

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электро- и теплоэнергетики

В.Т.Пилипенко

# **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Рекомендовано к изданию Редакционно - издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профили подготовки: «Электроснабжение»; «Электрические станции»

Оренбург  
2015

УДК 621.311 (07)

ББК 31.297

П 32

Рецензент - кандидат технических наук, доцент В.М.Вакулюк

**Пилипенко, В.Т.**

П 32 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: методические указания / В.Т.Пилипенко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2015. – 40 с.

Приводятся теоретические сведения и излагаются рекомендации по составлению схемы замещения и определению сопротивлений и ЭДС элементов для последующего расчёта тока трёхфазного короткого замыкания.

Описываются особенности расчёта, приводятся необходимые аналитические выражения и числовые примеры по определению параметров схемы замещения в системах именованных и относительных единиц с использованием способов точного и приближённого приведения к основной ступени напряжения.

Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения, выполняющим контрольную работу по указанной выше тематике.

УДК 621.311  
ББК 31.297

© Пилипенко В.Т., 2015  
© ОГУ, 2015

## Содержание

Введение.....	5
1 Составление эквивалентной схемы замещения при трёхфазном коротком замыкании .....	6
2 Определение параметров схемы замещения.....	7
2.1 Расчёт в относительных единицах с использованием способа точного приведения.....	7
2.2 Расчёт в именованных единицах с использованием способа точного приведения.....	11
2.3 Расчёт в относительных единицах с использованием способа приближённого приведения.....	11
2.4 Расчёт в именованных единицах с использованием способа приближённого приведения.....	12
3 Примеры расчёта.....	14
3.1 Составление схемы замещения.....	14
3.2 Расчёт в именованных единицах с использованием способа точного приведения.....	16
3.3 Расчёт в именованных единицах с использованием способа приближённого приведения.....	20
3.4 Расчёт в относительных единицах с использованием способа точного приведения.....	24

3.5 Расчёт в относительных единицах с использованием способа приближённого приведения.....	29
Список использованных источников.....	33
Приложение А Средние значения сопротивлений и ЭДС элементов.....	34
Приложение Б Выражения для определения сопротивлений.....	35
Приложение В Сравнение результатов расчёта параметров схемы замещения .....	37
Приложение Г Образец задания на контрольную работу.....	39
Приложение Д Образец титульного листа.....	40

## Введение

Целью выполнения контрольной работы является закрепление теоретических знаний, полученных студентами при изучении курса «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» посредством овладения практическими навыками определения сопротивлений и ЭДС основных элементов расчётных схем, что необходимо и важно для правильного осуществления последующих расчётов токов короткого замыкания уже в рамках курсовой работы по дисциплине.

Рассматриваются расчёты параметров схемы замещения при трёхфазном коротком замыкании (КЗ) как в именованных, так и в относительных единицах с использованием двух способов приведения к основной ступени напряжения: точного и приближённого. Описываются особенности и последовательность расчётов, приводятся необходимые аналитические выражения с комментариями. С учётом специфики заочного обучения в начале каждого раздела даются ссылки на материал, который необходимо проработать дополнительно.

Для более полного понимания материала подробно рассматриваются числовые примеры расчёта с последующим сравнением полученных результатов.

При выполнении расчётов необходимо руководствоваться ГОСТ Р 552735-2007 [3] и Руководящими указаниями [4].

Примерный объём – 10 -15 листов стандартного формата А4.

«Методические указания» предназначены в первую очередь для студентов заочной формы обучения, однако, могут быть использованы и студентами очной формы обучения.

## 1 Составление эквивалентной схемы замещения при трёхфазном коротком замыкании

Дополнительно необходимо проработать самостоятельно разделы 2-3, 2-4 [5], 3.2 [4] и 4.3, 4.4 [2].

При известной расчётной схеме и выбранных расчётных условиях определение тока короткого замыкания начинают с составления схемы замещения короткого замыкания, в которой все элементы расчётной схемы представлены ЭДС и сопротивлениями определённой величины и их последующего определения. При этом нередко (особенно для высоковольтных сетей) учитывают только индуктивные сопротивления элементов, пренебрегая активными вследствие их сравнительно небольшой величины. Использование этого допущения упрощает расчёт, не внося заметной погрешности в результат.

Схема замещения составляется с учётом особенностей методов расчёта токов КЗ, вида короткого замыкания и стадии переходного процесса.

Реальные схемы, вследствие наличия в них трансформаторов, всегда имеют несколько ступеней напряжения, в связи с чем все ЭДС и сопротивления должны быть определены (пересчитаны) для какой-то одной ступени напряжения, называемой основной. Процедура такого пересчёта называется приведением. Расчёт ЭДС и сопротивлений с учётом приведения может быть выполнен как в именованных, так и в относительных единицах.

При выполнении расчёта в относительных единицах за базисное напряжение ( $U_6$ ) рекомендуется принимать напряжение ступени короткого замыкания, **которая должна быть выбрана в качестве основной.**

Если приведение к основной ступени напряжения осуществляется с учётом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов (исходя из реально приложенных к обмоткам трансформаторов напряжений), то оно называется **точным**, а при

использовании приближённых значений коэффициентов – **приближённым**. В последнем случае для определения коэффициентов трансформации используют средние номинальные напряжения ступеней, в результате чего упрощаются расчётные выражения, однако уменьшается точность определения искомых величин.

Средние номинальные напряжения  $U_{\text{ср.ном.}}$ , кВ определяются следующим образом:

- для сетей напряжением до 220 кВ включительно

$$U_{\text{ср.ном.}} = 1,05 U_{\text{ном.}}, \quad (1)$$

- для сетей напряжением более 220 кВ

$$U_{\text{ср.ном.}} = 1,025 U_{\text{ном.}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение сети, взятое из шкалы номинальных напряжений, кВ.

## **2 Определеие параметров схемы замещения**

### **2.1 Расчёт в относительных единицах с использованием точного приведения**

При использовании относительных единиц и точного приведения необходимо:

- задаться базисной мощностью в МВА (чаще всего выбирают 100 МВА, либо 1000 МВА) и базисным напряжением для основной ступени в кВ;

- определить коэффициенты трансформации трансформаторов, расположенных между приводимым элементом и основной ступенью;

- вычислить значения ЭДС  $E_{*g}$  и сопротивление  $X_{*g}$  всех элементов при выбранных базисных условиях по формулам:

$$E_{*\bar{o}} = E_{*_{НОМ}} \frac{U_{НОМ}}{U_{\bar{o}}} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n), \quad (3)$$

$$X_{*\bar{o}} = X[ОМ] \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2, \quad (4)$$

$$X_{*\bar{o}} = X_{*_{НОМ}} \frac{I_{\bar{o}}}{I_{НОМ}} \frac{U_{НОМ}}{U_{\bar{o}}} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2, \quad (5)$$

$$X_{*\bar{o}} = X_{*_{НОМ}} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{НОМ}} \frac{U_{НОМ}^2}{U_{\bar{o}}^2} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n)^2, \quad (6)$$

где  $U_{\bar{o}}$  и  $I_{\bar{o}}$  – соответственно базисное напряжение, кВ и базисный ток, кА основной ступени напряжения;

$S_{\bar{o}}$  – базисная мощность, МВА;

$E_{*_{НОМ}}$  – ЭДС источника электроэнергии (генератора) при номинальных условиях, о.е., определяемая по формуле (7) (в приближённых расчётах можно использовать средние значения ЭДС из таблицы А1);

$S_{НОМ}$ ,  $U_{НОМ}$ ,  $I_{НОМ}$  – соответственно номинальная мощность, МВА, номинальное напряжение, кВ и номинальный ток, кА приводимого элемента;

$X$  – сопротивление элемента, заданное в именованных единицах, Ом;

$X_{*_{НОМ}}$  – сопротивление элемента, заданное в относительных единицах при номинальных условиях работы элемента;

$K_1, \dots, k_n$  – коэффициенты трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов, находящихся между приводимым элементом и основной ступенью напряжения.

Номинальная ЭДС генератора в о.е.:



$$E_{*НОМ}^{//} = \sqrt{(U_{*НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ})^2 + (U_{*НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} + I_{*НОМ} \cdot x_d^{//})^2}, \quad (7)$$

где  $U_{*НОМ}, I_{*НОМ}$  - относительные значения напряжения и тока предшествующего режима работы генератора, о.е. (принимаются равными 1);

$\cos \varphi_{НОМ}, \sin \varphi_{НОМ}$  - косинус и синус угла сдвига  $\varphi_{НОМ}$  между векторами напряжения и тока предшествующего режима;

$x_d^{//}$  - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора, о.е.

Формулу (4) следует использовать при определении сопротивления линий, формулу (5) – только для реакторов и формулу (6) – для генераторов, питающей системы (при известной суммарной мощности её генераторов), трансформаторов и обобщённых нагрузок.

Во всех приведенных выражениях в качестве относительного сопротивления  $X_{*НОМ}$  необходимо подставлять:

- для генераторов -  $x_d^{//}$ ;

- для питающей системы  $x_{*GS}^{//}$

- для обобщённой нагрузки -  $x_n^{//}$ ;

- для реакторов -  $x_L \%$ ;

- для трансформаторов двухобмоточных -  $\frac{u_k, \%}{100}$ ;

- для трансформаторов трёхобмоточных и

$$\text{автотрансформаторов} - \frac{u_{\text{кв}}, \%}{100}, \frac{u_{\text{кс}}, \%}{100} \quad \text{или} \quad \frac{u_{\text{кн}}, \%}{100}.$$

В последнем случае под значениями  $u_{\text{к}}$  понимаются напряжения короткого замыкания каждой обмотки в отдельности, которые рассчитываются через известные величины напряжений короткого замыкания между обмотками попарно по следующим выражениям:

$$U_{\text{кв}} = 0,5(U_{\text{кв-с}} + U_{\text{кв-н}} - U_{\text{кс-н}});$$

$$U_{\text{кс}} = 0,5(U_{\text{кв-с}} + U_{\text{кс-н}} - U_{\text{кв-н}});$$

$$U_{\text{кн}} = 0,5(U_{\text{кв-н}} + U_{\text{кс-н}} - U_{\text{кв-с}}).$$

В выражении (4) под величиной  $X[\text{Ом}]$  понимают сопротивление линии, определяемое по формуле:

$$x = x_0 \cdot l,$$

где  $x_0$  - погонное сопротивление линии,  $\frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ ,

$l$  - длина линии, км.

Из этих выражений следует, что истинные величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько трансформаторов или ступеней трансформации ( в случае двухтрансформаторных подстанций) расположено между приводимым элементом и основной ступенью напряжения.

*Под коэффициентом трансформации трансформаторов или автотрансформаторов (как повышающих, так и понижающих) понимают отношение междуфазного напряжения холостого хода обмотки со стороны основной ступени напряжения, к аналогичному*

*напряжению обмотки со стороны ступени, элементы которой подлежат приведению.*

## **2.2 Расчёт в именованных единицах с использованием точного приведения**

При использовании именованных единиц и точного приведения используются следующие выражения для фазной ЭДС (в кВ) и сопротивлений (в Ом):

$$E = E_{*ном}^{//} \cdot \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n); \quad (8)$$

$$x = x_{*ном} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n); \quad (9)$$

$$x = x_0 \cdot l \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n), \quad (10)$$

где  $E_{*ном}$  - относительная номинальная ЭДС элемента (генератора, питающей системы, двигателя или обобщённой нагрузки);

$U_{ном}$  - номинальное напряжение элемента, кВ;

$S_{*ном}$  - номинальная мощность элемента, МВА.

Выражение (9) позволяет определить сопротивление генераторов, компенсаторов, двигателей, обобщённой нагрузки, трансформаторов и питающей системы (при заданной суммарной номинальной мощности генераторов системы), а по выражению (10) находится сопротивление линий.

Выражения для определения сопротивлений различных элементов приведены также в приложении Б-2.

### 2.3 Расчёт в относительных единицах с использованием приближённого приведения

В расчётах, использующих приближённое приведение и выполняемых в относительных единицах, необходимо задаться базисной мощностью  $S_{\bar{o}}$ , МВА, а базисное напряжение выбрать равным среднему номинальному напряжению основной ступени. Тогда ЭДС и сопротивления элементов схемы можно определить по формулам:

$$E_{*\bar{o}} = E_{*_{НОМ}}, \quad (11)$$

$$X_{*\bar{o}} = X \frac{S_{\bar{o}}}{U_{cp}^2}, \quad (12)$$

$$X_{*\bar{o}} = X_{*_{НОМ}} \frac{I_{\bar{o}}}{I_{НОМ}}, \quad (13)$$

$$X_{*\bar{o}} = X_{*_{НОМ}} \frac{S_{\bar{o}}}{S_{НОМ}}, \quad (14)$$

где  $U_{cp}$  – среднее номинальное напряжение той ступени, где включён приводимый элемент, кВ.

Выражение (12) следует применять для линий, выражение (13) – для реакторов, выражение (14) – для трансформаторов, генераторов, питающей системы, двигателей и обобщённых нагрузок.

Выражения для конкретных элементов приведены в приложении Б-1.

## 2.4 Расчёт в именованных единицах с использованием приближённого приведения

При использовании именованных единиц и приближённого приведения используются следующие выражения для фазной ЭДС (в кВ) и сопротивлений (в Ом):

$$E = E_{*ном} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}}{\sqrt{3}}; \quad (15)$$

$$X = X_{*ном} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}^2}{S_{ном}}; \quad (16)$$

$$X = X_0 \cdot l \cdot \left( \frac{U_{ср.ном.осн.}}{U_{ср.ном}} \right)^2. \quad (17)$$

где  $E_{*ном}$  - относительная номинальная ЭДС элемента (генератора, питающей системы, двигателя или обобщённой нагрузки);

$X_{*ном}$  - относительное номинальное сопротивление элемента (генератора, питающей системы, двигателя, трансформатора или обобщённой нагрузки);

$U_{ср.ном.осн.}$  - среднее номинальное напряжение основной ступени напряжения, кВ;

$U_{ср.ном.}$  - среднее номинальное напряжение ступени, где подключен приводимый элемент, кВ;

$S_{ном}$  - номинальная мощность элемента, МВА.

Выражение (16) позволяет определить сопротивление генераторов, питающей системы, двигателей, обобщённой нагрузки и трансформаторов, а по выражению (17) находится сопротивление линий.

Выражения для определения сопротивлений различных элементов приведены также в приложении Б-1.

### 3 Примеры расчёта

#### 3.1 Составление схемы замещения

Расчётная схема электрической системы приведена на рисунке 1.

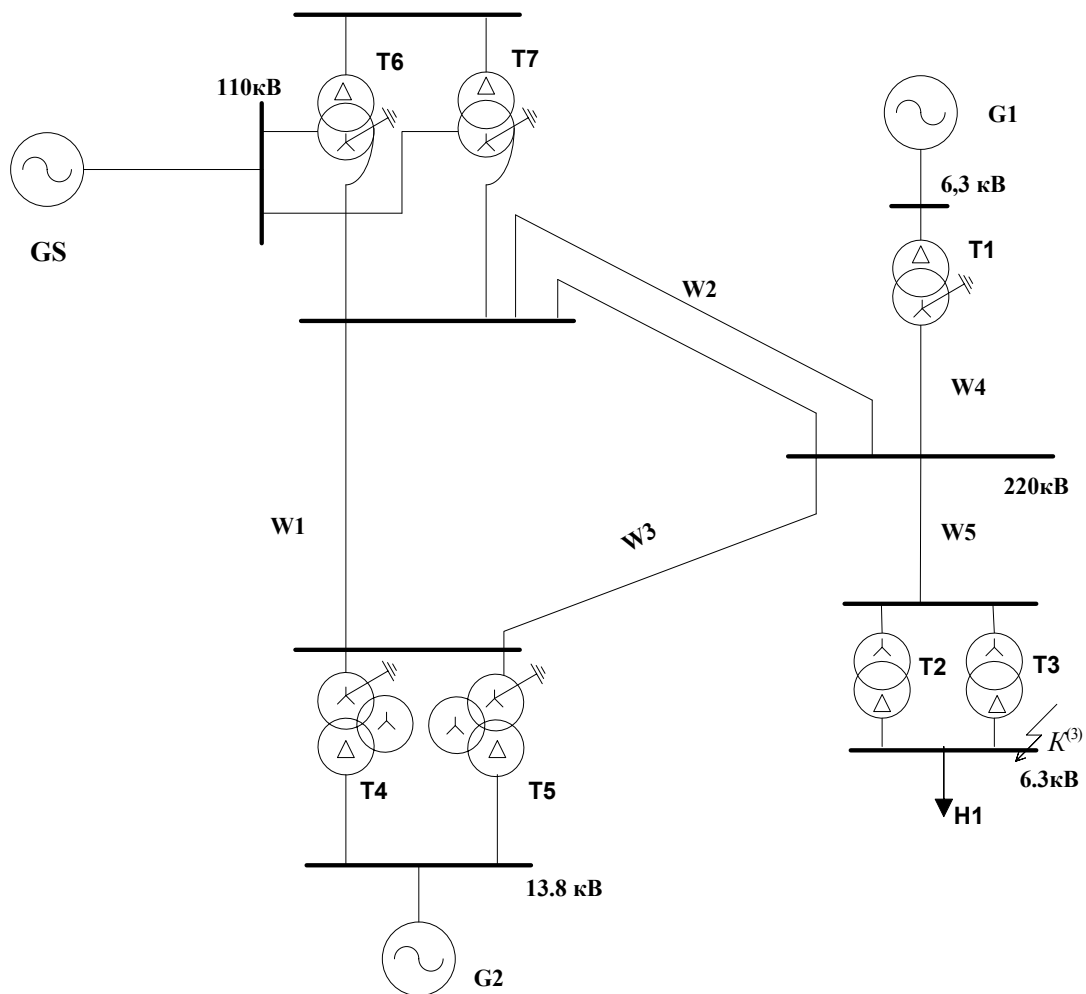


Рисунок 12 – Расчётная схема

Исходные данные:

Генераторы:

	$S_H$ (MBA)	$\cos \varphi_H$	$U_H$ (кВ)	$x_d^H$ (о.е.)
G1	62,5	0,8	6,3	0,13
G2	100	0,9	13,8	0,22

Трансформаторы:

	$S_H$ (MBA)	$U_H$ (кВ)			$U_K$ %		
		B	C	H	B-C	B-H	C-H
T-1	63	242	-	6,3	-	11	-
T-2,3	16	230	-	6,6	-	12	-
T-4,5	63	242	121	13,8	12,5	24	10.5
T-6,7	250	230	121	11	10,5	22	9,5

Линии:

	W1	W2	W3	W4	W5
L(км)	150	100	120	50	10

Нагрузка: H-1 S=22 MBA

Система:  $S_{HGS}=2600$  MBA  $x_{GS1}=0,3$  о.е.  $x_{GS0}=10$  Ом.

**Задание:**

*При КЗ в точке К<sup>(3)</sup> схемы определить ЭДС и сопротивления элементов в именованных и относительных единицах с использованием способов точного и приближённого приведения к основной ступени напряжения.*

Для составления схемы замещения необходимо условные графические обозначения элементов расчётной схемы заменить обозначениями сопротивлений (трансформаторы, линии) или сопротивлений и ЭДС (генераторы, питающая система и нагрузки), сохраняя конфигурацию

расчётной схемы. Сверхпереходный режим короткого замыкания учитывается сверхпереходными значениями ЭДС и сопротивлений генераторов и нагрузок. Составленная таким образом схема замещения приведена на рисунке 2.

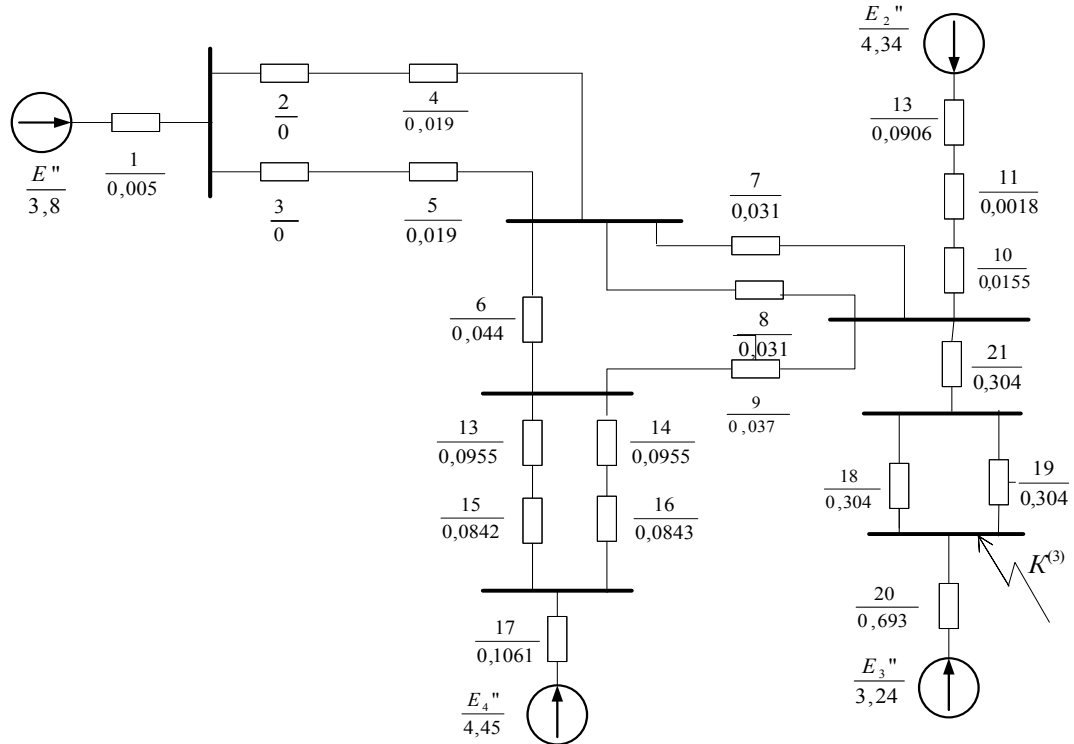


Рисунок 2 – Схема замещения

### 3.2 Расчёт в именованных единицах с использованием способа точного приведения

Параметры элементов схемы выражаются в именованных единицах с учетом действительных коэффициентов трансформации трансформаторов. За основную ступень принята ступень напряжения, где находится точка КЗ ( $U_{\text{осн}}=6,6$  кВ).

3.2.1 Определяются коэффициенты трансформации в соответствии с правилом, сформулированным в подразделе 2.1:

$$K_{T1} = U_B / U_H = 242 / 6.3 = 38.413;$$

$$K_{T2,3} = U_H / U_B = 6.6 / 230 = 0.028;$$

$$K_{T4,5} = U_B / U_H = 242 / 13.8 = 17.536;$$



$$K_{T6,7} = U_B / U_C = 230 / 121 = 1.9.$$

3.2.2 Определяются фазные ЭДС источников питания по выражению (8):

ЭДС питающей системы:

Значение номинальной ЭДС системы  $E_{*НОМ}^{//}$  принимается за 1,0.

$$E_1^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot (K_{T6} \cdot K_{T2}) = 1,0 \cdot \frac{121}{\sqrt{3}} \cdot 1,9 \cdot 0,028 = 3,8 \text{ кВ.}$$

ЭДС генераторов определяются, исходя из предположения, что генераторы до аварии работали в номинальном режиме. При этом значения номинальной ЭДС находятся в соответствии с выражением (7):

Для G-1:

$$E_{*НОМ}^{//} = \sqrt{(U_{*НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ})^2 + (U_{*НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} + I_{*НОМ} \cdot x_d^{//})^2} = \\ = \sqrt{(1,0 \cdot 0,8)^2 + (1,0 \cdot 0,6 + 1,0 \cdot 0,13)^2} = 1,08.$$

$$E_2^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2}) = 1,08 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot 38,413 \cdot 0,028 = 4,34 \text{ кВ.}$$

Для G-2:

$$E_{*НОМ}^{//} = \sqrt{(U_{*НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ})^2 + (U_{*НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} + I_{*НОМ} \cdot x_d^{//})^2} = \\ = \sqrt{(1,0 \cdot 0,9)^2 + (1,0 \cdot 0,44 + 1,0 \cdot 0,22)^2} = 1,11.$$

$$E_4^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} \cdot (K_{T4} \cdot K_{T2}) = 1,11 \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} \cdot 17,536 \cdot 0,028 = 4,45 \text{ кВ.}$$

Для нагрузки:

$$E_3^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} = 0,85 \cdot \frac{6,6}{\sqrt{3}} = 3,24 \text{ кВ.}$$

( $E_{*НОМ}^{//} = 0,85$  т.к. нагрузка генерирующая, поскольку подключена непосредственно в месте КЗ)

### 3.2.3 Определяются сопротивления элементов схемы

#### 3.2.3.1 Питающая система:

В соответствии с выражением (9)

$$x_1 = x_{*НОМ.GS} \cdot \frac{U_{НОМ.GS}^2}{S_{НОМ.GS}} (K_{T6} \cdot K_{T2})^2 = 0,3 \cdot \frac{121^2}{2600} \cdot (1,9 \cdot 0,028)^2 = 0,005 Ом.$$

#### 3.2.3.2 Линии электропередачи:

В соответствии с выражением (10)

$$x_6 = x_0 \cdot l_{w1} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 150 \cdot 0,028^2 = 0,044 Ом$$

$$x_7 = x_8 = x_0 \cdot l_{w2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot 0,028^2 = 0,031 Ом$$

$$x_9 = x_0 \cdot l_{w3} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot 0,028^2 = 0,037 Ом$$

$$x_{10} = x_0 \cdot l_{w4} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot 0,028^2 = 0,0155 Ом$$

$$x_{21} = x_0 \cdot l_{w5} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 10 \cdot 0,028^2 = 0,0033 Ом$$

В этих выражениях  $x_0 = 0,4 Ом/км$  - усредненное значение погонного сопротивления для воздушных линий [2].

#### 3.2.3.3 Автотрансформаторы $T_6$ , $T_7$ :

Сначала по известным выражениям определяются значения  $U_k$ , % для каждой из обмоток:

$$U_{KB} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H}) = 0,5(10,5 + 22 - 9,5) = 11,5\%.$$

$$U_{KC} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H}) = 0,5(10,5 + 0,5 - 22) = -1,0\%.$$

$$U_{KH} = 0,5 \times (U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C}) = 0,5(22 + 9,5 - 10,5) = 10,5\%.$$

Так как через обмотки низшего напряжения автотрансформаторов  $T_6$  и  $T_7$  ток КЗ не протекает (нагрузка отсутствует), эти обмотки не включены в схему замещения. Поскольку сопротивления обмоток среднего напряжения

этих же автотрансформаторов емкостного характера ( $U_{кс} = -1,0\%$ ), ими пренебрегают (принимают равными нулю в силу принятых допущений [1,6])

$$x_2 = x_3 = 0.$$

Далее по формуле (9) находятся сопротивления обмоток высшего напряжения, включенных в схему замещения:

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{н.о.м.С}^2}{S_{н.о.м.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{230^2}{250} \cdot 0,028^2 = 0,019 \text{ Ом.}$$

3.2.3.4 Трансформатор  $T_1$ :

$$x_{11} = \frac{u_{к}}{100} \cdot \frac{U_{н.о.м.}^2}{S_{н.о.м.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{242^2}{63} \cdot 0,028^2 = 0,078 \text{ Ом.}$$

3.2.3.5 Трансформаторы  $T_4, T_5$  (аналогично  $T_6, T_7$ ):

$$U_{кВ} = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%;$$

$$U_{кС} = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = -0,5\%;$$

$$U_{кН} = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%;$$

Так как через обмотки среднего напряжения трансформаторов  $T_4, T_5$  ток КЗ не протекает (работают на холостом ходу), эти обмотки не включены в схему замещения.

$$x_{13} = x_{14} = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{н.о.м.В}^2}{S_{н.о.м.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \frac{13}{100} \cdot \frac{242^2}{63} \cdot 0,028^2 = 0,0995 \text{ Ом.}$$

$$x_{15} = x_{16} = \frac{u_{кН}}{100} \cdot \frac{U_{н.о.м.Н}^2}{S_{н.о.м.Т}} \cdot (K_{Т4} \cdot K_{Т2})^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{13,8^2}{63} (17,536 \cdot 0,028)^2 = 0,0842 \text{ Ом.}$$

### 3.2.3.6 Трансформаторы T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>:

$$x_{18} = x_{19} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НОМ.}}^2}{S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6,6^2}{16} = 0,327 \text{ Ом.}$$

### 3.2.3.7 Нагрузка Н<sub>1</sub>:

Сверхпереходное номинальное индуктивное сопротивление обобщённой нагрузки  $x_{* \text{НОМ.Н}}$  принимается равным значению 0,35 в о.е.

$$x_{20} = x_{* \text{НОМ.Н}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ.Н}}^2}{S_{\text{НОМ.Н}}} = 0,35 \cdot \frac{6,6^2}{22} = 0,693 \text{ Ом.}$$

### 3.2.3.8 Генераторы:

Генератор G1:

$$x_{12} = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{НОМ.G1}}^2}{S_{\text{НОМ.G1}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2})^2 = 0,3 \cdot \frac{6,3^2}{62,5} (38,14 \cdot 0,028)^2 = 0,217 \text{ Ом.}$$

Генератор G2:

$$x_{17} = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{НОМ.G2}}^2}{S_{\text{НОМ.G2}}} \cdot (K_{T4} \cdot K_{T2})^2 = 0,22 \cdot \frac{13,8^2}{100} (17,536 \cdot 0,028)^2 = 0,106 \text{ Ом.}$$

## 3.3 Расчёт в именованных единицах с использованием способа приближённого приведения

Выбирается среднее номинальное напряжение основной ступени – 6,3 кВ.

3.3.1 Определяются фазные ЭДС источников питания по выражению (15):

ЭДС питающей системы:

Значение номинальной ЭДС системы  $E_{*НОМ}^{//}$  принимается за 1,0.

$$E_1^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{ср.НОМ.ОСН}}{\sqrt{3}} = 1,0 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,637 \text{ кВ.}$$

ЭДС генераторов определяются, исходя из предположения, что генераторы до аварии работали в номинальном режиме. При этом значения номинальной ЭДС находятся в соответствии с выражением (7):

Для G-1:

$$\begin{aligned} E_{*НОМ}^{//} &= \sqrt{(U_{*НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ})^2 + (U_{*НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} + I_{*НОМ} \cdot x_d^{//})^2} = \\ &= \sqrt{(1,0 \cdot 0,8)^2 + (1,0 \cdot 0,6 + 1,0 \cdot 0,13)^2} = 1,08. \end{aligned}$$

$$E_2^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{ср.НОМ.ОСН}}{\sqrt{3}} = 1,08 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,928 \text{ кВ.}$$

Для G-2:

$$\begin{aligned} E_{*НОМ}^{//} &= \sqrt{(U_{*НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ})^2 + (U_{*НОМ} \cdot \sin \varphi_{НОМ} + I_{*НОМ} \cdot x_d^{//})^2} = \\ &= \sqrt{(1,0 \cdot 0,9)^2 + (1,0 \cdot 0,44 + 1,0 \cdot 0,22)^2} = 1,11. \end{aligned}$$

$$E_4^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{ср.НОМ.ОСН}}{\sqrt{3}} = 1,11 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 4,037 \text{ кВ.}$$

Для нагрузки:

$$E_3^{//} = E_{*НОМ}^{//} \cdot \frac{U_{ср.НОМ.ОСН}}{\sqrt{3}} = 0,85 \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3}} = 3,092 \text{ кВ.}$$

( $E_{*НОМ}^{//} = 0,85$  т.к. нагрузка генерирующая, поскольку подключена непосредственно в месте КЗ)

### 3.3.2 Определяются сопротивления элементов схемы

#### 3.3.2.1 Питающая система:

В соответствии с выражением (16)

$$x_1 = x_{*н.м.гс} \cdot \frac{U_{ср.н.м.осн}^2}{S_{н.м.гс}} = 0,3 \cdot \frac{6,3^2}{2600} = 0,00458 \text{ Ом.}$$

### 3.3.2.2 Линии электропередачи:

В соответствии с выражением (17)

$$X_6 = X_0 \cdot l_{w1} \cdot \left( \frac{U_{ср.н.м.осн.}}{U_{ср.н.м.w1}} \right)^2 = 0,4 \cdot 150 \cdot \left( \frac{6,3}{230} \right)^2 = 0,045 \text{ Ом}$$

$$x_7 = x_8 = x_0 \cdot l_{w2} \cdot \left( \frac{U_{ср.н.м.осн.}}{U_{ср.н.м.w2}} \right)^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot \left( \frac{6,3}{230} \right)^2 = 0,03 \text{ Ом}$$

$$X_9 = X_0 \cdot l_{w3} \cdot \left( \frac{U_{ср.н.м.осн.}}{U_{ср.н.м.w3}} \right)^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot \left( \frac{6,3}{230} \right)^2 = 0,036 \text{ Ом}$$

$$X_{10} = X_0 \cdot l_{w4} \cdot \left( \frac{U_{ср.н.м.осн.}}{U_{ср.н.м.w4}} \right)^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot \left( \frac{6,3}{230} \right)^2 = 0,015 \text{ Ом}$$

$$X_{21} = X_0 \cdot l_{w5} \cdot \left( \frac{U_{ср.н.м.осн.}}{U_{ср.н.м.w5}} \right)^2 = 0,4 \cdot 10 \cdot \left( \frac{6,3}{230} \right)^2 = 0,003 \text{ Ом}$$

В этих выражениях  $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$  - усредненное значение погонного сопротивления для воздушных линий [6].

### 3.3.2.3 Автотрансформаторы Т<sub>6</sub>, Т<sub>7</sub>:

Сначала по известным выражениям определяются значения  $U_k$  в % для каждой из обмоток:

$$U_{кв} = 0,5 \times (U_{кв-с} + U_{кв-н} - U_{кс-н}) = 0,5(10,5 + 22 - 9,5) = 11,5\%.$$

$$U_{кс} = 0,5 \times (U_{кв-с} + U_{кс-н} - U_{кв-н}) = 0,5(10,5 + 0,5 - 22) = -1,0\%.$$

$$U_{кн} = 0,5 \times (U_{кв-н} + U_{кс-н} - U_{кв-с}) = 0,5(22 + 9,5 - 10,5) = 10,5\%.$$

Так как через обмотки низшего напряжения автотрансформаторов Т<sub>6</sub>, Т<sub>7</sub> ток КЗ не протекает (нагрузка отсутствует), эти обмотки не включены в схему замещения. Поскольку сопротивления обмоток среднего напряжения

этих же автотрансформаторов емкостного характера ( $U_{кс} = -1,0\%$ ), ими пренебрегают (принимают равными нулю в силу принятых допущений [2,5] )

$$x_2 = x_3 = 0.$$

Далее по формуле (9) находятся сопротивления обмоток высшего напряжения, включенных в схему замещения:

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{250} = 0,0182 Ом.$$

3.3.2.4 Трансформатор  $T_1$ :

$$x_{11} = \frac{u_{к}}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{6,3^2}{63} = 0,0693 Ом.$$

3.3.2.5 Трансформаторы  $T_4, T_5$  (аналогично  $T_6, T_7$ ):

$$U_{кВ} = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%;$$

$$U_{кС} = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = -0,5\%;$$

$$U_{кН} = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%;$$

Так как через обмотки среднего напряжения трансформаторов  $T_4, T_5$  ток КЗ не протекает (работают на холостом ходу), эти обмотки не включены в схему замещения.

$$x_{13} = x_{14} = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{6,3^2}{63} = 0,0819 Ом.$$

$$x_{15} = x_{16} = \frac{u_{кН}}{100} \cdot \frac{U_{ср.ном.осн.}^2}{S_{ном.Т}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{6,3^2}{63} = 0,0693 Ом.$$

### 3.3.2.6 Трансформаторы Т<sub>2</sub>, Т<sub>3</sub>:

$$x_{18} = x_{19} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном.осн.}}^2}{S_{\text{ном.Т}}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6,3^2}{16} = 0,297 \text{ Ом.}$$

### 3.3.2.7 Нагрузка Н<sub>1</sub>:

Сверхпереходное номинальное индуктивное сопротивление обобщённой нагрузки  $x_{* \text{ном.Н}}$  принимается равным значению 0,35 в о.е.

$$x_{20} = x_{* \text{ном.Н}} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном.осн.}}^2}{S_{\text{ном.Н}}} = 0,35 \cdot \frac{6,3^2}{22} = 0,631 \text{ Ом.}$$

### 3.3.2.8 Генераторы:

Генератор G1:

$$x_{12} = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{ср.ном.осн.}}^2}{S_{\text{ном.G1}}} = 0,3 \cdot \frac{6,3^2}{62,5} = 0,1905 \text{ Ом.}$$

Генератор G2:

$$x_{17} = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{ср.ном.осн.}}^2}{S_{\text{ном.G2}}} = 0,22 \cdot \frac{6,3^2}{100} = 0,0873 \text{ Ом.}$$

## 3.4 Расчёт в относительных единицах с использованием способа точного приведения

При выполнении расчётов в относительных единицах необходимо определиться с базисными условиями. В качестве базисной мощности выбирается значение  $S_{\sigma} = 1000 \text{ МВА}$ , а базисное напряжение принимается равным предшествующему напряжению в месте возникновения КЗ, т.е.  $U_{\sigma} = 6,6 \text{ кВ}$ .



3.4.1 Коэффициенты трансформации, необходимые для приведения, определены ранее в п. 3.2.1:

$$K_{T1} = U_B / U_H = 242 / 6.3 = 38.413;$$

$$K_{T2,3} = U_H / U_B = 6.6 / 230 = 0.028;$$

$$K_{T4,5} = U_B / U_H = 242 / 13.8 = 17.536;$$

$$K_{T6,7} = U_B / U_C = 230 / 121 = 1.9.$$

3.4.2 Относительные значения номинальных ЭДС источников питания и нагрузки определены в п. 3.2.2 :

$$\text{ЭДС питающей системы } E''_{*НОМ.GS} = 1,0.$$

$$\text{ЭДС генератора } G_1 \quad E''_{*НОМ.G1} = 1,08.$$

$$\text{ЭДС генератора } G_2 \quad E''_{*НОМ.G2} = 1,11.$$

$$\text{ЭДС нагрузки } H_1 \quad E''_{*НОМ.H1} = 0,85.$$

Приведенные значения ЭДС находятся по выражению (3):

ЭДС питающей системы

$$E''_1 = E''_{*НОМ.GS} \cdot \frac{U_{НОМ.GS}}{U_6} \cdot (K_{T6} \cdot K_{T2}) = 1,0 \cdot \frac{121}{6,6} \cdot 1,9 \cdot 0,028 = 0,975.$$

ЭДС генератора  $G_1$

$$E''_2 = E''_{*НОМ.G1} \cdot \frac{U_{НОМ.G1}}{U_6} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2}) = 1,08 \cdot \frac{6,3}{6,6} \cdot 38,413 \cdot 0,028 = 1,109.$$

ЭДС генератора  $G_2$

$$E''_4 = E''_{*НОМ.G2} \cdot \frac{U_{НОМ.G2}}{U_6} \cdot (K_{T4} \cdot K_{T2}) = 1,11 \cdot \frac{13,8}{6,6} \cdot 17,536 \cdot 0,028 = 1,139.$$

ЭДС нагрузки  $H_1$

$$E''_3 = E''_{*НОМ.H1} \cdot \frac{U_{НОМ.H1}}{U_6} = 0,85 \cdot \frac{6,6}{6,6} = 0,85.$$

3.4.3 Определяются сопротивления элементов схемы

3.4.3.1 Питающая система:

В соответствии с выражением (6)

$$x_1 = x_{*HO.M.GS} \cdot \frac{U_{HO.M.GS}^2}{U_{\bar{6}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{HO.M.GS}} (K_{T6} \cdot K_{T2})^2 =$$

$$= 0,3 \cdot \frac{121^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{2600} (1,9 \cdot 0,028)^2 = 0,11.$$

#### 3.4.3.2 Линии электропередачи:

В соответствии с выражением (4)

$$x_6 = x_0 \cdot l_{w1} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{1000}{6,6^2} \cdot 0,028^2 = 1,08.$$

$$x_7 = x_8 = x_0 \cdot l_{w2} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{6,6^2} \cdot 0,028^2 = 0,72.$$

$$x_9 = x_0 \cdot l_{w3} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{1000}{6,6^2} \cdot 0,028^2 = 0,864.$$

$$x_{10} = x_0 \cdot l_{w4} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{6,6^2} \cdot 0,028^2 = 0,36.$$

$$x_{21} = x_0 \cdot l_{w5} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} \cdot K_{T2}^2 = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{6,6^2} \cdot 0,028^2 = 0,072.$$

В этих выражениях  $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$  - усредненное значение погонного сопротивления для воздушных линий [6].

#### 3.4.3.3 Автотрансформаторы $T_6, T_7$ :

Сначала по известным выражениям определяются значения  $U_k$  в % для каждой из обмоток:

$$U_{KB} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H}) = 0,5(10,5 + 22 - 9,5) = 11,5\%.$$

$$U_{KC} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H}) = 0,5(10,5 + 0,5 - 22) = -1,0\%.$$

$$U_{KH} = 0,5 \times (U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C}) = 0,5(22 + 9,5 - 10,5) = 10,5\%.$$

Так как через обмотки низшего напряжения автотрансформаторов  $T_6, T_7$  ток КЗ не протекает (нагрузка отсутствует), эти обмотки не включены в схему замещения. Поскольку сопротивления обмоток среднего напряжения

этих же автотрансформаторов емкостного характера ( $U_{кс} = -1,0\%$ ), ими пренебрегают (принимают равными нулю в силу принятых допущений [2,5] )

$$x_2 = x_3 = 0.$$

Далее по формуле (6) находятся сопротивления обмоток высшего напряжения, включенных в схему замещения:

$$\begin{aligned} x_4 = x_5 &= \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ.В}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \\ &= \frac{11,5}{100} \cdot \frac{230^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{250} \cdot 0,028^2 = 0,438. \end{aligned}$$

3.4.3.4 Трансформатор  $T_1$ :

$$\begin{aligned} x_{11} &= \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{НОМ.}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \\ &= \frac{11}{100} \cdot \frac{242^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{63} \cdot 0,028^2 = 1,84. \end{aligned}$$

3.4.3.5 Трансформаторы  $T_4, T_5$  (аналогично  $T_6, T_7$ ):

$$U_{кВ} = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%;$$

$$U_{кС} = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = -0,5\%;$$

$$U_{кН} = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%;$$

Так как через обмотки среднего напряжения трансформаторов  $T_4, T_5$  ток КЗ не протекает (работают на холостом ходу), эти обмотки не включены в схему замещения.

$$\begin{aligned}
x_{13} = x_{14} &= \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ.В}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \\
&= \frac{13}{100} \cdot \frac{242^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{63} \cdot 0,028^2 = 2,175. \\
x_{15} = x_{16} &= \frac{u_{кН}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ.Н}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Т}} \cdot (K_{Т4}^2 \cdot K_{Т2}^2 = \\
&= \frac{11}{100} \cdot \frac{13,8^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{63} \cdot (17,536^2 \cdot 0,028^2) = 1,84.
\end{aligned}$$

3.4.3.6 Трансформаторы Т<sub>2</sub>, Т<sub>3</sub>:

$$\begin{aligned}
x_{18} = x_{19} &= \frac{u_{к}}{100} \cdot \frac{U_{НОМ.}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Т}} \cdot K_{Т2}^2 = \\
&= \frac{11}{100} \cdot \frac{230^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{16} \cdot 0,028^2 = 6,54.
\end{aligned}$$

3.4.3.7 Нагрузка Н<sub>1</sub>:

Сверхпереходное номинальное индуктивное сопротивление обобщённой нагрузки  $x_{*НОМ.Н}$  принимается равным значению 0,35 в о.е.

$$x_{20} = x_{*НОМ.Н} \cdot \frac{U_{НОМ.Н}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ.Н}} = 0,35 \cdot \frac{6,6^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{22} = 15,91.$$

3.4.3.8 Генераторы:

Генератор G1:

$$x_{12} = x_d'' \cdot \frac{U_{НОМ.G1}^2}{U_{\bar{0}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{0}}}{S_{НОМ.G1}} (K_{T1} \cdot K_{T2})^2 =$$

$$= 0,3 \cdot \frac{6,3^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{62,5} (38,14 \cdot 0,028)^2 = 4,978.$$

Генератор G2:

$$x_{17} = x_d'' \cdot \frac{U_{НОМ.G2}^2}{U_{\bar{0}}^2} \cdot \frac{S_{\bar{0}}}{S_{НОМ.G2}} (K_{T4} \cdot K_{T2})^2 =$$

$$= 0,22 \cdot \frac{13,8^2}{6,6^2} \cdot \frac{1000}{100} (17,536 \cdot 0,028)^2 = 2,319.$$

### 3.5 Расчёт в относительных единицах с использованием способа приближённого приведения

В отличие от предыдущего расчёта при использовании приближённого приведения за базисное напряжение принимается среднее номинальное напряжение в режиме, предшествовавшем КЗ, т.е.  $U_{\bar{0}cp.} = 6,3кВ$ , а коэффициенты трансформации в явном виде не используются.

3.5.1. Значения ЭДС источников питания и нагрузки определяются по выражению (11):

$$\text{ЭДС питающей системы } E_1'' = E_{*НОМ.GS}'' = 1,0.$$

$$\text{ЭДС генератора } G_1 \quad E_2'' = E_{*НОМ.G1}'' = 1,08.$$

$$\text{ЭДС генератора } G_2 \quad E_4'' = E_{*НОМ.G2}'' = 1,11.$$

$$\text{ЭДС нагрузки } H_1 \quad E_3'' = E_{*НОМ.H1}'' = 0,85.$$

3.5.2 Определяются сопротивления элементов схемы

3.5.2.1 Питающая система

По выражению (14)

$$x_1 = x_{*HO.M.GS} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{HO.M.GS}} = 0,3 \cdot \frac{1000}{2600} = 0,115.$$

### 3.5.2.2 Линии электропередачи

В соответствии с выражением (12)

$$x_6 = x_0 \cdot l_{w1} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{w.cp.}^2} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,134.$$

$$x_7 = x_8 = x_0 \cdot l_{w2} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{w.cp.}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,756.$$

$$x_9 = x_0 \cdot l_{w3} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{w.cp.}^2} = 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,907.$$

$$x_{10} = x_0 \cdot l_{w4} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{w.cp.}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,378.$$

$$x_{21} = x_0 \cdot l_{w5} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{w.cp.}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,0756.$$

### 3.5.2.3 Автотрансформаторы Т<sub>6</sub>, Т<sub>7</sub>:

Сначала по известным выражениям определяются значения  $U_k$  в % для каждой из обмоток:

$$U_{KB} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KB-H} - U_{KC-H}) = 0,5(10,5 + 22 - 9,5) = 11,5\%.$$

$$U_{KC} = 0,5 \times (U_{KB-C} + U_{KC-H} - U_{KB-H}) = 0,5(10,5 + 0,5 - 22) = -1,0\%.$$

$$U_{KH} = 0,5 \times (U_{KB-H} + U_{KC-H} - U_{KB-C}) = 0,5(22 + 9,5 - 10,5) = 10,5\%.$$

Так как через обмотки низшего напряжения автотрансформаторов Т<sub>6</sub>, Т<sub>7</sub> ток КЗ не протекает (нагрузка отсутствует), эти обмотки не включены в схему замещения. Поскольку сопротивления обмоток среднего напряжения

этих же автотрансформаторов емкостного характера ( $U_{кс} = -1,0\%$ ), ими пренебрегают (принимают равными нулю в силу принятых допущений [2,5] )

$$x_2 = x_3 = 0.$$

Далее по формуле (14) находятся сопротивления обмоток высшего напряжения, включенных в схему замещения:

$$x_4 = x_5 = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.о.м.Т}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,46.$$

3.5.2.4 Трансформатор  $T_1$ :

$$x_{11} = \frac{u_{к}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.о.м.Т}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,746.$$

3.5.2.5 Трансформаторы  $T_4, T_5$  (аналогично  $T_6, T_7$ ):

$$U_{кВ} = 0,5(12,5 + 24 - 10,5) = 13\%;$$

$$U_{кС} = 0,5(12,5 + 10,5 - 24) = -0,5\%;$$

$$U_{кН} = 0,5(24 + 10,5 - 12,5) = 11\%;$$

Так как через обмотки среднего напряжения трансформаторов  $T_4, T_5$  ток КЗ не протекает (работают на холостом ходу), эти обмотки не включены в схему замещения.

$$x_{13} = x_{14} = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.о.м.Т}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 2,063.$$

$$x_{15} = x_{16} = \frac{u_{кН}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н.о.м.Т}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{63} = 1,746.$$

### 3.5.2.6 Трансформаторы T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>:

$$x_{18} = x_{19} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{16} = 6,875.$$

### 3.5.2.7 Нагрузка Н<sub>1</sub>:

Сверхпереходное номинальное индуктивное сопротивление обобщённой нагрузки  $x_{*\text{НОМ.Н}}$  принимается равным значению 0,35 в о.е.

$$x_{20} = x_{*\text{НОМ.Н}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{НОМ.Н}}} = 0,35 \cdot \frac{1000}{22} = 15,91.$$

### 3.5.2.8 Генераторы:

Генератор G1:

$$x_{12} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{НОМ.G1}}} = 0,3 \cdot \frac{1000}{62,5} = 4,8.$$

Генератор G2:

$$x_{17} = x_d'' \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{НОМ.G2}}} = 0,22 \cdot \frac{1000}{100} = 2,2.$$



## Список использованных источников

1 Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов/ И.П.Крючков, В.А.Старшинов, Ю.П.Гусев, М.В.Пираторов; под ред. И.П.Крючкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с.

2 Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ И.П.Крючков и [др.], под ред. И.П.Крючкова и В.А.Старшинова . – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 567 с.

3 Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 552735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.-М.: Стандартиформ, 2007.

4 Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/ Под ред. Б.Н.Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

5 Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/С.А.Ульянов.- М.: Энергия, 1970. – 519 с ;

6 Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов: учебное пособие / В.М.Блок и [др.], под ред. В.М.Блок. – М. : Высш. шк., 1990 .– 383 с.

## Приложение А (справочное)

### Средние значения сверхпереходных сопротивлений и ЭДС элементов

Таблица А.1

Наименование элемента	$X''_*$	$E''_{*0}$
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0.125	1.08
То же мощностью от 100 до 500 МВт	0.2	1.13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0.2	1.13
То же без демпферных обмоток	0.27	1.18
Синхронный двигатель	0.2	1.1
Синхронный компенсатор	0.2	1.2
Асинхронный двигатель	0.2	0.9
Обобщенная нагрузка	0.35	0.85

П р и м е ч а н и е – Все значения приведены в относительных единицах при номинальных условиях работы элементов

## Приложение Б (справочное)

### Выражения для определения сопротивлений

Таблица Б.1 – Приближенное приведение

Наименование элемента	В именованных единицах	В относительных единицах
Любая синхронная или асинхронная машина, обобщенная нагрузка	$X'' = X''_* \frac{U_{\text{ср.н.о.м}}^2}{S_{\text{н.о.м}}}$	$X''_{*\bar{\sigma}} = X''_* \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{\text{н.о.м}}}$
Трансформатор	$X_T = \frac{U_{k\%} U_{\text{ср.н.о.м}}^2}{100 S_{T_{\text{н.о.м}}}}$	$X_{T*\bar{\sigma}} = \frac{U_{k\%} S_{\bar{\sigma}}}{100 S_{T_{\text{н.о.м}}}}$
Реактор	$X_L = \frac{X_{L\%} U_{L_{\text{н.о.м}}}}{100 \sqrt{3} I_{L_{\text{н.о.м}}}}$	$X_{L*\bar{\sigma}} = \frac{X_{L\%} I_{\bar{\sigma}} U_{L_{\text{н.о.м}}}}{100 I_{L_{\text{н.о.м}}} U_{\text{ср.н.о.м}}}$
Воздушная или кабельная линия	$X_W = X_{01} L$ $R_W = R_{01} L$	$X_{W*\bar{\sigma}} = X_{01} L \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\text{ср.н.о.м}}^2}$ $R_{W*\bar{\sigma}} = R_{01} L \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\text{ср.н.о.м}}^2}$
Система: - при известном токе КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{\text{ср.н.о.м}}}{\sqrt{3} I_{kGS}''}$	$X_{GS*\bar{\sigma}} = \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{kGS}''}$
- при известной мощности КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{\text{ср.н.о.м}}^2}{S_{kGS}''}$	$X_{GS*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{kGS}''}$

Таблица Б.2 – Точное приведение

Наименование элемента	В именованных единицах	В относительных единицах
Любая синхронная или асинхронная машина, обобщенная нагрузка	$X'' = X''_* \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X''_{*\bar{\sigma}} = X''_* \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{НОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Трансформатор	$X_T = \frac{U_{k\%} U_{НОМ}^2}{100 S_{ТНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{T*\bar{\sigma}} = \frac{U_{k\%} S_{\bar{\sigma}}}{100 S_{ТНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Реактор	$X_L = \frac{X_{L\%} U_{ЛНОМ}}{100 \sqrt{3} I_{ЛНОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{L*\bar{\sigma}} = \frac{X_{L\%} I_{\bar{\sigma}} U_{ЛНОМ}}{100 I_{ЛНОМ} U_{НОМ}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Воздушная или кабельная линия	$X_W = X_{01} L \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $R_W = R_{01} L \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{W*\bar{\sigma}} = X_{01} L \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{НОМ}^2} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$ $R_{W*\bar{\sigma}} = R_{01} L \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{НОМ}^2} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
Система: - при известном токе КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} I_{kGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{GS*\bar{\sigma}} = \frac{I_{\bar{\sigma}}}{I_{kGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$
- при известной мощности КЗ	$X_{GS} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{kGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$	$X_{GS*\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{kGS}} \prod_{i=1}^n \kappa_i^2$

## Приложение В

### Сравнение результатов расчёта параметров схемы замещения

Таблица В.1 – Расчётные значения ЭДС и сопротивлений элементов

Название элемента	Обознач. элемента в схеме замещения	Система именованных единиц		Система относительных единиц	
		Точное приведение	Приближённое приведение	Точное приведение	Приближённое приведение
1	2	3	4	5	6
Питающая система GS	$E_1''$	3,8	3,637	0,975	1,0
	$x_1$	0,005	0,00458	0,11	0,115
Генератор G <sub>1</sub>	$E_2''$	4,34	3,928	1,109	1,08
	$x_{12}$	0,217	0,1905	4,978	4,8
Генератор G <sub>2</sub>	$E_4''$	4,45	4,037	1,139	1,11
	$x_{17}$	0,106	0,0873	2,319	2,2
Нагрузка Н <sub>1</sub>	$E_3''$	3,24	3,092	0,85	0,85
	$x_{20}$	0,693	0,631	15,91	15,91
Линия W <sub>1</sub>	$x_6$	0,045	0,045	1,08	1,134
Линия W <sub>2</sub>	$x_7$	0,031	0,03	0,72	0,756
	$x_8$	0,031	0,03	0,72	0,756

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6
Линия W <sub>3</sub>	$x_9$	0,037	0,036	0,864	0,907
Линия W <sub>4</sub>	$x_{10}$	0,0155	0,015	0,36	0,378
Линия W <sub>5</sub>	$x_{21}$	0,0033	0,003	0,072	0,0756
Трансформаторы T <sub>6</sub> , T <sub>7</sub>	$x_4$	0,019	0,0182	0,438	0,46
	$x_5$	0,019	0,0182	0,438	0,46
Трансформатор T <sub>1</sub>	$x_{11}$	0,078	0,0693	1,84	1,746
Трансформаторы T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub>	$x_{13}$	0,0995	0,0819	2,175	2,063
	$x_{14}$	0,0995	0,0819	2,175	2,063
	$x_{15}$	0,0842	0,0693	1,84	1,746
	$x_{16}$	0,0842	0,0693	1,84	1,746
Трансформаторы T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub>	$x_{18}$	0,327	0,297	6,54	6,875
	$x_{19}$	0,327	0,297	6,54	6,875

## Приложение Г

### Образец задания на контрольную работу

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Электроэнергетический факультет  
Кафедра электро- и теплоэнергетики

### Задание на контрольную работу

«Определение параметров схемы замещения»

Вариант № \_\_\_\_\_

Исходные данные:

- 1 Расчётная схема;
- 2 Таблицы параметров элементов расчётной схемы.

Перечень подлежащих разработке вопросов:

- 1 Составить схему замещения сверхпереходного режима трёхфазного короткого замыкания в заданной точке;
- 2 Определить параметры элементов схемы замещения в именованных и относительных единицах:
  - 2.1 с использованием точного приведения;
  - 2.2 с использованием приближённого приведения;
- 3 Составить сравнительную таблицу результатов расчёта.

Дата выдачи задания “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г

Исполнитель

студент группы \_\_\_\_\_ шифр группы \_\_\_\_\_ подпись \_\_\_\_\_ / И.О. Фамилия /

## Приложение Д

### Образец титульного листа

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Электроэнергетический факультет  
Кафедра электро- и теплоэнергетики

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

по дисциплине “Электромагнитные переходные процессы в  
электроэнергетических системах”

Определение параметров схемы замещения

ОГУ 13.03.02. 40XX. XXX. О

Исполнитель:

студент группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ И.И. Иванов

"\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Оренбург 20\_\_