{u_{KB}\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,275; X_{6} = \frac{u_{KH}\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,175;$$



Рис.3-12. Схема замещения электропередачи в сверхпереходном режиме

$$\begin{aligned} X_8 &= \frac{u_{KC}\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{0}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0 \; ; \\ X_7 &= X_3 = 2,33 \; ; \\ X_9 &= X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,292 \; ; \; \\ X_{10} &= \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,469 \; ; \\ X_{11} &= X_{H*}'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,35 \cdot \frac{100}{10} = 3,5 \; ; \\ X_{12} &= X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,16 \cdot \frac{100}{5} = 3,2 \; . \end{aligned}$$

Упрощаем исходную схему замещения и получаем схему (рис. 3-13) путем замены параллельных ветвей (1,3 и 11,12) и последовательно включенных ветвей (2,4,5 и 8,9,10) их эквивалентами:



Рис.3-13. Упрощенная схема замещения

$$\begin{split} X_{13} &= X_1 / / X_3 + X_2 + X_4 + X_5 = \frac{0,38 \cdot 2,33}{0,38 + 2,33} + 0,26 + 0,91 + 0,275 = 1,772; \\ X_{14} &= X_{11} / / X_{12} + X_8 + X_9 + X_{10} = -\frac{3,5 \cdot 3,2}{3,5 + 3,2} + 0 + 0,292 + 0,468 = 2,43; \\ E_6'' &= \frac{E_1'' \cdot X_3 + E_2'' \cdot X_1}{X_1 + X_2} = \frac{1,08 \cdot 2,33 + 0,85 \cdot 0,38}{0,38 + 2,33} = 1,048; \end{split}$$

$$E_7'' = \frac{E_5'' \cdot X_{11} + E_4'' \cdot X_{12}}{X_{11} + X_{12}} = \frac{1,2 \cdot 3,5 + 0,85 \cdot 3,2}{3,5 + 3,2} = 1,033$$

Дальнейшее упрощение приводит схему замещения к ее окончательному виду, показанному на рис.3-14.



Рис. 3-14. Дальнейшее упрощение схемы замещения

Здесь

$$E_8'' = \frac{E_6'' \cdot X_{14} + E_7'' \cdot X_{13}}{X_{13} + X_{14}} = \frac{1,048 \cdot 2,43 + 1,033 \cdot 1,772}{2,43 + 1,772} = 1,042;$$

$$X_{15} = X_{13} / X_{14} + X_6 = \frac{1,772 \cdot 2,43}{1,772 + 2,43} + 0,175 = 1,2$$

Значения токов в относительных единицах, обусловленные ЭДС  $E_8''$  и  $E_3''$ , будут:  $I_1'' = E_8'' / X_{15} = 1,042/1,2 = 0,868$ ;  $I_2'' = E_3'' / X_7 = 0,85/2,33 = 0,365$ .

Так как нагрузки  $H_1$  и  $H_3$  удалены от места к.з., то предварительно нужно определить их участие (или неучастие) в ударном токе.

Сначала уточним влияние нагрузки  $H_1$ .

Для этого, очевидно, нужно определить остаточное напряжение в точке C при к.з. в точке K. При этом остаточное напряжение в точке A будет:

$$U_{OCT,A} = I_1'' \cdot X_6 = 0,868 \cdot 0,175 = 0,152;$$

тогда ток в ветви AC будет:  $I''_{AC} = \frac{E''_6 - U_{OCT.A}}{X_{13}} = \frac{1,048 - 0,152}{1,772} = 0,506$ .

Следовательно, остаточное напряжение в точке *C* будет иметь значение:  $U_{OCT.C} = U_{OCT.A} + I''_{AC} \cdot (X_2 + X_4 + X_5) = 0,152 + 0,506 \cdot (0,26 + 0,91 + 0,275) = 0,883$ .

Заметим, что  $U_{OCT.C} > E_2'' = 0,85$ . Следовательно, нагрузка  $H_1$  не участвует в ударном токе. Аналогичную проверку выполним и для нагрузки  $H_3$ , удаленной от места к.з.

Остаточное напряжение в точке *B* будет:  $U_{OCT.B} = U_{OCT.A} + I''_{AB} \cdot (X_8 + X_9 + X_{10}) = 0,152 + (0,868 - 0,506) \cdot (0,292 + 0,468) = 0,427$ , где  $I''_{AB} = I''_1 - I''_{AC}$ .

Имеем  $U_{OCT.B} < E_4'' = 0,85$ , следовательно, и нагрузка  $H_3$  и CK участвуют в ударном токе к.3.

При этом:  $I_{CK}'' = (E_5'' - U_{OCT.B}) / X_{12} = (1, 2 - 0, 427) / 3, 2 = 0, 242;$  $I_{H3}'' = (E_4'' - U_{OCT.B}) / X_{11} = (0, 85 - 0, 427) / 3, 5 = 0, 121.$ 

Таким образом, в ударном токе к.з. принимают участие:  $I''_{\Gamma} = I''_{AC} = 0,506$ ;  $I''_{CK} = 0,242$ ;  $I''_{H3} = 0,121$ ;  $I''_{H2} = E''_{3}/X_{7} = 0,85/2,33 = 0,365$ . Ударный ток при трехфазном к.з. в точке *K* будет:  $i'_{y}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot \left[ k_{y1}(I''_{\Gamma} + I''_{CK}) + k_{y2}(I''_{H2} + I''_{H3}) \right] \cdot I_{\rm B} = \sqrt{2} \left[ 1,8 \cdot (0,506 + 0,242) + 1 \cdot (0,365 + 0,121) \right] \cdot 5,5 = 14,253$  кА.

Оценим долевое участие нагрузки Н<sub>3</sub> в общем ударном токе:

$$\frac{i_{y(H3)}}{i_{y}^{(3)}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{2} \cdot k_{y2} \cdot I_{H3}'' \cdot I_{\rm E}}{i_{y}^{(3)}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 0.121 \cdot 5.5}{14.253} \cdot 100 = 6.6\%.$$

Данный результат показывает, что при выполнении практических расчетов начального сверхпереходного тока в месте к.з. можно учитывать только те нагрузки, которые непосредственно связаны с местом к.з.

Заметим, что принятие такого упрощения в практических расчетах существенно упрощает нахождение сверхпереходного тока в месте к.з.

#### Практическое занятие № 4

#### Тема «Практические методы расчета тока трехфазного к.з. в произвольный момент времени»

Задача 4-1. Для заданной расчетной схемы (рис.4-1) рассчитать ток трехфазного к.з. в точке K в момент времени t = 2 c.

а) задачу решить тремя способами: 1)методом расчетных кривых; 2) методом типовых кривых; 3) методом спрямленных характеристик;

б) Сравнить полученные результаты расчета тремя методами и дать им оценку;в) в расчетах принять, что все генераторы типовые и имеют АРВ.



Рис.4-1. Исходная расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

генератор Г<sub>1</sub> : 75 MB·A;  $X''_d = 0,143$ ;  $K_3 = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $I_{f0*} = 2,0$ ; генератор Г<sub>2</sub> : 67,3 MB·A;  $X''_d = 0,29$ ;  $K_3 = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $I_{f0*} = 1,6$ ; трансформаторы Т<sub>1</sub>: 80 MB·A;  $u_k = 10,5\%$ ; T<sub>2</sub>: 160 MB·A;  $u_{KBC} = 11\%$ ;  $u_{KBH} = 18\%$ ;  $u_{KCH} = 6\%$ ; T<sub>3</sub>: 80 MB·A;  $u_k = 12\%$ ; нагрузки H<sub>1</sub>: 20 MB·A. H<sub>2</sub>: 100 MB·A H<sub>3</sub>: 40 MB·A. Примечание. Для генераторов приведен минимум данных, который необходим

для расчета перечисленными методами.

#### Решение.

А) Приведем решение задачи методом расчетных кривых [1-2].

Составим схему замещения (рис.4-2) и рассчитаем параметры ее элементов с учетом того, что по этому методу все удаленные от места к.з. нагрузки должны быть отброшены. При этом нагрузка  $H_3$  также не учитывается из-за того, что ее ЭДС к моменту времени к.з. 2 *c*, станет равной нулю.



Рис.4-2. Исходная схема замещения

Принимаем базисные условия:  $S_{\rm E} = 100 \,{\rm MB} \cdot {\rm A}; \ U_{\rm E} = U_{CP} = 6,3 \,{\rm \kappa B},$  тогда

$$\begin{split} &I_{\rm E} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \,\mathrm{\kappa A}; \\ &X_1 = X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = 0,143 \cdot \frac{100}{75} = 0,191; \ X_2 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0,131; \\ &X_3 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\rm E}}{U_{CP,CT}^2} = \frac{0,4}{2} \cdot 100 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,151. \end{split}$$

Определяем напряжение короткого замыкания в процентах обмоток трансформатора  $T_2$  по формулам:

$$\begin{split} & u_{KB} = 0.5(u_{KBH} + u_{KBC} - u_{KCH}) = 0.5(18 + 11 - 6) = 11.5\%; \\ & u_{KC} = u_{KBC} - u_{KB} = 11 - 11.5 = -0.5\%; u_{KH} = u_{KBH} - u_{KB} = 18 - 11.5 = 6.5\%; \\ & \text{тогда} \quad X_4 = \frac{u_{KB}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{E}}}{S_{HOM}} = \frac{11.5}{100} \cdot \frac{100}{160} = 0.072; \\ & X_5 = \frac{u_{KH}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{E}}}{S_{HOM}} = \frac{6.5}{100} \cdot \frac{100}{160} = 0.041; \\ & X_6 = \frac{u_{KC}\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{E}}}{S_{HOM}} = \frac{-0.5}{100} \cdot \frac{100}{160} = -0.003; \\ & X_7 = \frac{X_C}{Z_{\text{E}(10,5)}} = \frac{X_C \cdot S_{\text{E}}}{U_{CP,CT}^2} = \frac{0.417 \cdot 100}{10.5^2} = 0.378; \\ & X_8 = X_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_{\text{E}}}{U_{CP,CT}^2} = 0.4 \cdot 20 \cdot \frac{100}{37^2} = 0.584; X_9 = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_{\text{E}}}{S_H} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0.15; \end{split}$$

$$X_{10} = X_d'' \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = 0,29 \cdot \frac{100}{67,3} = 0,431.$$

Заметим, что в методе расчетных кривых не рассчитываются ЭДС источников и поэтому в схеме замещения (рис.4-2) каждый источник изображен кругом с точкой в его центре[2].

Упрощаем исходную схему замещения и получаем схему (рис.4-3) путем замены последовательно включенных ветвей (1,2,3,4),(5,7) и (6,8,9) их эквивалентами:



Рис.3. Упрощенная схема замещения

$$\begin{split} X_{11} &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 0, 191 + 0, 131 + 0, 151 + 0, 072 = 0, 545; \\ X_{12} &= X_5 + X_7 = 0, 041 + 0, 378 = 0, 419; \ X_{13} = X_6 + X_8 + X_9 = -0, 003 + 0, 584 + 0, 15 = 0, 731. \end{split}$$

Результирующее сопротивление верхней относительно места к.з. части схемы замещения будет:

$$X_{14} = X_{11} / X_{12} + X_{13} = \frac{0,545 \cdot 0,419}{0,545 + 0,419} + 0,731 = 0,968.$$

Суммарное сопротивление всей схемы замещения относительно места к.з.:  $X_{\Sigma}^{(3)} = X_{14} //X_{10} = \frac{0,968 \cdot 0,431}{0,968 + 0,431} = 0,298.$ 

Определим долевое участие каждого источника в общем токе к.з.с помощью коэффициентов токораспределения:

а) для генератора  $\Gamma_2$  этот коэффициент  $C_{10} = X_{\Sigma}^{(3)} / X_{10} = 0,298 / 0,431 = 0,691$ ; б) для суммарного тока от генератора  $\Gamma_1$  и системы *C* получим  $C_{13} = X_{\Sigma}^{(3)} / X_{14} = 0,298 / 0,968 = 0,308$ ; 0 545 · 0 419

в) для системы 
$$C - C_{12} = C_{13} \cdot \frac{X_{11} //X_{12}}{X_{12}} = 0,308 \cdot \frac{\frac{0,515 \cdot 0,119}{0,545 + 0,419}}{0,419} = 0,174;$$

г) для генератора  $\Gamma_1$  -  $C_{11} = C_{13} - C_{12} = 0,308 - 0,174 = 0,134$ .

Находим расчетные реактивные сопротивления для каждого источника, участвующего в общем токе к.з.:

а) для генератора 
$$\Gamma_1$$
:  $X_{PACY.(\Gamma_1)}^{(3)} = \frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{C_{11}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma_1)}}{S_{\Sigma}} = \frac{0,298}{0,134} \cdot \frac{75}{100} = 1,668;$ 

б) для генератора  $\Gamma_2$ :  $X_{PACY.(\Gamma 2)}^{(3)} = \frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{C_{10}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma 2)}}{S_{E}} = \frac{0,298}{0,691} \cdot \frac{67,3}{100} = 0,29$ ;

в) для системы 
$$C: X_{PACY.(C)}^{(3)} = \frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{C_{12}} = \frac{0,298}{0,174} = 1,713.$$

Заметим, что расчетные сопротивления генераторов оказались меньше трёх, следовательно, для определения относительных величин токов, посылаемых генераторами к месту к.з., нужно обратиться к графикам расчетных кривых.

Из графика расчетных кривых для турбогенераторов с APB и заданного момента времени 2 *с* по рассчитанному относительному сопротивлению  $X_{PACY,(\Gamma_1)}^{(3)} = 1,668$  находим для генератора  $\Gamma_1: I_{nt*(\Gamma_1)}^{(3)} = 0,65$ .

Из графика расчетных кривых для гидрогенераторов с APB[1] и заданного момента времени 2 с по рассчитанному сопротивлению

 $X^{(3)}_{\it PACY.(\Gamma2)}=0,29+0,07=0,36\,$  находим для генератора  $\Gamma_2$ :  $I^{(3)}_{\it nt*(\Gamma2)}=2,7$ .

*Примечание*. Увеличение расчетного сопротивления генератора  $\Gamma_2$  на 0,07 о.е. обусловлено тем, что на его роторе находятся демпферные обмотки.

Для системы  $C: I_{nt^*(C)}^{(3)} = U_H / X_{PACY(C)}^{(3)} = 1/1,713 = 0,584$ .

Искомый ток трехфазного к.з. в момент времени 
$$t = 2 c$$
 будет:  
 $I_{nkt}^{(3)} = I_{nt^*(\Gamma 1)}^{(3)} \cdot I_{HOM.(\Gamma 1)} + I_{nt^*(\Gamma 2)}^{(3)} \cdot I_{HOM.(\Gamma 2)} + I_{nt^*(C)}^{(3)} \cdot I_{\rm E} =$   
 $= 0,65 \cdot \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 2,7 \cdot \frac{67,3}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 0,584 \cdot 9,16 = 26,47$  кА.

#### Б) Приведем решение задачи методом типовых кривых.

Составим схему замещения (рис.4-4) и рассчитаем параметры ее элементов с учетом того, что в данном случае схема замещения и ее параметры в основном будут совпадать со схемой замещения, составленной при расчете методом расчетных кривых. Отличие будет состоять в том, что требуется ввести ЭДС источников в сверхпереходном режиме.



Рис.4-4. Исходная схема замещения

ЭДС источников в относительных единицах рассчитаем по приближенной формуле:

$$\begin{split} \overline{E_1''} &= U_{HOM} + I_{HOM} \cdot X_d'' \cdot \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0, 143 \cdot 0, 527 = 1,075; \\ \overline{E_2''} &= U_{HOM} = 1; \overline{E_3''} = = 1 + 1 \cdot 0, 29 \cdot 0, 527 = 1,153. \end{split}$$

Упрощаем исходную схему замещения и получаем схему (рис. 4-5) путем замены последовательно включенных ветвей (1,2,3,4),(5,7) и (6,8,9) их эквивалентами:



Рис.4-5. Упрощенная схема замещения

Заметим, что точка K делит схему замещения на две независимые части: цепь с генератором  $\Gamma_2$  и цепи с генератором  $\Gamma_1$ и системой C.

Определим сверхпереходный ток, посылаемый генератором Г<sub>2</sub>:

$$I_{\Gamma 2}'' = \frac{E_2''}{X_{10}} \cdot I_{\rm b} = \frac{1,153}{0,431} \cdot 9,16 = 24,505 \text{ кA},$$
  
тогда удалённость точки к.з. 
$$\frac{I_{\Gamma 2}''}{I_{HOM,\Gamma 2}} = \frac{24,505 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3}{67,3} = 3,97 \approx 4.$$

По графику для типовых кривых [1] (для момента времени t = 2c) определим степень снижения тока  $\Gamma_2$ :  $\gamma_t = 0,7$ . Тогда, ток, посылаемый генератором  $\Gamma_2$  к месту к.з. в момент времени 2c,

будет:  $I_{\Gamma 2t} = I''_{\Gamma 2} \cdot \gamma_t = 24,505 \cdot 0,7 = 17,153$  кА.

Для верхней части схемы замещения (рис.4-5) вначале определим результирующую ЭДС  $E''_{\mathcal{P}}$  и ток  $I''_{\Gamma 1-C}$ :

$$E''_{\mathcal{G}} = \frac{E''_{1} \cdot X_{12} + E''_{2} \cdot X_{11}}{X_{11} + X_{12}} = \frac{1,075 \cdot 0,419 + 1 \cdot 0,545}{0,545 + 0,419} = 1,0326;$$
  
$$I''_{\Gamma 1 - C*} = \frac{E''_{\mathcal{G}}}{X_{11} / / x_{12} + X_{13}} = \frac{1,0326}{\frac{0,545 \cdot 0,419}{0,545 + 0,419} + 0,731} = 1,067.$$

Для определения тока  $I''_{\Gamma_1}$  найдем остаточное напряжение в точке A:  $U_{OCT.A} = I''_{\Gamma_1-C} \cdot X_{13} = 1,067 \cdot 0,731 = 0,78$ ;

при этом 
$$I_{\Gamma 1}'' = \frac{E_1'' - U_{OCT.A}}{X_{11}} \cdot I_{\rm E} = \frac{1,075 - 0,78}{0,545} \cdot 9,16 = 4,958$$
 кA.

тогда удалённость точки к.з.  $\frac{I''_{\Gamma 1}}{I_{HOM,\Gamma 1}} = \frac{4,958 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3}{75} = 0,721 < 1.$ 

Следовательно, изменения во времени тока генератора  $\Gamma_1$  будут отсутствовать. Таким образом, ток  $I''_{\Gamma 1-C} = const = I''_{\Gamma 1-C*} \cdot I_{\rm E} = 1,067 \cdot 9,16 = 9,774$  кА. Искомый ток к.з. к моменту времени t = 2 c будет:  $I_{nkt}^{(3)} = I_{\Gamma 2t} + I''_{\Gamma 1-C} = 17,153 + 9,774 = 26,927$  кА.

#### В) Приведем решение задачи методом спрямленных характеристик.

Так как генератор  $\Gamma_1$  значительно электрически удален от места к.з., то для него предварительно задаемся режимом номинального напряжения. Для генератора  $\Gamma_2$  должен быть принят режим подъема возбуждения из-за наличия к.з. на шинах его статора.

Составляем схему замещения с учетом принятых режимов генераторов, нагрузок, удаленных от места к.з. (рис.4-6) и рассчитаем параметры ее элементов.

С целью использования данных предыдущих расчетов сохраним прежнюю нумерацию элементов схемы замещения. Схема, приведенная на рис.6, будет отличаться от предыдущих схем замещения учетом сопротивлений нагрузок  $H_1$  и  $H_2$  другим значением ЭДС генератора  $\Gamma_2$ .



Рис.4-6. Схема замещения с учетом принятых режимов работы генераторов

По графикам спрямленных характеристик для гидрогенераторов с APB определяем ЭДС  $E_t$  и реактивное сопротивление  $X_t$  для момента t = 2 c, с учетом тока возбуждения в исходном режиме  $I_{f0*} = 1,6$ :  $E_{t(\Gamma 2)} = 1,63$ ;  $X_t = 0,5$ . При этом сопротивления генератора  $\Gamma_2$ , нагрузок  $H_1$  и  $H_2$ , приведенные к базисным условиям, будут:

$$X_{10} = X_t \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM(\Gamma^2)}} = 0.5 \cdot \frac{100}{67.3} = 0.743; \ X_{11} = X_{H*} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM}} = 1.2 \cdot \frac{100}{20} = 6; X_{12} = 1.2 \cdot \frac{100}{100} = \frac{100$$

Тогда ток от генератора  $\Gamma_2$  в момент времени t = 2c будет равен:

$$I_{\Gamma 2} = \frac{E_{t(\Gamma 2)}}{X_{10}} \cdot I_{\delta} = \frac{1.63}{0.743} \cdot 9.16 = 20,095 \text{ kA}.$$

Определим теперь суммарный ток от генератора  $\Gamma_1$  и системы  $C(I_{\Gamma_{1-C}})$  для заданного момента времени *t* с учетом предварительно принятого режима работы генератора  $\Gamma_1$  (*PHH*).

Для этого упростим верхнюю часть исходной схемы замещения относительно места к.з. (рис.4-7).

$$\begin{split} X_{13} &= X_2 + X_3 + X_4 = 0,131 + 0,151 + 0,072 = 0,354; \\ X_{14} &= X_6 + X_8 + X_9 = -0,003 + 0,584 + 0,15 = 0,731; \\ X_{15} &= X_5 + X_7 \, // \, X_{12} = 0,041 + \frac{0,378 \cdot 1,2}{0,378 + 1,2} = 0,328; \end{split}$$



Рис.4-7. Упрощение верхней части исходной схемы замещения

$$E_6 = \frac{E_2 \cdot X_{12} + E_5 \cdot X_7}{X_7 + X_{12}} = \frac{1 \cdot 1, 2 + 0}{1, 2 + 0, 378} = 0,76$$

Заменяя две параллельные ветви ( $X_{13}$  с  $U_H$  и  $X_{15}$  с  $E_6$ ) эквивалентной и учитывая сопротивление  $X_{14}$ , получим:

$$\begin{split} X_{16} &= X_{13} \, / / \, X_{15} + X_{14} = \frac{0,354 \cdot 0,328}{0,354 + 0,328} + 0,731 = 0,901 \, ; \\ E_7 &= \frac{U_H \cdot X_{15} + E_6 \cdot X_{13}}{X_{13} + X_{15}} = \frac{1 \cdot 0,328 + 0,76 \cdot 0,354}{0,354 + 0,328} = 0,875 \, . \end{split}$$

Следовательно, суммарный ток  $I_{\Gamma_{1-C}}$  в относительных единицах будет равен:  $I_{\Gamma_{1-C}} = E_7 / X_{16} = 0,875 / 0,901 = 0,971$ .

Остаточное относительное напряжение в точке A будет равно:  $U_{OCT.A} = I_{\Gamma 1-C} \cdot X_{14} = 0,971 \cdot 0,731 = 0,71$ .

Ток, посылаемый генератором Г<sub>1</sub> к месту к.з., равен:

$$I_{B-A} = \frac{U_H - U_{OCT.A}}{X_{13}} = \frac{1 - 0.71}{0.354} = 0.819$$

Ток генератора  $\Gamma_1$  с учетом нагрузки  $H_1$  будет:

 $I_{\Gamma 1} = I_{B-A} + U_H / X_{11} = 0,819 + 1/6 = 0,986$ .

#### Проверка режима работы генератора Г<sub>1</sub>

По графику [1-2] спрямленных характеристик (турбогенераторы с APB) для момента времени t = 2c ( $I_{f0*} = 2$ ) определяем для генератора  $\Gamma_1$ :

$$E_{t(\Gamma 1)} = 1,83$$
;  $X_{t(\Gamma 1)} = 0,625$ .

Критическое сопротивление генератора  $\Gamma_1$  для момента времени t = 2 c:

$$X_{kpt(\Gamma_1)} = \frac{X_{t(\Gamma_1)} \cdot U_H}{E_{t(\Gamma_1)} - U_H} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} = \frac{0.625 \cdot 1}{1.83 - 1} \cdot \frac{100}{75} = 1,004.$$

Следовательно, критический ток  $\Gamma_1$  в момент времени t = 2c будет равен:

 $I_{\textit{kpt}(\Gamma 1)} = U_H \, / \, X_{\textit{kpt}(\Gamma 1)} = 1/1,004 = 0,996$ , что больше  $I_{\Gamma 1} = 0,986$ .

Таким образом, при трехфазном к.з. в точке *K* генератор  $\Gamma_1$  будет находиться в режиме *PHH*.

Следовательно, искомый ток трехфазного к.з. будет равен:  $I_{nkt}^{(3)} = I_{\Gamma 2} + I_{\Gamma 1 - C*} \cdot I_{\rm B} = 20,095 + 0,971 \cdot 9,16 = 28,989$  кА.

#### Оценка полученных результатов

Для оценки полученных результатов в качестве эталонного ответа принимают результаты, полученные по методу спрямленных характеристик.

Таким образом, погрешность результата расчета данного примера при использовании других методов будет равной:

а) по методу расчетных кривых –

$$\Delta I_K \% = \frac{28,989 - 26,47}{28,989} \cdot 100 = 8,69\%;$$

б) по методу типовых кривых –

 $\Delta I_K \% = \frac{28,989 - 26,927}{28,989} \cdot 100 = 7,11\%.$ 

Практическое занятие № 5

#### Тема «Параметры элементов для токов обратной и нулевой последовательности. Однократная поперечная несимметрия. Расчеты несимметричных коротких замыканий в произвольный момент времени их возникновения»

Задача 5-1.

1. Для приведенной расчетной схемы (рис.5-1): а) рассчитать токи при однофазном, двухфазном и двухфазном к.з. в точке K в момент времени 2c; б) построить векторные диаграммы фазных напряжений в точках K и M. 2. Задачу решить тремя способами: 1)методом расчетных кривых; 2) методом типовых кривых; 3) методом спрямленных характеристик;

В расчетах принять, что все генераторы имеют АРВ.

*Примечание*. С целью уменьшения объема вычислений и оценки результатов при симметричном и несимметричных к.з. в качестве исходной расчетной принята схема, рассмотренная на четвертом практическом занятии.



Рис.5-1. Исходная расчетная схема электроснабжения

#### Исходные данные:

Генераторы  $\Gamma_1$ : 75 MB·A;  $X_d'' = 0,143$ ;  $X_2 = 0,15$ ;  $K_3 = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $I_{f0*} = 2,0$ ;  $\Gamma_2$ : 67,3 MB·A;  $X_d'' = 0,29$ ;  $X_2 = 0,35$ ;  $X_0 = 0,06$ ;  $K_3 = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ;  $I_{f0*} = 1,6$ ; трансформаторы  $T_1$ : 80 MB·A;  $u_k = 10,5\%$ ;  $T_2$ : 160 MB·A;  $u_{KBC} = 11\%$ ;  $u_{KBH} = 18\%$ ;  $u_{KCH} = 6\%$ ;  $T_3$ : 80 MB·A;  $u_k = 12\%$ ; нагрузки  $H_1$ : 20 MB·A;  $H_2$ : 100 MB·A;  $H_3$ : 40 MB·A.

*Примечание*. Для генераторов приведен минимум данных, который необходим для расчета несимметричных режимов перечисленными методами.

#### Решение.

Известно, что для расчета всех видов несимметричного к.з. необходимо составить три схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Следует иметь в виду, что все временные факторы и особенности каждого метода расчета отражаются только в схеме замещения прямой последовательности. Параметры элементов схем замещения обратной и нулевой последовательностей постоянны, не зависят от рассматриваемого момента времени и принятого метода расчета.

#### А) Решение задачи методом расчетных кривых

Составим схему замещения прямой последовательности для фазы *А* (рис.5-2). Так как схема замещения прямой последовательности по конфигурации и значениям параметров ее элементов индентична схеме замещения, составленной для расчета трехфазного к.з. для заданного момента времени (см. рис.4-2), то ее преобразования аналогичны тем, которые были рассмотрены ранее.

В этой связи целесообразно принять базисные условия прежними и использовать данные предыдущих расчетов (см. расчет тока трехфазного к.з. методом расчетных кривых).



Рис.5-2. Схема замещения прямой последовательности

На рис.5-3 приведена упрощенная схема замещения прямой последовательности с учетом сохранения в ней после преобразований точки  $M_1$ , где  $X_{14} = X_3 + X_4 = 0,51 + 0,072 = 0,223$ .

Из предыдущего расчета (см. практическое занятие № 4) имеем:

 $X_{1\Sigma} = X_{\Sigma}^{(3)} = 0,298$ ;  $C_{10} = 0,691; C_{11} = 0,134; C_{12} = 0,174; C_{13} = 0,308$ .



Рис.5-3. Упрощенная схема замещения прямой последовательности

Составим схему замещения обратной последовательности (рис.5-4), в которой отсутствуют ЭДС источников и должны быть учтены нагрузки.



Рис.5-4. Схема замещения обратной последовательности

$$\begin{split} X_1 &= X_2 \cdot \frac{S_{\overline{b}}}{S_H} = 0,15 \cdot \frac{100}{75} = 0,2 \ ; \ X_{10} = X_2 \cdot \frac{S_{\overline{b}}}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{100}{67,3} = 0,52 \ ; \\ X_{11} &= X_{2(HA\Gamma P)*} \cdot \frac{S_{\overline{b}}}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{100}{20} = 1,75 \ ; \ X_{12} = 0,35 \cdot \frac{100}{100} = 0,35 \ ; \ X_{13} = 0,35 \cdot \frac{100}{40} = 0,875 \ . \end{split}$$

На рис.5-5 приведена упрощенная схема замещения обратной последовательности с учетом сохранения в ней после преобразований точки  $M_2$  и показа коэффициентов распределения суммарного тока обратной последовательности  $(\dot{I}_{2\kappa})$  на пути к точке  $M_2$ .



Рис.5-5. Упрощенная схема замещения обратной последовательности  $X_{14} = X_1 / / X_{11} + X_2 = \frac{0.2 \cdot 1.75}{0.2 + 1.75} + 0.131 = 0.31$ ;  $X_{15} = X_3 + X_4 =$  = 0.151 + 0.152 = 0.223;  $X_{16} = X_{12} / / X_7 + X_5 = \frac{0.35 \cdot 0.378}{0.35 + 0.378} + 0.041 = 0.223$ ;  $X_{17} = X_6 + X_8 + X_9 = -0.003 + 0.584 + 0.15 = 0.731$ ;  $X_{18} = X_{13} / / X_{10} = \frac{0.875 \cdot 0.52}{0.875 + 0.52} = 0.326$ .

Продолжая упрощение схемы , приведенной на рис.5-5, получим:  $X_{19} = (X_{14} + X_{15}) / X_{16} = \frac{(0,31 + 0,223) \cdot 0,223}{0,31 + 0,223 + 0,223} = 0,157$ ;  $X_{20} = X_{19} + X_{17} = 0,157 + 0,731 = 0,888$ ;  $X_{21} = X_{2\Sigma} = X_{20} / X_{18} = \frac{0,888 \cdot 0,326}{0,888 + 0,326} = 0,238$ .

$$\begin{split} C_{17} &= X_{2\Sigma} \,/\, X_{20} = 0,238 \,/\, 0,888 = 0,268 \,; \\ C_{15} &= C_{17} \cdot X_{19} \,/(X_{14} + X_{15}) = 0,268 \cdot 0,157 \,/(0,31 + 0,223) = 0,079 \,. \end{split}$$

Составим схему замещения нулевой последовательности (рис.5-6)с учетом возможных путей растекания суммарного тока нулевой последовательности ( $\dot{I}_{0K}$ ) под действием фиктивного напряжения  $\dot{U}_{0K}$  в точке  $K_0$ .

Схема замещения на рис.5-6 составлена с учетом схемы соединения фазных обмоток трансформаторов, показанных на рис.5-1.

Определим значения сопротивлений элементов схемы рис.5-6:  $X_1 = X_{T1(1)} = 0,131$ ;  $X_2 = K_0 \cdot X_{BT-110(1)} = 3 \cdot 0,151 = 0,453$ ;  $X_3 = X_{B,T2(1)} = 0,072$ ;  $X_4 = X_{H,T2(1)} = 0,041$ ;  $X_5 = X_{C,T2(1)} = -0,003$ ;  $X_6 = K_0 \cdot X_{BT-35(1)} = 3,5 \cdot 0,584 = 2,04$ ;

$$\begin{split} X_7 &= X_{\mu0*} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM(T3)}} = 0,5 \cdot \frac{100}{80} = 0,625 \ ; \ X_8 = X_9 = 0,5 \cdot X_{T3(1)} = 0,5 \cdot 0,15 = 0,075 \ ; \\ X_{10} &= X_{0(\Gamma2)*} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HOM(\Gamma2)}} = 0,06 \cdot \frac{100}{67,3} = 0,089 \ ; \ X_{11} = \frac{3 \cdot X_3}{Z_{\delta(6\kappa B)}} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 100}{6,3^2} = 7,56 \ . \end{split}$$



Рис.5-6. Схема замещения нулевой последовательности

#### Примечания.

1.С целью лучшего понимания расчетов при определении параметров элементов схемы замещения нулевой последовательности в выражениях даны нижние индексы, поясняющие принадлежность соответствующего сопротивления согласно схеме рис.5-1.

2.Индекс (1) в выражениях указывает на то, что данное сопротивление взято из схемы замещения прямой последовательности.

3. В расчете принята относительная величина сопротивления цепи намагничивания для всех трансформаторов, равная  $X_{u0*} = 0.5$ .

Заменяя последовательные цепи их эквивалентами, с учетом сохранения в ней после преобразований точки  $M_0$  и показа коэффициентов распределения  $(C_9, C_{13}, C_{12})$  суммарного тока нулевой последовательности  $(\dot{I}_{0K})$  на пути к точке  $M_0$ , получим схему (рис.5-7):



Рис.5-7. Схема замещения нулевой последовательности после преобразования

$$\begin{split} X_{12} &= X_2 + X_3 = 0,453 + 0,072 = 0,525 \,; \\ X_{13} &= X_5 + X_6 + X_8 = -0,003 + 2,04 + 0,075 = 2,112 \,; \\ X_{14} &= X_{10} + X_{11} = 0,089 + 7,56 = 7,649 \,. \end{split}$$

Далее, преобразуя схему замещения нулевой последовательности, получим:  $X_{15} = (X_1 + X_2) / X_4 = \frac{(0,131 + 0,525) \cdot 0,041}{0,131 + 0,525 + 0,041} = 0,0386; X_{16} = X_{15} + X_{13} = 0,0386 + 2,112 = 2,151;$   $X_{17} = X_{16} / X_7 + X_9 = \frac{2,151 \cdot 0,625}{2,151 + 0,625} + 0,075 = 0,559;$   $X_{18} = X_{0\Sigma} = X_{17} / X_{14} = \frac{0,559 \cdot 7,649}{0,559 + 7,649} = 0,521; C_9 = X_{0\Sigma} / X_{17} = 0,521 / 0,559 = 0,932;$   $C_{13} = C_9 \cdot \frac{X_{17} - X_9}{X_{16}} = 0,932 \cdot \frac{0,559 - 0,075}{2,151} = 0,21;$   $C_{12} = C_{13} \cdot X_{15} / (X_1 + X_2) = 0,21 \cdot 0,0386 / (0,131 + 0,525) = 0,012.$ 

Таким образом, при расчете по методу расчетных кривых результирующие сопротивления в относительных единицах относительно места к.з. соответствующих схем замещения имеют следующие значения:

 $X_{1\Sigma} = 0,298$ ;  $X_{2\Sigma} = 0,238$ ;  $X_{0\Sigma} = 0,521$ .

Рассчитаем ток к.з. для каждого случая несимметрии.

1. Двухфазное короткое замыкание  $(K^{(2)})$ :

Определим расчетные сопротивления для источников при этом виде к.з.:

$$\begin{split} X^{(2)}_{PAC^{\mathcal{Y}_{.}(\Gamma_{1})}} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}}{C_{11}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma_{1})}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238}{0,134} \cdot \frac{75}{100} = 3 \; ; \\ X^{(2)}_{PAC^{\mathcal{Y}_{.}(\Gamma_{2})}} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}}{C_{10}} \cdot \frac{S_{HOM.(\Gamma_{2})}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238}{0,691} \cdot \frac{67,3}{100} = 0,522 \; ; \\ X^{(2)}_{PAC^{\mathcal{Y}_{.}(\Gamma_{2})}} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}}{C_{12}} = \frac{0,298 + 0,238}{0,174} = 3,08 \; . \end{split}$$

Определим относительную величину тока прямой последовательности каждого источника для заданного момента времени t = 2 c для :

- генератора  $\Gamma_1 - I_{1nkt(\Gamma_1)*}^{(2)} = U_{HOM*} / X_{PACY,(\Gamma_1)}^{(2)} = 1/3 = 0,333;$ 

- генератора  $\Gamma_2 - I_{1nkt(\Gamma_2)*}^{(2)} = 1,81$ - по расчетным кривым для гидрогенераторов (с учетом увеличения  $X_{PACY,(\Gamma_2)}^{(2)}$ до значения 0,522 + 0,07 = 0,592); - системы- $I_{1nkt(C)*}^{(2)} = U_{HOM*} / X_{PACY,(C)}^{(2)} = 1/3,08 = 0,325$ .

Искомый ток двухфазного к.з. в момент времени t = 2 c будет:  $I_{kt}^{(2)} = m^{(2)} \cdot (I_{1nkt(\Gamma1)*}^{(2)}I_{HOM.(\Gamma1)} + I_{1nkt(\Gamma2)*}^{(2)}I_{HOM.(\Gamma2)} + I_{1nkt(C)*}^{(2)}I_{\delta}) =$  $= \sqrt{3} \cdot (0,333 \cdot \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 1,81 \cdot \frac{67,3}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 0,325 \cdot 9,16) = 28,456 \text{ KA.}$ 

Заметим, что в нашем примере ток двухфазного к.з. оказался больше тока трехфазного к.з., что не является характерным для практики. Чаще всего ток трехфазного к.з. превышает ток двухфазного к.з. и выполняется соотношение  $X_{2\Sigma} \ge X_{1\Sigma}$ . Полученный результат можно объяснить учетом влияния на-

грузки  $H_2$  (100 MB·A), мощность которой сопоставима с номинальными мощностями источников.

2. Однофазное короткое замыкание  $(K^{(1)})$ :

Определим расчетные сопротивления для источников при этом виде к.з.:

$$\begin{split} X^{(1)}_{PAC'I,(\Gamma 1)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}{C_{11}} \cdot \frac{S_{HOM,(\Gamma 1)}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238 + 0,521}{0,134} \cdot \frac{75}{100} = 5,933 \,; \\ X^{(1)}_{PAC'I,(\Gamma 2)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}{C_{10}} \cdot \frac{S_{HOM,(\Gamma 2)}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238 + 0,521}{0,691} \cdot \frac{67,3}{100} = 1,029 \,; \\ X^{(1)}_{PAC'I,(C)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}{C_{12}} = \frac{0,298 + 0,238 + 0,521}{0,174} = 6,075 \,. \end{split}$$

Определим относительную величину тока прямой последовательности каждого источника для заданного момента времени t = 2 c для :

- генератора 
$$\Gamma_1$$
:  $I_{1nkt(\Gamma_1)*}^{(1)} = U_{HOM*} / X_{PACY.(\Gamma_1)}^{(1)} = 1/5,933 = 0,169$ ;

- генератора  $\Gamma_2$ :  $I_{1nkt(\Gamma_2)*}^{(1)} = 1,03$ - по расчетным кривым для гидрогенераторов (с учетом увеличения  $X_{PACY.(\Gamma_2)}^{(1)}$  до значения 1,029 + 0,07 = 1,099 );

- СИСТЕМЫ : 
$$I_{1nkt(C)*}^{(1)} = U_{HOM*} / X_{PACY.(C)}^{(1)} = 1/6,075 = 0,165$$

Искомый ток однофазного к.з. в момент времени t = 2 с будет:  $I_{nkt}^{(1)} = m^{(1)} \cdot (I_{1nkt(\Gamma1)*}^{(1)} I_{HOM.(\Gamma1)} + I_{1nkt(\Gamma2)*}^{(1)} I_{HOM.(\Gamma2)} + I_{1nkt(C)*}^{(1)} I_{\delta}) =$  $= 3 \cdot (0,169 \cdot \frac{75}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 1,03 \cdot \frac{67,3}{\sqrt{3} \cdot 6,3} + 0,165 \cdot 9,16) = 27,08$  кА.

3. Двухфазное короткое замыкание на землю (K<sup>(1,1)</sup>): Определим расчетные сопротивления для источников при этом виде к.з.:

$$\begin{split} X_{PACY,(\Gamma)}^{(1,1)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} / / X_{0\Sigma}}{C_{11}} \cdot \frac{S_{HOM,(\Gamma)}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238 / / 0,521}{0,134} \cdot \frac{75}{100} = 2,582 \,; \\ X_{PACY,(\Gamma2)}^{(1,1)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} / / X_{0\Sigma}}{C_{10}} \cdot \frac{S_{HOM,(\Gamma2)}}{S_{\delta}} = \frac{0,298 + 0,238 / / 0,521}{0,691} \cdot \frac{67,3}{100} = 0,449 \,; \\ X_{PACY,(C)}^{(1,1)} &= \frac{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} / / X_{0\Sigma}}{C_{12}} = \frac{0,298 + 0,238 / 0,521}{0,174} = 2,652 \,. \end{split}$$

Определим относительную величину тока прямой последовательности каждого источника для заданного момента времени t = 2 c для:

- генератора  $\Gamma_1$ :  $I_{1nkt(\Gamma_1)*}^{(1,1)} = 0,405$  - по расчетным кривым для турбогенераторов;

- генератора  $\Gamma_2$ :  $I_{1nkt(\Gamma_2)*}^{(1,1)} = 1,95$ - по расчетным кривым для гидрогенераторов (с учетом увеличения  $X_{PACY,(\Gamma_2)}^{(1,1)}$  до значения 0,449 + 0,07 = 0,519);

- системы:  $I_{1nkt(C)*}^{(1,1)} = U_{HOM*} / X_{PAC4.(C)}^{(1,1)} = 1/2,652 = 0,377$ .

Определим коэффициент (модуль)  $m^{(1,1)}$ :

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,238 \cdot 0,521}{(0,238 + 0,521)^2}} = 1,534$$

Искомый ток двухфазного к.з. на землю в момент времени t = 2 c будет:

$$I_{nkt}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot (I_{1nkt(\Gamma_1)*}^{(1,1)} I_{HOM.(\Gamma_1)} + I_{1nkt(\Gamma_2)*}^{(1,1)} I_{HOM.(\Gamma_2)} + I_{1nkt(C)*}^{(1,1)} I_{\delta}) =$$
  
= 1,534 \cdot (0,405 \cdot \frac{75}{\sqrt{3}\cdot 6,3} + 1,95 \cdot \frac{67,3}{\sqrt{3}\cdot 6,3} + 0,377 \cdot 9,16) = 28,017 \cdot KA.

#### Б) Решение задачи методом типовых кривых

Составим схему замещения прямой последовательности для фазы *А* (рис.5-8). Так как схема замещения прямой последовательности по конфигурации и значениям параметров ее элементов индентична схеме замещения, составленной для расчета трехфазного к.з. для заданного момента времени (см. рис.4-4), то ее преобразования аналогичны тем, которые были рассмотрены ранее.



Рис.5-8. Схема замещения прямой последовательности при расчете по методу типовых кривых

Упрощаем исходную схему замещения и получаем схему (рис. 5-9):



Рис.5-9. Упрощенная схема замещения прямой последовательности

Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности можно записать для суммарного сверхпереходного тока прямой последовательности:  $\dot{I}''_{1K} = \frac{\dot{E}''_{1\Sigma}}{j(X''_{1\Sigma} + X^{(n)}_{\Lambda})}$ , где значение  $X^{(n)}_{\Lambda}$  определяется в зависимости от вида к.з.

Используя данные расчета трехфазного к.з., имеем для верхней части схемы замещения рис.5-9:  $E''_{1(31)} = 1,0326$ ;  $X_{14} = 1,0326/1,067 = 0,968$ , а для нижней части:  $E''_{1(32)} = E''_{3} = 1,153$ ;  $X_{10} = 0,431$ .

Тогда ЭДС  $\dot{E}''_{1\Sigma}$  будет иметь значение:

 $\dot{E}_{1\Sigma}'' = \frac{E_{1(\Im)}'' \cdot X_{10} + E_{1(\Im)}'' \cdot X_{14}}{X_{10} + X_{14}} = \frac{1,0326 \cdot 0,431 + 1,153 \cdot 0,968}{0,431 + 0,968} = 1,116.$ 

Так как результирующие сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательностей не зависят от метода расчета, то при расчете по методу типовых кривых результирующие сопротивления в относительных единицах относительно места к.з. соответствующих схем замещения будут иметь следующие значения:

 $X_{1\Sigma} = 0,298$ ;  $X_{2\Sigma} = 0,238$ ;  $X_{0\Sigma} = 0,521$ .

Рассчитаем ток к.з. по методу типовых кривых для каждого случая несимметрии.

1. Двухфазное короткое замыкание  $(K^{(2)})$ :

Величина  $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma} = 0,238$  для данного вида к.з.

Тогда относительная величина сверхпереходного суммарного тока прямой последовательности будет равна.:  $\dot{I}_{1K*}^{\prime\prime(2)} = j1,116/j(0,298+0,238) = 2,082$ .

В именованных единицах  $\dot{I}_{1K}''^{(2)} = \dot{I}_{1K*}''^{(2)} \cdot I_{\rm E} = 2,082 \cdot 9,16 = 19,07$  кА. Из уравнения Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности

можно записать:  $\dot{U}_{1K}^{\prime\prime(2)} = \dot{E}_{1\Sigma}^{\prime\prime} - j\dot{I}_{1K}^{\prime\prime(2)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,116 - j2,082 \cdot 0,298 = j0,496$ .

Тогда сверхпереходный ток прямой последовательности генератора  $\Gamma_2$ :  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(2)} = (\dot{E}_3^{\prime\prime} - \dot{U}_{1K}^{(2)}) \cdot I_{\rm b} / jX_{10} = (j1,153 - j0,496) \cdot 9,16 / j0,431 = 13,963$  кА. При этом удаленность:  $\frac{\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(2)}}{I_{HOM,\Gamma 2}} = \frac{13,963 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3}{67,3} = 2,26$ .

По графикам для типовых кривых (для момента времени t = 2 c) определим степень снижения тока  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(2)}$ :  $\gamma_t = 0.95$ .

Тогда, ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_2$  к месту к.з. в момент времени 2 *с* будет:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)t}^{(2)} = \dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{''(2)} \cdot \gamma_t = 13,963 \cdot 0,95 = 13,26$  кА.

Так как при расчете трехфазного к.з. установлено, что суммарный ток  $\dot{I}_{\Gamma l-C}^{(3)}$  не меняется во времени, то, очевидно, ток  $\dot{I}_{l(\Gamma l-C)}^{(2)}$  также не будет меняться от времени.

Тогда ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_1$  и системой к месту к.з. в момент времени 2 *с*, будет:

$$\dot{I}_{1(\Gamma^{1}-C)}^{(2)} = \dot{I}_{1K}^{\prime\prime(2)} - \dot{I}_{1\Gamma^{1}}^{\prime\prime(2)} = 19,07 - 13,26 = 5,81 \,\mathrm{KA}.$$

Искомый ток двухфазного к.з. в момент времени t = 2c определится:

$$I_{Kt}^{(2)} = m^{(2)} \cdot (\dot{I}_{1(\Gamma^{2})t}^{(2)} + \dot{I}_{1(\Gamma^{1}-\Gamma)}^{(2)}) = \sqrt{3} \cdot (13,26+5,81) = 33,03 \text{ KA}.$$

2. Однофазное короткое замыкание (К<sup>(1)</sup>):

Для данного вида к.з. величина  $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 0,238 + 0,521 = 0,759$ .

Тогда относительная величина сверхпереходного суммарного тока прямой последовательности будет равна:  $I''_{1K*} = j1,116/j(0,298+0,238+0,521) = 1,056$ .

В именованных единицах  $\dot{I}_{1K}^{\prime\prime(1)} = \dot{I}_{1K*}^{\prime\prime(1)} \cdot I_{\rm E} = 1,056 \cdot 9,16 = 9,673$  кА.

Из второго закона Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности следует:  $\dot{U}_{1K}''^{(1)} = \dot{E}_{1\Sigma}'' - j\dot{I}_{1K}''^{(1)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,116 - j1,056 \cdot 0,298 = j0,801$ .

Тогда сверхпереходный ток прямой последовательности генератора  $\Gamma_2$  будет:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(1)} = (\dot{E}_3^{\prime\prime} - \dot{U}_{1K}^{(1)}) \cdot I_{\delta} / jX_{10} = (j1,153 - j0,801) \cdot 9,16 / j0,431 = 7,481$  кА.

При этом удалённость: 
$$\frac{\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(1)}}{I_{HOM,\Gamma 2}} = \frac{7,481 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3}{67,3} = 1,213$$

По графикам для типовых кривых (для момента времени t = 2c) определим степень изменения тока  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(1)}$ :  $\gamma_t = 1,08$ .

Тогда, ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_2$  к месту к.з. в момент времени 2 *с* будет:  $\dot{I}_{1(\Gamma_2)t}^{(1)} = \dot{I}_{1(\Gamma_2)t}^{"(1)} \cdot \gamma_t = 7,481 \cdot 1,08 = 8,079$  кА.

Так как при расчете трехфазного к.з. установлено, что суммарный ток  $\dot{I}_{\Gamma l-C}^{''(3)}$  не меняется во времени, то, очевидно, ток  $\dot{I}_{l(\Gamma l-C)}^{''(1)}$  также не будет ме-

няться от времени. Тогда, ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_1$  и системой к месту к.з. в момент времени 2*c*, будет:

 $\dot{I}_{1(\Gamma^{1}-C)t}^{(1)} = \dot{I}_{1K}^{\prime\prime(1)} - \dot{I}_{1(\Gamma^{2})}^{\prime\prime(1)} = 9,673 - 7,481 = 2,192$  KA.

Искомый ток однофазного к.з. в момент времени t = 2c равен:

 $I_{Kt}^{(0)} = m^{(1)} \cdot (\dot{I}_{1(\Gamma 2t)}^{(1)} + \dot{I}_{1(\Gamma 1-C)}^{(1)}) = 3 \cdot (8,079 + 2,192) = 30,813 \,\mathrm{KA}.$ 

#### 3. Двухфазное короткое замыкание на землю(K<sup>(1,1)</sup>)

Для данного вида к.з. величина дополнительного сопротивления  $X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} //X_{0\Sigma} = 0,238 \cdot 0,521 / (0,238 + 0,521) = 0,163$ .

Тогда относительная величина сверхпереходного суммарного тока прямой последовательности будет равна:  $\dot{I}_{1K*}^{\prime\prime(1,1)} = j1,116 / j(0,298 + 0,163) = 2,421$ .

В именованных единицах  $\dot{I}_{1K}^{\prime\prime(1,1)} = \dot{I}_{1K*}^{\prime\prime(1,1)} \cdot I_{\rm b} = 2,421 \cdot 9,16 = 22,175$  кА.

Из второго закона Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности можно записать:  $\dot{U}_{1K}'^{(1,1)} = \dot{E}_{1\Sigma}'' - j\dot{I}_{1K}''^{(1,1)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,116 - j2,421 \cdot 0,298 = j0,394$ .

Тогда сверхпереходный ток прямой последовательности генератора Г<sub>2</sub>:

$$\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime(1,1)} = (\dot{E}_{3}^{\prime\prime} - \dot{U}_{1K}^{\prime\prime\prime(1,1)}) \cdot I_{\rm E} / jX_{10} = (j1,153 - j0,394) \cdot 9,16 / j0,431 = 16,11$$
 кА.  
При этом удалённость:  $\frac{\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{\prime\prime\prime(1,1)}}{I_{HOM,\Gamma 2}} = \frac{16,11 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3}{67,3} = 2,612$ .

По графику для типовых кривых (для момента времени t = 2c) определим степень снижения тока  $\dot{I}_{1(C2)}^{\prime\prime(1,1)}$ :  $\gamma_t = 0,9$ .

Тогда ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_2$  к месту к.з. в момент времени 2 *c*, будет:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)t}^{(1,1)} = \dot{I}_{1(\Gamma 2)t}^{"(1,1)} \cdot n_t = 16,11 \cdot 0,9 = 14,5$  кА.

Так как при расчете трехфазного к.з. установлено, что суммарный ток  $\dot{I}_{\Gamma l-C}^{"(3)}$  не меняется во времени, то, очевидно, ток  $\dot{I}_{l(\Gamma l-C)}^{"(1,1)}$  также не будет меняться от времени.

Тогда ток прямой последовательности, посылаемый генератором  $\Gamma_1$  и системой к месту к.з. в момент времени 2 *с*, будет:

 $\dot{I}_{1(\Gamma^{1-C})}^{(1,1)} = \dot{I}_{1K}^{\prime\prime(1,1)} - \dot{I}_{1(\Gamma^{2})}^{\prime\prime(1,1)} = 22,175 - 16,11 = 6,065 \text{ kA}.$ 

Искомый ток двухфазного к.з. на землю в момент времени t = 2c будет:  $I_{Kt}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot (\dot{I}_{1(\Gamma 2t)}^{(1,1)} + \dot{I}_{1(\Gamma 1-C)}^{(1,1)}) = 1,534 \cdot (14,5+6,0,65) = 31,55$  кА.

#### В) Решение задачи методом спрямленных характеристик

Составим схему замещения прямой последовательности для фазы A (рис.5-10). Так как генератор  $\Gamma_1$  значительно электрически удален от места к.з., то для него предварительно задаемся режимом номинального напряжения. Для генератора  $\Gamma_2$  предварительно принят режим подъема возбуждения из-за наличия к.з. на шинах его статора.

Так как схема замещения прямой последовательности по конфигурации и значениям параметров ее элементов индентична схеме замещения, составленной для расчета трехфазного к.з. для заданного момента времени (см. рис.4-6), то ее преобразования аналогичны тем, которые были рассмотрены ранее.



Рис.5-10. Исходная схема замещения прямой последовательности с учетом принятых режимов работы генераторов

На рис.5-11 представлена преобразованная схема замещения прямой последовательности, для которой найдено из расчета трехфазного к.з. результирующая

э.д.с. и результирующее сопротивление верхней части схемы замещения относительно места к.з.:  $\dot{E}_7 = j0,875$  и  $X_{16} = 0,901$ .



Рис.5-11. Преобразованная схема замещения прямой последовательности

Результирующее сопротивление и результирующая ЭДС схемы замещения прямой последовательности относительно места к.з. с учетом принятых режимов работы генераторов будут:

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \frac{\dot{E}_7 \cdot X_{10} + E_{t(\Gamma 2)} \cdot X_{16}}{X_{10} + X_{16}} = \frac{0,875 \cdot 0,743 + 1,63 \cdot 0,901}{0,743 + 0,901} = 1,289;$$
  
$$X_{1\Sigma} = X_{10} // X_{16} = 0,743 \cdot 0,901 / (0,743 + 0,901) = 0,407.$$

Рассчитаем ток к.з. по методу спрямленных характеристик для каждого случая несимметрии.

1. Двухфазное короткое замыкание (K<sup>(2)</sup>):

Величина  $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma} = 0,238$  для данного вида к.з.

Тогда относительная величина суммарного тока прямой последовательности будет равна:  $\dot{I}_{1K*}^{(2)} = j1,289 / j(0,407 + 0,238) = 1,998$  или в именованных единицах:  $\dot{I}_{1K*}^{(2)} = \dot{I}_{1K*}^{(2)} \cdot I_{\rm E} = 1,998 \cdot 9,16 = 18,302$  кА.

Из второго закона Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности можно записать:  $\dot{U}_{1K}^{(2)} = \dot{E}_{1\Sigma} - j\dot{I}_{1K*}^{(2)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,289 - j1,998 \cdot 0,407 = j0,476$ .

Ток прямой последовательности генератора  $\Gamma_2$  в момент времени t = 2c:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{(2)} = (\dot{E}_{t(\Gamma 2)} - \dot{U}_{1K}^{(2)}) \cdot I_{\rm b} / jX_{10} = (j1,63 - j0,476) \cdot 9,16 / j0,743 = 14,227$  кА.

Проведем проверку режима работы генератора  $\Gamma_2$ . Для этого определим его критический ток для рассматриваемого момента времени к.з. t = 2c.

 $X_{KPt(\Gamma 2)} = X_{t(\Gamma 2)} \cdot U_H \cdot S_{\mathsf{b}} / (E_{t(\Gamma 2)} - U_H) / S_H = 0.5 \cdot 1 \cdot 100 / (1.63 - 1) / 67.3 = 1.179.$ 

Тогда значение критического тока  $\Gamma_2$  в момент времени t = 2c будет:  $\dot{I}_{KPt(\Gamma 2)}^{(2)} = U_H \cdot I_5 / X_{KPt(\Gamma 2)} = 1 \cdot 9,16/1,179 = 7,769$  кА, что меньше значения  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{(2)} = 14,227$  кА.Значит, генератор  $\Gamma_2$  будет находиться в режиме РПВ.

В свою очередь, при расчете трехфазного к.з. было установлено, что  $\dot{I}_{\Gamma I-C}^{(3)}$  не меняется во времени, следовательно, и ток  $\dot{I}_{I(\Gamma I-C)}^{(2)}$  также не будет меняться во времени.

Искомый ток двухфазного к.з. в момент времени t = 2c будет:

$$I_{Kt}^{(2)} = m^{(2)} \cdot I_{1K}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 18,302 = 31,7 \text{ KA}.$$

1. Однофазное короткое замыкание на землю (К<sup>(1)</sup>)

Величина  $X_{\Lambda}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 0,238 + 0,521 = 0,759$  для данного вида к.з.

Тогда относительная величина суммарного тока прямой последовательности будет равна:  $\dot{I}_{1K*}^{(1)} = j1,289 / j(0,407 + 0,759) = 1,105$  или в именованных единицах:  $\dot{I}_{1K}^{(1)} = \dot{I}_{1K*}^{(1)} \cdot I_{\delta} = 1,105 \cdot 9,16 = 10,126$  кА.

Из второго закона Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности можно записать:  $\dot{U}_{1K}^{(1)} = \dot{E}_{1\Sigma} - j\dot{I}_{1K*}^{(1)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,289 - j1,105 \cdot 0,407 = j0,839$ .

Ток прямой последовательности генератора  $\Gamma_2$  в момент времени t = 2c:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{(1)} = (\dot{E}_{t(\Gamma 2)} - \dot{U}_{1K}^{(1)}) \cdot I_5 / jX_{10} = (j1,63 - j0,839) \cdot 9,16 / j0,743 = 9,752$  кА, что больше критического тока  $\Gamma_2$ , равного 7,769 кА. Следовательно, при однофазном к.3. генератор  $\Gamma_2$  будет находиться в режиме РПВ.

В свою очередь, при расчете трехфазного к.з. было установлено, что  $\dot{I}_{\Gamma l-C}^{(3)}$  не меняется во времени, следовательно, и ток  $\dot{I}_{l(\Gamma l-C)}^{(1)}$  также не будет меняться во времени.

Искомый ток однофазного к.з. в момент времени t = 2c будет:

 $I_{Kt}^{(1)} = m^{(1)} \cdot \dot{I}_{1K}^{(1)} = 3 \cdot 10,126 = 30,378 \text{ KA}.$ 

1. Двухфазное короткое замыкание на землю (К<sup>(1,1)</sup>)

Определяем величину  $X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 0,238 \cdot 0,521 / (0,238 + 0,521) = 0,163$ . То-гда относительный суммарный ток прямой последовательности будет равен:  $\dot{I}_{1K*}^{(1,1)} = j1,289 / j(0,407 + 0,163) = 2,261$  или в именованных единицах:  $\dot{I}_{1K}^{(1,1)} = \dot{I}_{1K*}^{(1,1)} \cdot I_{\delta} = 2,263 \cdot 9,16 = 20,714$  кА.

Из второго закона Кирхгофа для схемы замещения прямой последовательности:  $\dot{U}_{1K}^{(1,1)} = \dot{E}_{1\Sigma} - j\dot{I}_{1K*}^{(1,1)} \cdot X_{1\Sigma} = j1,289 - j2,261 \cdot 0,407 = j0,369$ .

Ток прямой последовательности генератора  $\Gamma_2$  в момент времени t = 2c:  $\dot{I}_{1(\Gamma 2)}^{(1,1)} = (\dot{E}_{t(\Gamma 2)} - \dot{U}_{1K}^{(1,1)}) \cdot I_{\rm b} / jX_{10} = (j1,63 - j0,369) \cdot 9,16 / j0,743 = 15,546$ кА, что больше критического тока  $\Gamma_2$ , равного 7,769 кА. Следовательно, при двухфазном к.з. на землю генератор  $\Gamma_2$  будет находиться в режиме РПВ.

В свою очередь, при расчете трехфазного к.з. было установлено, что  $\dot{I}_{\Gamma l-C}^{(3)}$  не меняется во времени, следовательно, и ток  $\dot{I}_{l(\Gamma l-C)}^{(1,1)}$  также не будет меняться во времени.

Искомый ток двухфазного к.з. на землю в момент времени t = 2c будет:  $\dot{I}_{Kt}^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot \dot{I}_{1K}^{(1,1)} = 1,534 \cdot 20,714 = 31,775$  кА.

#### Практическое занятие № 6

# Тема «Построение векторных диаграмм напряжений в заданной точке системы электроснабжения при несимметричных коротких замыканиях в точке *K* »

Требуется построить векторные диаграммы фазных напряжений в месте к.з. и в точке M (в начале  $B\Pi$  –110 кВ) при к.з. в точке K (рис. 5-1).

Так как алгоритм построения векторных диаграмм мало зависит от принятого метода расчета несимметричного к.з., приведем в качестве примера построение искомых векторных диаграмм при несимметричных к.з. в точке K, расчитанных по методу расчетных кривых.

#### Однофазное короткое замыкание на землю (*K*<sup>(1)</sup>)

#### Построение векторной диаграммы фазных напряжений в месте к.з.

Для этого воспользуемся известными сотношениями между симме- тричными составляющими тока и напряжения фазы *А* при однофазном к.з. на землю в точке *К*:

 $\dot{I}_{1K}^{(1)} = \dot{I}_{2K}^{(1)} = \dot{I}_{0K}^{(1)}; \\ \dot{U}_{1K}^{(1)} = -(\dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)}); \\ \dot{U}_{2K}^{(1)} = -j \cdot \dot{I}_{1K}^{(1)} \cdot X_{2\Sigma}; \\ \dot{U}_{0K}^{(1)} = -j \cdot \dot{I}_{1K}^{(1)} \cdot X_{0\Sigma}.$ 

Заметим, что найденный по методу расчетных кривых ток однофазного к.з. является суммой токов, посылаемых в место к.з. генераторами  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  и системой *C*, которые имеют разные по величине единицы отсчета. Так для генераторов ими являются их номинальные токи, а для систем – базисный ток.

Для получения возможности применения схем замещения разных последовательностей при построении векторных диаграмм напряжений, параметры которых были определены при принятых базисных условиях, найдем относительную величину тока прямой последовательности в месте к.з.:

$$\dot{I}_{1K*\text{B}}^{(1)} = \frac{\dot{I}_{nkt}^{(1)}}{m^{(1)} \cdot I_{\text{B}}} = \frac{27,08}{3 \cdot 9,16} = 0,985.$$

Напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей (в отно- сительных единицах) фазы *А* в месте к.з. будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{2K*\mathrm{B}}^{(1)} &= -j \cdot \dot{I}_{1K*\mathrm{B}}^{(1)} \cdot X_{2\Sigma} = -j \cdot 0,985 \cdot 0,238 = -j \cdot 0,235; \\ \dot{U}_{0K*\mathrm{B}}^{(1)} &= -j \cdot \dot{I}_{1K*\mathrm{B}}^{(1)} \cdot X_{0\Sigma} - j \cdot 0,985 \cdot 0,521 = -j \cdot 0,513; \\ \dot{U}_{1K*\mathrm{B}}^{(1)} &= -(\dot{U}_{2K*\mathrm{B}}^{(1)} + \dot{U}_{0K*\mathrm{B}}^{(1)}) = j(0,235+0,513) = j \cdot 0,748. \end{split}$$

Тогда в именованных единицах напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей фазы *A* в месте к.з. будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{2K}^{(1)} &= \dot{U}_{2K*\mathrm{B}}^{(1)} \cdot U_{\mathrm{B}} / \sqrt{3} = -j \cdot 0,235 \cdot 6,3 / \sqrt{3} = -j0,855 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{0K}^{(1)} &= \dot{U}_{0K*\mathrm{B}}^{(1)} \cdot U_{\mathrm{B}} / \sqrt{3} = -j \cdot 0,513 \cdot 6,3 / \sqrt{3} = -j \cdot 1,866 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{1K}^{(1)} &= \dot{U}_{1K*\mathrm{B}}^{(1)} \cdot U_{\mathrm{B}} / \sqrt{3} = j \cdot 0,748 \cdot 6,3 / \sqrt{3} = j \cdot 2,721 \text{ kB}. \end{split}$$

Строим в масштабе системы векторов симметричных составляющих напряжений в месте к.з. (прямой, обратной и нулевой последовательностей), используя найденные значения этих составляющих для напряжения фазы А. Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в месте к.з., показанную на рис.6-1.



Рис.6-1. Построение векторной диаграммы фазных напряжений при однофазном к.з.на землю в точке К

Приведем расчет фазных напряжений в месте к.з., используя метод симметричных составляющих:

 $\dot{U}_{K(A)}^{(1)} = 0; \ \dot{U}_{K(B)}^{(1)} = \dot{U}_{1K(B)}^{(1)} + \dot{U}_{2K(B)}^{(1)} + \dot{U}_{0K(B)}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^$  $=e^{j240^{\circ}} \cdot j2,721 - e^{j120^{\circ}} \cdot j0,855 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,74 + j0,4275 - j1,866 = 2,356 - j1,3605 + 0,360 + 0,36$  $=4,174 \cdot e^{-j42,1^{\circ}}$  KB:  $\dot{U}_{K(C)}^{(1)} = \dot{U}_{1K(C)}^{(1)} + \dot{U}_{2K(C)}^{(1)} + \dot{U}_{0K(C)}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + \dot{U}_{0K}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{$  $=e^{j120^{\circ}} \cdot j2,721 - e^{j240^{\circ}} \cdot j0,855 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,74 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,374 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,374 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - 0,374 + j0,4275 - j1,866 = -2,356 - j1,361 - j1,361$  $=4.174 \cdot e^{-j137,9^{\circ}} \kappa B$ 

> Построение векторной диаграммы фазных напряжений в заданной точке М системы электроснабжения при однофазном к.з. в точке К

Симметричные составляющие напряжения фазы А в точке М будем определять, идя от точки к.з. с учетом того, что в схеме замещения прямой последовательности потенциалы увеличиваются по абсолютной величине по мере приближения к источникам, а в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей потенциалы снижаются по мере приближения к ним.

Двигаясь от места к.з. к заданной точке M, следует учитывать тот факт, что при переходе через трансформатор со стороны треугольника на сторону звезды, обмотки которого соединены по группе У/Д-11, векторы прямой последовательности поворачиваются на 30<sup>0</sup> в сторону вращения часовой стрелки, а векторы обратной последовательности – на 30<sup>0</sup> в обратном направлении [1-3].

Согласно заданным способам соединения обмоток трансформаторов  $T_2$  и  $T_3$ для рассматриваемой схемы электроснабжения (рис.5-1) на пути от места к.з. до точки *М* будут отсутствовать угловые сдвиги симметричных составляющих прямой и обратной последовательности фаз *A*,*B*,*C*.

В соответствии с рис.5-3, 5-5 и 5-7 напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы *А* в точке *М* (в относительных едини-цах) будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{1M*}^{(1)} &= \dot{U}_{1K*}^{(1)} + j\dot{I}_{1K*}^{(1)} \cdot X_{13} \cdot C_{13} + j\dot{I}_{1K*}^{(1)} \cdot X_{14} \cdot C_{11} \right) = \\ &= j0,748 + j0,985 \cdot 0,731 \cdot 0,308 + j0,985 \cdot 0,223 \cdot 0,134 = j0,999 \,; \\ \dot{U}_{2M*}^{(1)} &= \dot{U}_{2K*}^{(1)} + j\dot{I}_{2K*}^{(1)} \cdot X_{17} \cdot C_{17} + j\dot{I}_{2K*}^{(1)} \cdot X_{15} \cdot C_{15} \right) = \\ &= -j0,235 + j0,985 \cdot 0,731 \cdot 0,268 + j0,985 \cdot 0,223 \cdot 0,079 = -j0,0247 \\ \dot{U}_{0M*}^{(1)} &= \dot{U}_{0K*}^{(1)} + j\dot{I}_{0K*}^{(1)} \cdot X_{13} \cdot C_{13} + j\dot{I}_{0K*}^{(1)} \cdot X_{12} \cdot C_{12} \right) = \\ &= -j0,513 + j0,985 \cdot 2,112 \cdot 0,21 + j0,985 \cdot 0,525 \cdot 0,012 = -j0,07 \,. \end{split}$$

Тогда в именованных единицах напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей фазы A в точке M (с учетом того, что точка M находится в начале  $B\Pi$  –110 кВ) будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{2M}^{(1)} &= \dot{U}_{2M*}^{(1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = -j \cdot 0,0247 \cdot 115 / \sqrt{3} = -j1,64 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{0M}^{(1)} &= \dot{U}_{0M*}^{(1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = -j \cdot 0,07 \cdot 115 / \sqrt{3} = -j \cdot 4,648 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{1M}^{(1)} &= \dot{U}_{1M*}^{(1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = j \cdot 0,999 \cdot 115 / \sqrt{3} = j \cdot 66,329 \text{ kB}. \end{split}$$

Строим системы векторов симметричных составляющих напряжений в точке M, используя найденные значения симметричных составляющих для напряжения фазы A.

Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в точке *M*, показанную на рис.6-2.

Приведем расчет фазных напряжений в точке *M*, используя метод симметричных составляющих:

$$\begin{split} \dot{U}_{M(A)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M}^{(1)} + \dot{U}_{2M}^{(1)} + \dot{U}_{0M}^{(1)} = j66,329 - j1,64 - j4,648 = 60,041 \,\mathrm{\kappa B}; \\ \dot{U}_{M(B)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M(B)}^{(1)} + \dot{U}_{2M(B)}^{(1)} + \dot{U}_{0M(B)}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(1)} + \dot{U}_{0M}^{(1)} = \\ &= e^{j240^{\circ}} \cdot j66,329 + e^{j120^{\circ}} \cdot (-j1,64) - j4,648 = 57,44 - j33,164 + 1,42 + j0,82 - j4,648 = \\ &= 69,52 \cdot e^{-j32,15^{\circ}} \,\mathrm{\kappa B}; \\ \dot{U}_{M(C)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M(C)}^{(1)} + \dot{U}_{2M(C)}^{(1)} + \dot{U}_{0M(C)}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(1)} + \dot{U}_{0M}^{(1)} = \\ &= e^{j120^{\circ}} \cdot j66,329 + e^{j240^{\circ}} \cdot (-j1,64) - j4,648 = -57,44 - j33,164 - 1,42 + j0,82 - j4,648 = \\ &= 69,52 \cdot e^{-j147,85^{\circ}} \,\mathrm{\kappa B}. \end{split}$$



Рис.6-2. Построение векторной диаграммы фазных напряжений в точке М при однофазном к.з. на землю в точке *К* 

#### Двухфазное короткое замыкание на землю ( $K^{(1,1)}$ )

Построение векторной диаграммы фазных напряжений в месте к.з.

Для этого воспользуемся известными сотношениями между симме- тричными составляющими тока и напряжения фазы *А* при двухфазном к.з. на землю в точке *К*:

$$\begin{split} \dot{I}_{2K}^{(11)} &= -\dot{I}_{1K}^{(1,1)} \cdot X_{0\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}); \\ \dot{I}_{0K}^{(11)} &= -\dot{I}_{1K}^{(1,1)} \cdot X_{2\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}); \\ \dot{U}_{1K}^{(1,1)} &= \dot{U}_{2K}^{(1,1)} = \dot{U}_{0K}^{(1,1)}; \\ \dot{U}_{2K}^{(1,1)} &= -j \cdot \dot{I}_{2K}^{(1,1)} \cdot X_{2\Sigma}; \\ \end{split}$$

Найдем относительные величины токов прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы *А* в месте к.з.:

$$\dot{I}_{1K*}^{(1,1)} = \frac{\dot{I}_{nkt}^{(1,1)}}{m^{(1,1)} \cdot I_{\rm E}} = \frac{28,017}{1,534 \cdot 9,16} = 1,994;$$
  
$$\dot{I}_{2K}^{(1,1)} = -\dot{I}_{1K}^{(1,1)} \cdot X_{0\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = -1,994 \cdot 0,521 / (0,238 + 0,521) = -1,369;$$
  
$$\dot{I}_{0K}^{(1,1)} = -\dot{I}_{1K}^{(1,1)} \cdot X_{2\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = -1,994 \cdot 0,238 / (0,238 + 0,521) = -0,625.$$

Напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей (в отно- сительных единицах) фазы *А* в месте к.з. будут:

$$U_{1K*}^{(1,1)} = U_{2K*}^{(1,1)} = U_{0K*}^{(1,1)} = -j \cdot I_{2K*}^{(1,1)} \cdot X_{2\Sigma} = -j \cdot (-1,369) \cdot 0,238 = j \cdot 0,326;$$

Тогда в именованных единицах напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей фазы *A* в месте к.з. будут:

$$\dot{U}_{1K}^{(1,1)} = \dot{U}_{2K}^{(1,1)} = \dot{U}_{0K}^{(1,1)} = \dot{U}_{1K*B}^{(1,1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = j \cdot 0,326 \cdot 6,3 / \sqrt{3} = j1,186 \text{ kB};$$

Строим системы векторов симметричных составляющих напряжений в месте к.з., используя найденные значения симметричных составляющих для напряжения фазы *A*.

Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в месте к.з., показанную на рис.6-3.



Рис.6-3. Построение векторной диаграммы фазных напряжений при двухфазном к.з. на землю в точке *К* 

Приведем расчет фазных напряжений в месте к.з., используя метод симметричных составляющих:

$$\dot{U}_{K(A)}^{(1,1)} = 3 \cdot \dot{U}_{1K}^{(1,1)} = 3 \cdot j1,186 = j3,558 \text{ KB}; \dot{U}_{K(B)}^{(1,1)} = \dot{U}_{1K(B)}^{(1,1)} + \dot{U}_{2K(B)}^{(1,1)} + \dot{U}_{0K(B)}^{(1,1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1,1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1,1)} + \dot{U}_{0K}^{(1,1)} = 0 \text{ KB}; \dot{U}_{K(C)}^{(1,1)} = \dot{U}_{1K(C)}^{(1,1)} + \dot{U}_{2K(C)}^{(1,1)} + \dot{U}_{0K(C)}^{(1,1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(1,1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(1,1)} + \dot{U}_{0K}^{(1,1)} = 0 \text{ KB}.$$

В соответствии с рис.5-3, 5-5 и 5-7 напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы *А* в точке *М* (в относительных едини-цах) будут:

 $\dot{U}_{1M*}^{(1,1)} = \dot{U}_{1K*}^{(1,1)} + j\dot{I}_{1K*}^{(1,1)} \cdot X_{13} \cdot C_{13} + j\dot{I}_{1K*}^{(1,1)} \cdot X_{14} \cdot C_{11}) =$   $= j0,326 + j1,994 \cdot 0,731 \cdot 0,308 + j1,994 \cdot 0,223 \cdot 0,134 = j0,835;$   $\dot{U}_{2M*}^{(1,1)} = \dot{U}_{2K*}^{(1,1)} + j\dot{I}_{2K*}^{(1,1)} \cdot X_{17} \cdot C_{17} + j\dot{I}_{2K*}^{(1,1)} \cdot X_{15} \cdot C_{15}) =$ 

 $= j0,326 - j1,369 \cdot 0,731 \cdot 0,268 - j1,369 \cdot 0,223 \cdot 0,079 = j0,0337;$  $\dot{U}_{0M*}^{(1)} = \dot{U}_{0K*}^{(1)} + j\dot{I}_{0K*}^{(1)} \cdot X_{13} \cdot C_{13} + j\dot{I}_{0K*}^{(1)} \cdot X_{12} \cdot C_{12}) =$  $= j0,326 - j0,625 \cdot 2,112 \cdot 0,21 - j0,625 \cdot 0,525 \cdot 0,012 = j0,0449.$ 

Тогда в именованных единицах напряжения обратной, нулевой и прямой последовательностей фазы A в точке M ( с учетом того, что точка M находится в начале  $B\Pi - 110$  кВ) будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{2M}^{(1,1)} &= \dot{U}_{2M*}^{(1,1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = j \cdot 0,0337 \cdot 115 / \sqrt{3} = j2,238 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{0M}^{(1,1)} &= \dot{U}_{0M*}^{(1,1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = j \cdot 0,0449 \cdot 115 / \sqrt{3} = j \cdot 2,981 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{1M}^{(1,1)} &= \dot{U}_{1M*}^{(1,1)} \cdot U_{\rm B} / \sqrt{3} = j \cdot 0,835 \cdot 115 / \sqrt{3} = j \cdot 55,44 \text{ kB}. \end{split}$$

Строим системы векторов симметричных составляющих напряжений в точке *M*, используя найденные значения симметричных составляющих для напряжения фазы *A*. Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в точке *M*, показанную на рис.6-4.



Рис.6-4. Построение векторной диаграммы фазных напряжений в точке М при двухфазном к.з. на землю в точке *К* 

Приведем расчет фазных напряжений в точке M, используя метод симметричных составляющих:

$$\begin{split} \dot{U}_{M(A)}^{(1,1)} &= \dot{U}_{1M}^{(1,1)} + \dot{U}_{2M}^{(1,1)} + \dot{U}_{0M}^{(1,1)} = j55,44 + j2,238 + j2,981 = 60,659 \text{ kB}; \\ \dot{U}_{M(B)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M(B)}^{(1)} + \dot{U}_{2M(B)}^{(1)} + \dot{U}_{0M(B)}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(1)} + e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(1)} + \dot{U}_{0M}^{(1)} = e^{j240^{\circ}} \cdot j55,44 + \\ &+ e^{j120^{\circ}} \cdot j2,238 + j2,981 = 48,012 - j27,72 - 1,938 - j1,119 + j2,981 = 52,83 \cdot e^{-j29,3^{\circ}} \text{ kB}; \\ \dot{U}_{M(C)}^{(1)} &= \dot{U}_{1M(C)}^{(1)} + \dot{U}_{2M(C)}^{(1)} + \dot{U}_{0M(C)}^{(1)} = e^{j120^{\circ}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(1)} + e^{j240^{\circ}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(1)} + \dot{U}_{0M}^{(1)} = \\ &= e^{j120^{\circ}} \cdot j55,44 + e^{j240^{\circ}} \cdot j2,238 + j2,981 = -48,012 - j27,72 + 1,938 - j1,119 + j2,981 = \\ &= 52,83 \cdot e^{-j150,7^{\circ}} \text{ kB}. \end{split}$$

#### Двухфазное короткое замыкание ( $K^{(2)}$ )

Построение векторной диаграммы фазных напряжений в месте к.з.

Для этого воспользуемся известными сотношениями между симме- тричными составляющими тока и напряжения фазы *A* при двухфазном к.з. в точке *K*:  $\dot{I}_{2K}^{(2)} = -\dot{I}_{1K}^{(2)}$ ;  $\dot{I}_{0K}^{(2)} = 0$ ;  $\dot{U}_{1K}^{(2)} = \dot{U}_{2K}^{(2)}$ ;  $\dot{U}_{2K}^{(2)} = -j \cdot \dot{I}_{2K}^{(2)} \cdot X_{2\Sigma}$ .

Найдем относительные величины токов прямой и обратной последова- тельностей фазы *А* в месте к.з.:

$$\dot{I}_{1K*}^{(2)} = \dot{I}_{2K*}^{(2)} = \frac{\dot{I}_{nkt}^{(2)}}{m^{(2)} \cdot I_{\rm b}} = \frac{28,456}{\sqrt{3} \cdot 9,16} = 1,794.$$

Напряжения обратной и прямой последовательностей (в относительных единицах) фазы *А* в месте к.з. будут:

$$\dot{U}_{1K*}^{(2)} = \dot{U}_{2K*}^{(2)} = j \cdot \dot{I}_{1K*}^{(2)} \cdot X_{2\Sigma} = j1,794 \cdot 0,238 = j \cdot 0,427.$$

Тогда в именованных единицах напряжения обратной и прямой по- следовательностей фазы *A* в месте к.з. будут:

 $\dot{U}_{1K}^{(2)} = \dot{U}_{2K}^{(2)} = \dot{U}_{1K*}^{(2)} \cdot U_{\rm b} / \sqrt{3} = j \cdot 0,427 \cdot 6,3 / \sqrt{3} = j1,553 \text{ kB}.$ 

Строим системы векторов симметричных составляющих напряжений в месте к.з. (прямой и обратной последовательностей), используя найденные значения симметричных составляющих для напряжения фазы *А*.

Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в месте к.з., показанную на рис.6-5.



Рис.6-5. Построение векторной диаграммы фазных напряжений при двухфазном к.з. в точке *К* 

Приведем расчет фазных напряжений в месте к.з., используя метод симметричных составляющих:

 $\dot{U}_{K(A)}^{(2)} = 2 \cdot \dot{U}_{1K}^{(2)} = 2 \cdot j1,553 = j3,106 \text{ kB};$  $\dot{U}_{K(B)}^{(2)} = \dot{U}_{1K(B)}^{(2)} + \dot{U}_{2K(B)}^{(2)} = e^{j240^{0}} \cdot \dot{U}_{1K}^{(2)} + e^{j120^{0}} \cdot \dot{U}_{2K}^{(2)} = (e^{j240^{0}} + e^{j120^{0}}) \cdot j1,553 = -j1,553 \text{ kB};$  $\dot{U}_{K(C)}^{(2)} = \dot{U}_{K(B)}^{(2)} = -j1,553 \text{ kB}.$ 

> Построение векторной диаграммы фазных напряжений в заданной точке М системы электроснабжения при двухфазном к.з. в точке К

В соответствии с рис.5-3 и 5-5 напряжения прямой и обратной последо- вательностей фазы *А* в точке *М* (в относительных единицах) будут:

 $\dot{U}_{1M*}^{(2)} = \dot{U}_{1K*}^{(2)} + j\dot{I}_{1K*}^{(2)} \cdot X_{13} \cdot C_{13} + j\dot{I}_{1K*}^{(2)} \cdot X_{14} \cdot C_{11}) =$ = i0.427 + i1.794 \cdot 0.731 \cdot 0.308 + i1.794 \cdot 0.223 \cdot 0.134 = i0.885;

 $\dot{U}^{(2)}_{2M*}=\dot{U}^{(2)}_{2K*}+j\dot{I}^{(2)}_{2K*}\cdot X_{17}\cdot C_{17}+j\dot{I}^{(2)}_{2K*}\cdot X_{15}\cdot C_{15})=$ 

 $= j0,427 - j1,794 \cdot 0,731 \cdot 0,268 - j1,794 \cdot 0,223 \cdot 0,079 = j0,0439.$ 

Тогда в именованных единицах напряжения обратной и прямой последовательностей фазы A в точке M (с учетом того, что точка M находится в начале  $B\Pi$  –110 кВ) будут:

$$\dot{U}_{2M}^{(2)} = \dot{U}_{2M*}^{(2)} \cdot U_{\rm E} / \sqrt{3} = j \cdot 0,0439 \cdot 115 / \sqrt{3} = j2,917 \text{ kB}; \dot{U}_{1M}^{(2)} = \dot{U}_{1K*}^{(2)} \cdot U_{\rm E} / \sqrt{3} = j \cdot 0,885 \cdot 115 / \sqrt{3} = j \cdot 58,76 \text{ kB}.$$

Строим в масштабе системы векторов симметричных составляющих напряжений в точке M (прямой, обратной и нулевой последовательностей), используя найденные значения симметричных составляющих для напряжения фазы A.

Складывая геометрически симметричные составляющие векторов напряжений соответствующих фаз, получим искомую векторную диаграмму фазных напряжений в точке *M*, показанную на рис.6-6.



Рис.6-6. Построение векторной диаграммы фазных напряжений в точке М при двухфазном к.з. в точке *К* 

Приведем расчет фазных напряжений в точке *M*, используя метод симметричных составляющих:

$$\dot{U}_{M(A)}^{(2)} = \dot{U}_{1M}^{(2)} + \dot{U}_{2M}^{(2)} = j58,76 + j2,917 = 61,677 \text{ kB};$$
  

$$\dot{U}_{M(B)}^{(2)} = \dot{U}_{1M(B)}^{(2)} + \dot{U}_{2M(B)}^{(2)} = e^{j240^{0}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(2)} + e^{j120^{0}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(2)} = e^{j240^{0}} \cdot j58,76 + e^{j120^{0}} \cdot j2,917 = 50,888 - j29,38 - 2,526 - j1,458 = 57,36 \cdot e^{-j32,5^{0}} \text{ kB};$$
  

$$\dot{U}_{M(C)}^{(2)} = \dot{U}_{1M(C)}^{(2)} + \dot{U}_{2M(C)}^{(2)} = e^{j120^{0}} \cdot \dot{U}_{1M}^{(2)} + e^{j240^{0}} \cdot \dot{U}_{2M}^{(2)} = e^{j120^{0}} \cdot j58,76 + e^{j240^{0}} \cdot j2,917 = -50,888 - j29,38 + 2,526 - j1,458 = 57,36 \cdot e^{-j147,5^{0}} \text{ kB}.$$

Как показывают результаты расчета и графики фазных напряжений при любом виде несимметричного к.з. фазные напряжения в точке M практически образуют симметричную трехфазную систему векторов, что объясняется ее близким расположением к генератору  $\Gamma_1$ .

#### Практическое занятие № 7

#### Тема «Расчеты однократной продольной несимметрии. Расчет токов трёхфазного и однофазного к.з. в системе напряжением до 1 кВ»

Задача 7-1. Для блока, состоящего из генератора  $\Gamma$ , трансформатора T, линии  $\Pi$  и автотрансформатора AT (рис.7-1), сравнить величины начальных сверхпереходных токов при несинхронном включении его в систему C, считая, что такое включение производится одновременно: а) тремя фазами выключателя В; б) то же двумя фазами; в) то же одной фазой.



Рис.7-1. Исходная расчетная схема

#### Исходные данные:

генератор Г : 176,5 MB·A;  $U_{HOM} = 18 \text{ кB}$ ;  $X''_{d} = 0,21$ ;  $X_{2} = 0,255$ ; трансформаторы Т: 160 MB·A;  $u_{K} = 12\%$ ;  $k_{T} = 248/18$ ; AT: 200 MB·A;  $u_{KBC} = 10\%$ ;  $u_{KBH} = 24\%$ ;  $u_{KCH} = 12\%$ ;  $k_{AT} = 525/220/10,5$ ; линия Л: 145 км;  $X_{1} = 0,425 \text{ Ом/км}$ ;  $X_{0} = 1,31 \text{ Ом/км}$ ; система С: источник бесконечной мощности ( $X_{1} = X_{2} = X_{0} = 0$ );  $U_{C} = 510 \text{ кB}$ .

#### Решение.

Решение проведем в относительных единицах с точным приведением к основной ступени, выбрав в качестве основной ступени напряжения ступень с номинальным напряжением  $U_{\rm BI} = 18$  кВ. Примем базисную мощность, равную номинальной мощности генератора:  $S_{\rm E} = 176,5$  MB·A.

Для остальных ступеней напряжения, значения базисных напряжений будут равны:

 $U_{\text{БИ}} = U_{\text{БI}} \cdot k_T = 18 \cdot 242/18 = 242 \text{ кB};$  $U_{\text{БИI}} = U_{\text{БИ}} \cdot k_{AT} = 242 \cdot 525/220 = 577,5 \text{ кB}.$ 

На рис.7-2 приведены схемы замещения прямой обратной и нулевой последовательностей с указанием в каждой из них места возникновения продольной несимметрии.

Расчет сопротивлений схем замещения:

а) для схемы замещения прямой последовательности

$$X_{1*E} = X_d'' \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} \cdot \left(\frac{U_{HOM}}{U_{EI}}\right)^2 = 0,21 \cdot \frac{176,5}{176,5} \cdot \left(\frac{18}{18}\right)^2 = 0,21;$$
  

$$X_{2*E} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} \cdot \left(\frac{U_{HOM.H}}{U_{EI}}\right)^2 = \frac{12}{100} \cdot \frac{176,5}{160} \cdot \left(\frac{18}{18}\right)^2 = 0,132;$$
  

$$X_{3*E} = X_1 \cdot \ell \cdot \frac{S_E}{U_{EU}^2} = 0,425 \cdot 145 \cdot \frac{176,5}{242^2} = 0,186;$$

Определим напряжения короткого замыкания для каждой обмотки автотрансформатора:

$$\begin{aligned} u_{KB} &= 0.5(u_{KBH} + u_{KBC} - u_{KCH}) = 0.5(24 + 10 - 12) = 11\% \\ u_{KC} &= u_{KBC} - u_{KB} = 10 - 11 = -1\%; \ u_{KH} = u_{KBH} - u_{KB} = 24 - 11 = 13\%; \\ X_4 &= \frac{u_{KC}\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM.C}}{U_{\rm EII}})^2 = \frac{-1}{100} \cdot \frac{176.5}{200} \cdot (\frac{220}{242})^2 = -0.007; \end{aligned}$$

$$X_5 = \frac{u_{KB}\%}{100} \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM,B}}{U_{\rm EIII}})^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{176,5}{200} \cdot (\frac{525}{577,5})^2 = 0,08.$$

б) для схемы замещения обратной последовательности:

$$\begin{split} X_1 &= X_2 \cdot \frac{S_{\rm E}}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM}}{U_{\rm EI}})^2 = 0,255 \cdot \frac{176,5}{176,5} \cdot (\frac{18}{18})^2 = 0,255 \,; \ X_2 = 0,132; \ X_3 = 0,186 \,; \\ X_4 &= -0,007; \ X_5 = 0,08 \,. \end{split}$$

в) для схемы замещения нулевой последовательности:

$$X_{2} = 0,132; X_{3*E} = X_{0} \cdot \ell \cdot \frac{S_{E}}{U_{EH}^{2}} = 1,31 \cdot 145 \cdot \frac{176,5}{242^{2}} = 0,572; X_{4} = -0,007; X_{5} = 0,08;$$
  

$$X_{6} = \frac{u_{KH}\%}{100} \cdot \frac{S_{E}}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM,B}}{U_{EHI}})^{2} = \frac{13}{100} \cdot \frac{176,5}{200} \cdot (\frac{525}{577,5})^{2} = 0,095.$$
  

$$\sum_{k=1}^{K} \frac{V_{kH}}{V_{kH}} \cdot (\frac{V_{kH}}{V_{kH}})^{2} = \frac{13}{100} \cdot \frac{176,5}{200} \cdot (\frac{525}{577,5})^{2} = 0,095.$$





Рис.7-2. Схемы замещения: а)- прямой последовательности; б)- обратной последовательности; в)- нулевой последовательности

Определим результирующие сопротивления каждой схемы замещения относительно места однократной продольной несимметрии (место установки выключателя *B*):

$$\begin{split} X_{1\Sigma L} &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 0,21 + 0,132 + 0,186 - 0,007 + 0,08 = 0,601 \, ; \\ X_{2\Sigma L} &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 0,255 + 0,132 + 0,186 - 0,007 + 0,08 = 0,646 \, ; \\ X_{0\Sigma L} &= X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \, // \, X_6 = 0,132 + 0,572 - 0,007 + 0,08 \cdot 0,095 / (0,08 + 0,095) = 0,74 \, . \end{split}$$

Для определенности будем считать, что в момент включения выключателя *В* напряжение на шинах генератора Г в относительных единицах равно напряжению системы:  $U_{\Gamma*} = U_{C*} = U_C / U_{\text{БIII}} = 510 / 577, 5 = 0,883$ .

Из курса электромеханики известно, что наиболее тяжелые условия по току для генератора  $\Gamma$  имеют место тогда, когда напряжения включаемых источников (генератора  $\Gamma$  и системы C при их синхронизации) находятся в противофазе. Тогда при одновременном включении всех трех фаз выключателя B наибольшая величина сверхпереходного тока генератора будет:

 $\dot{I}_{L^*}^{''^{(3)}} = 2 \cdot \dot{U}_{\Gamma^*} / X_{1\Sigma L} = 2 \cdot j0,883 / j0,601 = 2,938.$ 

При одновременном включении только двух фаз выключателя *B* (разрыв фазы *A*) дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, определится:

 $X_{\Lambda L}^{(1)} = X_{2\Sigma L} //X_{0\Sigma L} = j0,646 \cdot j0,74 / (j0,646 + j0,74) = j0,345$ ,

а значения составляющих прямой и обратной последовательностей наибольшего сверхпереходного тока будут:

 $\dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} = 2 \cdot \dot{U}_{\Gamma*} / (X_{1\Sigma L} + X_{\Delta L}^{(1)}) = 2 \cdot j0,883 / j(0,601 + 0,345) = 1,867;$  $\dot{I}_{2L*}^{\prime\prime(1)} = -\dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} \cdot X_{0\Sigma L} / (X_{2\Sigma L} + X_{0\Sigma L}) = -1,867 \cdot j0,74 / j(0,646 + 0,74) = -0,997.$ Составляющая  $\dot{I}_{0L*}^{\prime\prime(1)} = 0$ , так как со стороны генератора обмотки трансформатора

соединены в треугольник.

Поскольку обмотки трансформатора *T* имеют соединение  $Y_0/\Delta$ , то при переходе через трансформатор со стороны звезды в фазе *B* генератора составляющие  $\dot{I}_{1L}^{"(1)}$  и  $\dot{I}_{2L}^{"(1)}$  совпадают по направлению с учетом знака составляющей  $\dot{I}_{2L*}^{"(1)}$ (см. рис.7-3).



Рис.7-3. Определение тока в фазе В генератора при разрыве фазы А

Таким образом, наибольшая величина тока будет в фазе *В* генератора:  $\dot{I}_{L^*}^{\prime\prime(1)} = \dot{I}_{1L}^{\prime\prime(1)} + \dot{I}_{2L}^{\prime\prime(1)} = 1,867 + 0,997 = 2,864$ .

При включении одной фазы *A* выключателя (разрыв фаз *B* и *C*): дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, определится:

 $X_{\Delta L}^{(2)} = X_{2\Sigma L} + X_{0\Sigma L} = j0,646 + j0,74 = j1,386$ ,

а значения составляющих прямой и обратной последовательностей наибольшего сверхпереходного тока будут:

 $\dot{I}_{1L^*}^{\prime\prime(2)} = \dot{I}_{2L^*}^{\prime\prime(2)} = 2 \cdot \dot{U}_{\Gamma^*} / (X_{1\Sigma L} + X_{\Delta L}^{(2)}) = 2 \cdot j0,883 / j(0,601 + 1,386) = 0,889.$ 

При переходе через трансформатор со стороны звезды в фазе A генератора составляющие  $\dot{I}_{1L}^{"(2)}$  и  $\dot{I}_{2L}^{"(2)}$  будут сдвинуты относительно друг друга на угол  $60^0$  (см. рис.7-3). Таким образом, наибольшая величина тока в фазе A генератора будет:

 $\dot{I}_{L^*}^{\prime\prime(2)} = \dot{I}_{1L}^{\prime\prime(2)} + \dot{I}_{2L}^{\prime\prime(2)} = \sqrt{3} \cdot 0,889 = 1,54$ .

Таким образом, найденные величины сверхпереходных токов генератора соотносятся между собой как:

 $\dot{I}_{L}^{\prime\prime(3)}$ :  $\dot{I}_{L}^{\prime\prime(1)}$ :  $\dot{I}_{L}^{\prime\prime(2)}$  = 2,938: 2,864: 1,54 = 1: 0,975: 0,524.

Следовательно, наиболее тяжелым режимом генератора будет одновременное включение всех трех фаз выключателя *B*, когда напряжения генератора и системы находятся в противофазе.

Задача 7-2. При включении асинхронного двигателя AД, питающегося от шин 6 кВ понижающей подстанции (рис.7-4), одна фаза из-за неисправности выключателя *В* осталась разомкнутой. Для этих условий определить величину начального пускового тока двигателя и оценить, в какой мере это отразится на вращающем моменте других асинхронных двигателей, которые питаются от тех же шин (считая их номинальное напряжение равным 6 кВ).



Рис.7-4. Исходная расчетная схема

#### Исходные данные:

система С :  $X_1 = X_2 = 26,4$  Ом;  $U_C = const = 115$  кВ; трансформатор Т: 10 МВ·А;  $u_K = 10\%$ ;  $k_T = 115/6,3$  кВ; двигатель АД: 4000 кВт;  $U_{HOM} = 6$  кВ;  $k_{\Pi} = I_{nyc\kappa} / I_{HOM} = 4,5$ ;  $\cos \varphi = 0,87$ ;  $\eta = 0,92$ ; нагрузка Н: 2,5 МВ·А.

#### Решение

Решение проведем в относительных единицах с точным приведением к основной ступени, выбрав в качестве основной ступени напряжения (I) ступень с номинальным напряжением  $U_{\rm EI} = 6,3\,$  кВ. Примем базисную мощность, равную номинальной мощности трансформатора:  $S_{\rm E} = 10\,{\rm MB}\cdot{\rm A}$ ; соответственно  $I_{\rm EI} = 10/(\sqrt{3}\cdot 6,3) = 0,916\,$ кА.

Для ступени напряжения II значение базисного напряжения будет равно 115 кВ и базисного тока  $I_{\text{Б}II} = 10/(\sqrt{3} \cdot 115) = 0,0502$  кА.

На рис.7-5 приведены схемы замещения прямой и обратной последовательностей для заданных условий продольной несимметрии с указанием в каждой из них места ее возникновения.



Рис.7-5. Схемы замещения: а)- прямой последовательности; б)- обратной последовательности

Расчет сопротивлений и ЭДС схем замещения:

а) для схемы замещения прямой последовательности  $X_{1*E} = X_C / Z_{EII} = X_C \cdot S_E / U_{EII}^2 = 26,4 \cdot 10/115^2 = 0,02;$   $X_{2*E} = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_E}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM.H}}{U_{EI}})^2 = \frac{10}{100} \cdot \frac{10}{10} \cdot (\frac{6,3}{6,3})^2 = 0,1;$  $X_{3*E} = X''_{HAIP*} \cdot S_E / S_{HAIP} = 0,35 \cdot 10/2,5 = 1,4.$ 

Для определения сопротивления асинхронного двигателя используем его паспортные данные:

$$S_{HOM,A\mathcal{I}} = P_{HOM} / (\sqrt{3} \cdot U_{HOM} \cdot \cos \varphi \cdot \eta) = 4 / (\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0.87 \cdot 0.92) = 5 \text{ MB-A};$$
  
$$X_{4*B} = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \frac{S_{B}}{S_{HOM}} \cdot (\frac{U_{HOM}}{U_{BI}})^{2} = \frac{1}{4.5} \cdot \frac{10}{5} \cdot (\frac{6}{6.3})^{2} = 0.4.$$

б) для схемы замещения обратной последовательности  $X_{1*E} = 0,02$ ;  $X_{2*E} = 0,1$ ;  $X_{3*E} = 1,4$ ;  $X_{4*E} = 0,4$ .

Результирующие сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей относительно места несимметрии будут:  $X_{1\Sigma L} = X_{2\Sigma L} = (X_{1*E} + X_{2*E}) //(X_{3*E} + X_{4*E}) =$ =(0,02 + 0,1) · 1,4/(0,02 + 0,1 + 1,4) + 0,4 = 0,51. Результирующая ЭДС схемы замещения прямой последовательности относительно места несимметрии будет:

$$\dot{E}_{1\Sigma L*} = \frac{\dot{E}_{1*} \cdot X_{3*\mathrm{B}} + \dot{E}_{2*} \cdot (X_{1*\mathrm{B}} + X_{2*\mathrm{B}})}{X_{1*\mathrm{B}} + X_{2*\mathrm{B}} + X_{3*\mathrm{B}}} = \frac{j1 \cdot j1, 4 + j0, 85 \cdot 0, 12}{j0, 12 + j1, 4} = j0,988.$$

Дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, будет:

 $X_{\Delta L}^{(1)} = X_{2\Sigma L} // X_{0\Sigma L} = j0,51 \cdot \infty / (j0,646 + \infty) = j0,51,$ 

а значения составляющих прямой и обратной последовательностей сверхпереходного тока будут:

$$\begin{split} \dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} &= E_{1\Sigma*} / (X_{1\Sigma L} + X_{\Delta L}^{(1)}) = j0,988 / j(0,51+0,51) = 0,969; \\ \dot{I}_{2L*}^{\prime\prime(1)} &= -\dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} \cdot X_{0\Sigma L} / (X_{2\Sigma L} + X_{0\Sigma L}) = -0,969 \cdot \infty / j(0,51+\infty) = -0,969. \end{split}$$

Тогда величина пускового тока в относительных единицах (в фазах *B* и *C*) при базисных условиях будет:

 $I_{\Pi VCK*E} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} = \sqrt{3} \cdot 0,969 = 1,678$ , что при номинальных условиях двигателя составит:  $I_{\Pi VCK*E} = I_{\Pi VCK*E} \cdot I_E / I_{HOM} = 1,678 \cdot 0,916 / 0,48 = 3,2$ , то есть он меньше номинального пускового тока на 29%.

Здесь 
$$I_{HOM} = S_{HOM} / (\sqrt{3} \cdot U_{HOM}) = 5 / (\sqrt{3} \cdot 6) = 0,48$$
 кА.

Определим симметричные составляющие напряжения фазы *A* в месте подключения нагрузки *H* :

$$\begin{split} \dot{U}_{1AH} &= \Delta \dot{U}_{1L} + j \dot{I}_{1L*}^{''(1)} X_{4*} = \dot{E}_{1\Sigma L} - j \dot{I}_{1L*}^{''(1)} X_{1\Sigma L} + j \dot{I}_{1L*}^{''(1)} X_{4*} = \\ &= j0,988 - j0,969 \cdot 0,51 + j0,969 \cdot 0,4 = 0,881; \\ \dot{U}_{2AH} &= \Delta \dot{U}_{2L} + j \dot{I}_{2L*}^{''(1)} X_{4*} = -j \dot{I}_{2L*}^{''(1)} \cdot X_{2\Sigma L} + j \dot{I}_{2L*}^{''(1)} X_{4*} = j0,969 \cdot 0,51 - j0,969 \cdot 0,4 = 0,107. \\ \text{Выразим их в долях номинального напряжения двигателя:} \end{split}$$

 $U_1 = U_{1AH} \cdot U_{\overline{bI}} / U_{HOM} = 0,881 \cdot 6,3/6 = 0,925;$  $U_2 = U_{2AH} \cdot U_{\overline{bI}} / U_{HOM} = 0,107 \cdot 6,3/6 = 0,112.$ 

Развиваемый двигателями нагрузки *H* вращающий момент составит:  $M = (U_1^2 - U_2^2) \cdot M_{HOM} = (0,925^2 - 0,112^2) M_{HOM} = 0,843 M_{HOM}$ , то есть снизится примерно на 16%.

Что же касается двигателя *АД*, включенного двумя фазами, то симметричные составляющие напряжения на его выводах будут:

$$\begin{split} \dot{U}_{1A\!\not\!\!\!\!\!\mathcal{I}} &= j \dot{I}_{1L*}^{\prime\prime(1)} \cdot X_{4*} \cdot U_{\mathrm{B}I} \,/ \, U_{HOM} = j0,\!969 \cdot 0,\!4 \cdot 6,\!3/6 = 0,\!407 \,; \\ \dot{U}_{2A\!\not\!\!\!\mathcal{I}} &= j \dot{I}_{2L*}^{\prime\prime(1)} \cdot X_{4*} \cdot U_{\mathrm{B}I} \,/ \, U_{HOM} = -j0,\!969 \cdot 0,\!4 \cdot 6,\!3/6 = -0,\!407 \,. \end{split}$$

Таким образом, как и следовало ожидать, пусковой момент двигателя будет равен нулю.

Заметим, что данная задача может быть решена иным путем, если пуск двигателя на двух фазах рассматривать как двухфазное короткое замыкание за сопротивлением заторможенного двигателя, которая в схемах замещения прямой и обратной последовательностей одинакова.

#### Список литературы

1. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов /И.П. Крючков и др.; под ред. И.П. Крючкова. – 2-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 416 с.

2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

3. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2003. –283 с.

4. Национальный стандарт РФ. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007. – 43 с.

Владимир Иванович Мошкин

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методические указания к практическим занятиям по курсу «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение»

Авторская редакция

Подписано к печати	Формат 60х84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл.печ.л. 4,0	Учизд. л. 4,0
Заказ	Тираж 50	Цена свободная

Редакционно-издательский центр КГУ. 640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25. Курганский государственный университет.