

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФБГОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»  
Кафедра энергообеспечения предприятий и энергосбережения

Н. А. Кулдин

**РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ»

Петрозаводск  
2020

## **ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Курсовая работа выполняется на одной стороне белой бумаги стандартного формата А4 (210 × 297) на компьютере. Размер компьютерного шрифта – 14, межстрочный интервал – одинарный. На листах оставляются поля: слева и сверху – не менее 20 мм., справа и снизу – не менее 10 мм. Все страницы текста, кроме титульного листа, должны иметь сквозную нумерацию.

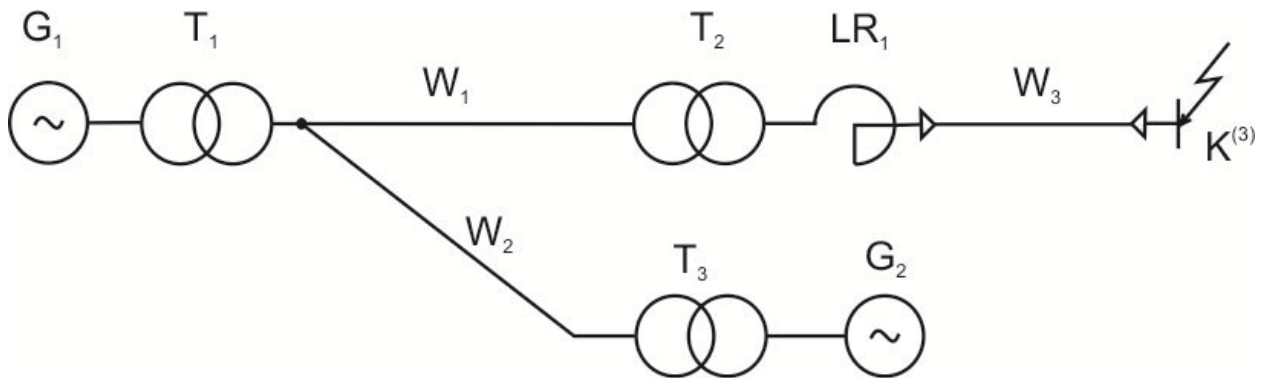
Курсовая работа должна иметь: титульный лист, вариант задания с изображением расчетной схемы, необходимые расчеты и пояснения, схему замещения и все ее преобразования, список используемой литературы и соответствующие ссылки на нее.

Форма титульного листа курсовой работы размещена на странице кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения.

## Задание №1

При трехфазном КЗ определить ток короткого замыкания в точке короткого замыкания **К**. Схему замещения составить двумя способами: точным и упрощенным.

### Расчетная схема



### Данные для расчета Задания №1

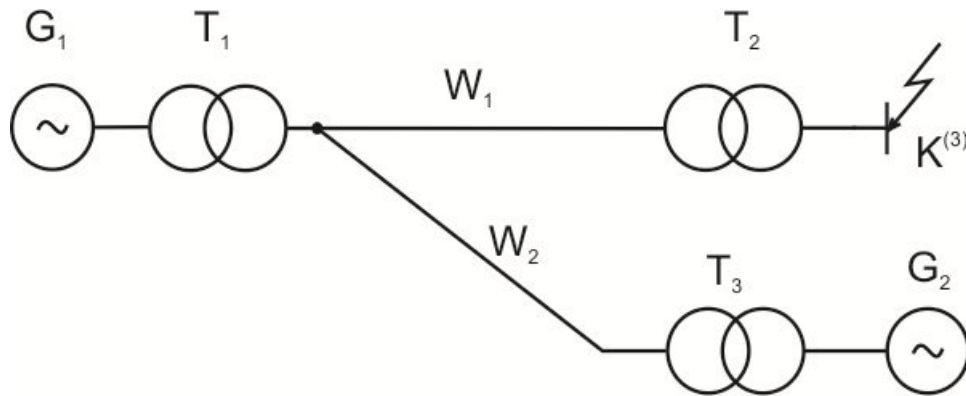
№ Вар.	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	LR <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	Базисная ступень
1	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1200А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=3 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>1</sub>
2	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1200А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=3 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>2</sub>
3	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1200А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=3 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	точка К
4	S=62,5 МВА; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1000А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=5 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>1</sub>
5	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=62,5 МВА; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1000А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=5 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>2</sub>
6	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=62,5 МВА; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1000А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=5 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	точка К
7	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1200А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=10 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>1</sub>
8	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =15 кВ	P=50 МВт; cosφ=0,8; x*=0,2; r*=0; U <sub>H</sub> =10,5 кВ	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =15/115 кВ; x*=0,1; r*=0	S=30 МВ·А; k <sub>2</sub> =110/10 кВ; x*=0,08; r*=0	S=60 МВА; k <sub>1</sub> =10,5/120 кВ; x*=0,1; r*=0	U <sub>H</sub> =10кВ I <sub>H</sub> =1200А X <sub>%</sub> =10%	l=80 км; r <sub>0</sub> =0,55 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=100 км; r <sub>0</sub> =0 ом/км; x <sub>0</sub> =0,4 ом/км	l=10 км; r <sub>0</sub> =0,01 ом/км; x <sub>0</sub> =0,08 ом/км	G <sub>2</sub>



## Пример расчета задания №1

При трехфазном КЗ определить ток короткого замыкания в точке короткого замыкания К.

**Расчетная схема**



### Данные для расчета:

$G_1$ :  $P=50$  МВт;  $\cos\varphi=0,8$ ;  $x_*=0,2$ ;  $r_*=0$ ;  $U_H=15$  кВ;  
 $G_2$ :  $P=50$  МВт;  $\cos\varphi=0,8$ ;  $x_*=0,2$ ;  $r_*=0$ ;  $U_H=10,5$  кВ;  
 $T_1$ :  $S=60$  МВ·А;  $k_1=15/115$  кВ;  $x_*=0,1$ ;  $r_*=0$ ;  
 $T_2$ :  $S=30$  МВ·А;  $k_2=110/10$  кВ;  $x_*=0,08$ ;  $r_*=0$ ;  
 $T_3$ :  $S=60$  МВ·А;  $k_3=10,5/120$  кВ;  $x_*=0,1$ ;  $r_*=0$ ;  
 $W_1$ :  $l=80$  км;  $r_0=0,55$  ом/км;  $x_0=0,4$  ом/км;  
 $W_2$ :  $l=100$  км;  $r_0=0$  ом/км;  $x_0=0,4$  ом/км;

### Решение

#### I. Точное приведение в именованных единицах

Выберем за базисную ступень генератор  $G_1$ , тогда коэффициенты трансформации будут выглядеть следующим образом:

$$k_1 = \frac{15}{115}; \quad k_2 = \frac{110}{10}; \quad k_3 = \frac{120}{10,5};$$

1. Э.Д.С. генераторов  $G_1$  и  $G_2$ :

$$E_* = \sqrt{(U_* \cos \varphi + I_* r_*)^2 + (U_* \sin \varphi + I_* x_*)^2}$$

$$E_{1*} = \sqrt{0,8^2 + (0,6 + 0,2)^2} = 1,13$$

$$\overline{E}_1 = E_1 = U_H E_{1*} = 1,13 \times 15 = 16,95 \text{ кВ}$$

$$E_{2*} = \sqrt{0,8^2 + (0,6 + 0,2)^2} = 1,13$$

$$E_2 = U_H E_{2*} = 1,13 \times 10,5 = 11,87 \text{ кВ}$$

$$\overline{E}_2 = E_2 \left( \frac{15}{115} \right) \left( \frac{120}{10,5} \right) = 11,87 \times 0,13 \times 11,43 = 17,64 \text{ кВ}$$

2. Реактивное сопротивление генераторов  $G_1$  и  $G_2$ :

$$x = x_* \frac{U_H^2}{S_H} = x_* \frac{U_H^2 \times \cos \varphi}{P_H}$$

$$\overline{x}_1 = x_1 = 0,2 \times \frac{15^2 \times 0,8}{50} = 0,72 \text{ Ом}$$

$$x_2 = 0,2 \times \frac{10,5^2 \times 0,8}{50} = 0,35 \text{ Ом}$$

$$\overline{x}_2 = x_2 \left( \frac{15}{115} \right)^2 \left( \frac{120}{10,5} \right)^2 = 0,77 \text{ Ом}$$

3. Реактивное сопротивление трансформаторов  $T_1, T_2, T_3$ :

$$x = x_* \frac{U_H^2}{S_H}$$

$$\overline{x}_1 = x_1 = 0,1 \times \frac{15^2}{60} = 0,38 \text{ Ом}$$

$$x_2 = 0,08 \times \frac{110^2}{30} = 32,27 \text{ Ом}$$

$$\overline{x}_2 = x_2 \left( \frac{15}{115} \right)^2 = 0,55 \text{ Ом}$$

$$x_3 = 0,1 \times \frac{120^2}{60} = 24 \text{ Ом}$$

$$\overline{x}_3 = x_3 \left( \frac{15}{115} \right)^2 = 0,41 \text{ Ом}$$

4. Сопротивление линий  $W_1, W_2$ :

$$x_1 = x_0 l = 0,4 \times 80 = 32 \text{ Ом}$$

$$\overline{x}_1 = x_1 \left( \frac{15}{115} \right)^2 = 0,54 \text{ Ом}$$

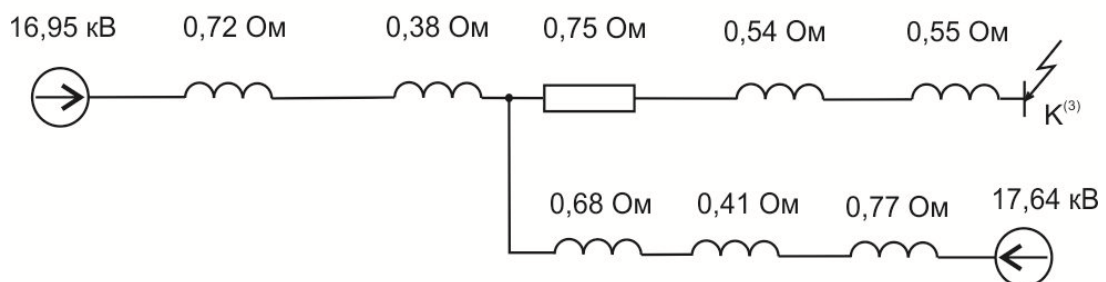
$$r_1 = r_0 l = 0,55 \times 80 = 44 \text{ Ом}$$

$$\overline{r}_1 = r_1 \left( \frac{15}{115} \right)^2 = 0,75 \text{ Ом}$$

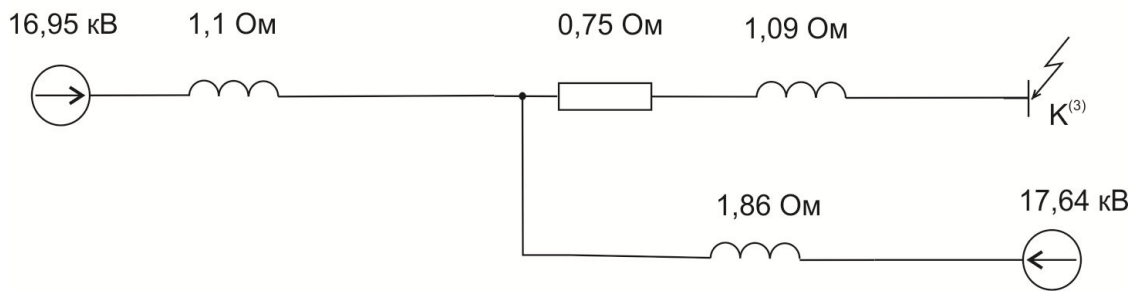
$$x_2 = x_0 l = 0,4 \times 100 = 40 \text{ Ом}$$

$$\overline{x}_2 = x_2 \left( \frac{15}{115} \right)^2 = 0,68 \text{ Ом}$$

5. Составим эквивалентную схему замещения:



преобразовав эту схему получим:



данную схему можно преобразовать по методу эквивалентной э.д.с.

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} = \frac{16,95 \times 1,86 + 17,64 \times 1,1}{1,1 + 1,86} = \frac{31,53 + 19,4}{2,96} = 17,21 \text{ кВ}$$

$$x_{\text{экв}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{1,1 \times 1,86}{1,1 + 1,86} = \frac{2,05}{2,96} = 0,69 \text{ ом}$$

тогда схема замещения преобразуется к виду



далее вычисляем полное сопротивление цепи:

$$x_{\Sigma} = 0,69 + 1,09 = 1,78 \text{ ом}$$

$$r_{\Sigma} = 0,75 \text{ ом}$$

$$z = \sqrt{(x_{\Sigma})^2 + (r_{\Sigma})^2} = \sqrt{3,17 + 0,56} = 1,93 \text{ ом}$$

тогда ток на базисной ступени составит:

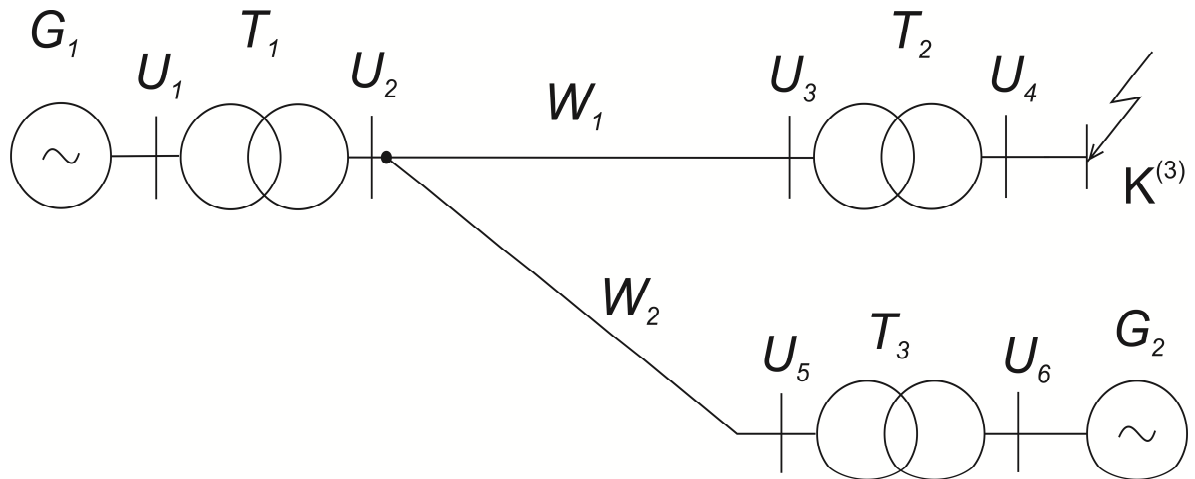
$$\bar{I} = \frac{E}{\sqrt{3}z} = \frac{17,21}{3,34} = 5,15 \text{ кА}$$

ток в точке короткого замыкания К будет:

$$I_{\text{к.з.}} = \bar{I} \cdot k_1 \cdot k_2 = 5,15 \left( \frac{15}{115} \right) \left( \frac{110}{10} \right) = 5,15 \times 0,13 \times 11 = 7,37 \text{ кА}$$



## II. Приближенное приведение в именованных единицах



Средненоминальные напряжения ступеней трансформации в соответствии с установленной шкалой:  $U_1 = 15,75$  (кВ),  $U_2 = 115$  (кВ),  $U_3 = 115$  (кВ),  $U_4 = 10,5$  (кВ),  $U_5 = 115$  (кВ),  $U_6 = 10,5$  кВ.

$U_1 = U_{cp.б} = 15,75$  (кВ) – основная (базисная) ступень напряжения.

1. Э.Д.С. генераторов  $G_1$  и  $G_2$ :

$$\bar{E}_1 = E_1 = U_H E_{1*} = 1,13 \times 15,75 = 17,80 \text{ кВ}$$

$$E_2 = U_H E_{2*} = 1,13 \times 10,5 = 11,87 \text{ кВ}$$

$$\bar{E}_2 = \frac{U_{cp.б}}{U_{cp}} \cdot E_2 = E_2 \left( \frac{15,75}{10,5} \right) = 11,87 \times 1,5 = 17,80 \text{ кВ}$$

2. Реактивное сопротивление генераторов  $G_1$  и  $G_2$ :

$$x = x_* \frac{U_H^2}{S_H} = x_* \frac{U_H^2 \times \cos \varphi}{P_H}$$

$$\bar{x}_1 = x_1 = 0,2 \times \frac{15,75^2 \times 0,8}{50} = 0,79 \text{ ом}$$

$$x_2 = 0,2 \times \frac{10,5^2 \times 0,8}{50} = 0,35 \text{ ом} \quad \bar{x}_2 = \left( \frac{U_{cp.б}}{U_{cp}} \right)^2 \cdot x_2 = \left( \frac{15,75}{10,5} \right)^2 \cdot 0,35 = 0,79 \text{ ом}$$

3. Реактивное сопротивление трансформаторов  $T_1, T_2, T_3$ :

$$x = x_* \frac{U_H^2}{S_H}; \quad \bar{x} = x \cdot \left( \frac{U_{cp.б}}{U_{cp}} \right)^2$$

$$\bar{x}_1 = x_1 = 0,1 \times \frac{15,75^2}{60} = 0,41 \text{ Ом}$$

$$x_2 = 0,08 \times \frac{115^2}{30} = 35,27 \text{ Ом}$$

$$x_3 = 0,1 \times \frac{115^2}{60} = 22 \text{ Ом}$$

$$\bar{x}_2 = x_2 \left( \frac{15,75}{115} \right)^2 = 0,66 \text{ Ом}$$

$$\bar{x}_3 = x_3 \left( \frac{15,75}{115} \right)^2 = 0,41 \text{ Ом}$$

#### 4. Сопротивление линий $W_1, W_2$ :

$$x_1 = x_0 l = 0,4 \times 80 = 32 \text{ Ом}$$

$$r_1 = r_0 l = 0,55 \times 80 = 44 \text{ Ом}$$

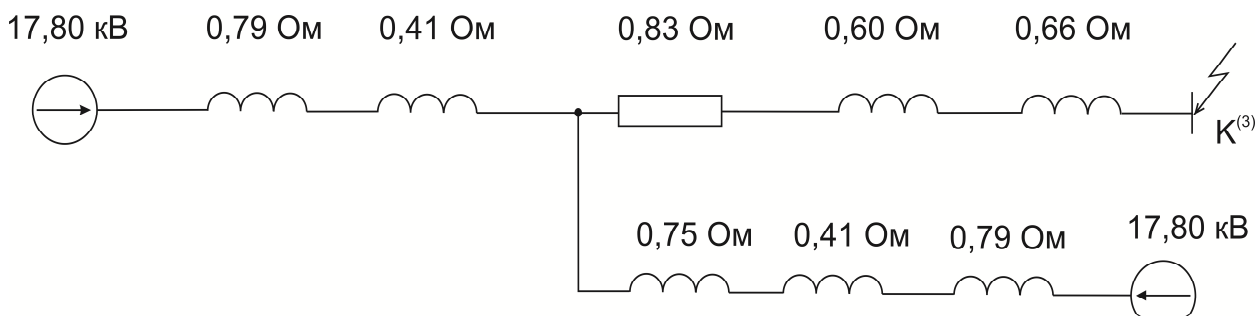
$$x_2 = x_0 l = 0,4 \times 100 = 40 \text{ Ом}$$

$$\bar{x}_1 = x_1 \left( \frac{15,75}{115} \right)^2 = 0,60 \text{ Ом}$$

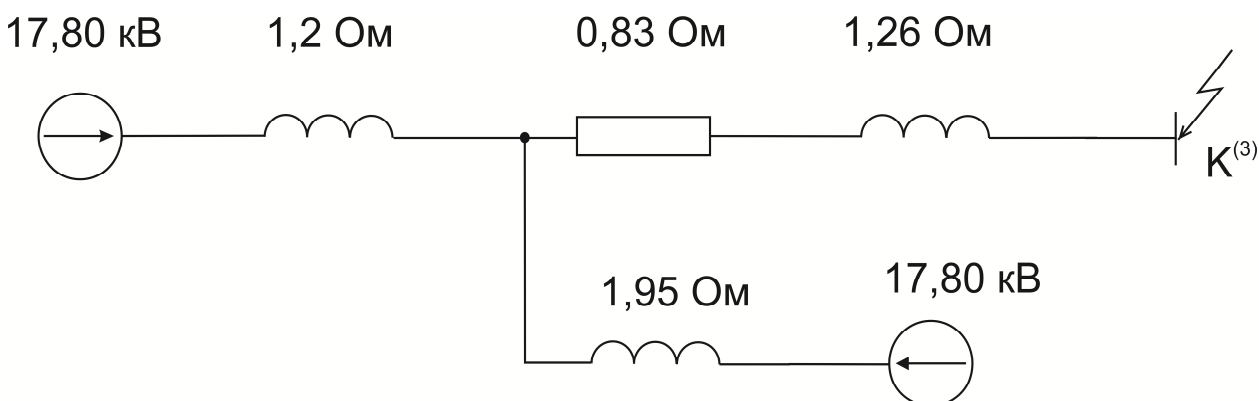
$$\bar{r}_1 = r_1 \left( \frac{15,75}{115} \right)^2 = 0,83 \text{ Ом}$$

$$\bar{x}_2 = x_2 \left( \frac{15,75}{115} \right)^2 = 0,75 \text{ Ом}$$

#### 5. Составим эквивалентную схему замещения:



преобразовав эту схему получим:

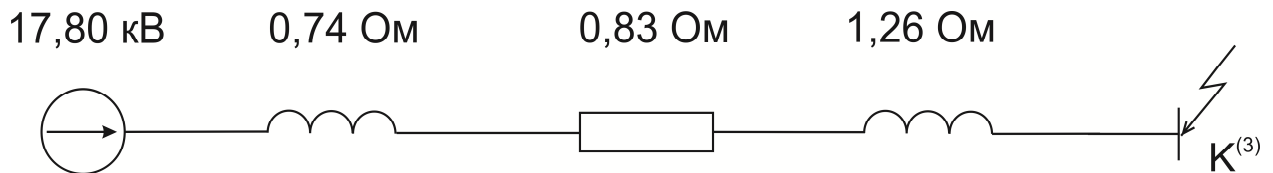


данную схему можно преобразовать по методу эквивалентной э.д.с.

$$E_{\text{экв}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} = \frac{17,80 \times 1,95 + 17,80 \times 1,2}{1,2 + 1,95} = 17,80 \text{ кВ}$$

$$x_{\text{экв}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{1,2 \times 1,95}{1,2 + 1,95} = \frac{2,34}{3,15} = 0,74 \text{ Ом}$$

тогда схема замещения преобразуется к виду



далее вычисляем полное сопротивление цепи:

$$x_{\Sigma} = 0,74 + 1,26 = 2 \text{ Ом}$$

$$r_{\Sigma} = 0,83 \text{ Ом}$$

$$z = \sqrt{(x_{\Sigma})^2 + (r_{\Sigma})^2} = \sqrt{4 + 0,69} = 2,17 \text{ Ом}$$

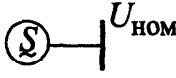
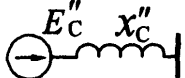
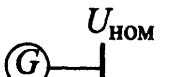
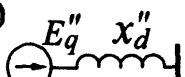
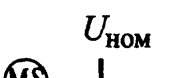
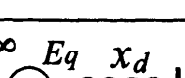
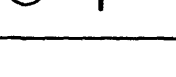
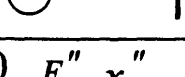
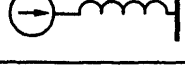

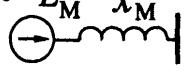
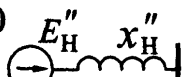
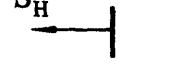
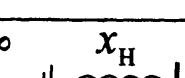
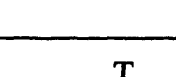
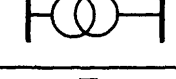
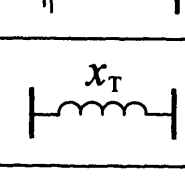

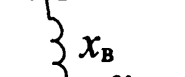


тогда ток на базисной ступени составит:

$$\bar{I} = \frac{E}{\sqrt{3}z} = \frac{17,80}{3,76} = 4,73 \text{ кА}$$

ток в точке короткого замыкания К будет:

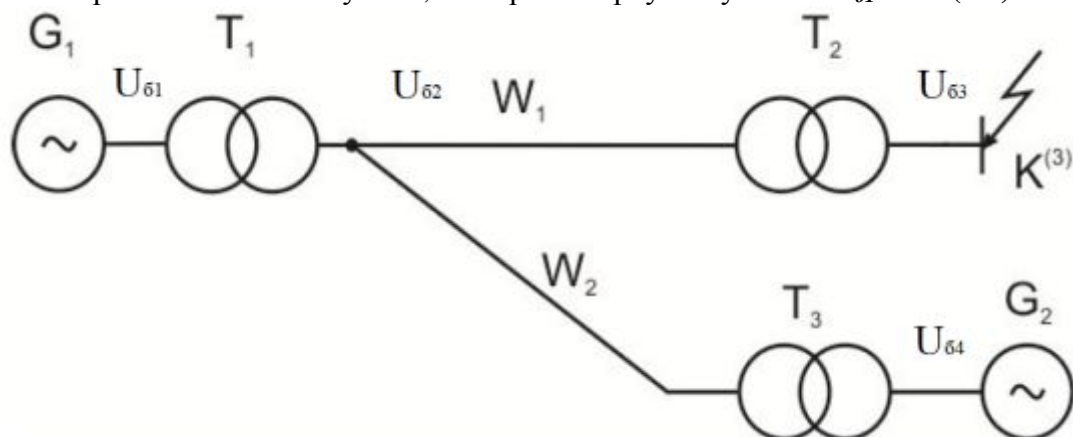
$$I_{\text{к.з.}} = \bar{I} \cdot \left( \frac{U_{\text{ср.б}}}{U_{\text{ср}}} \right) = 4,73 \left( \frac{15,75}{10,5} \right) = 4,73 \times 1,5 = 7,1 \text{ кА}$$

## Представление элементов электроэнергетической системы в схемах замещения при расчетах токов КЗ

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения	Выражение сопротивлений	
			В именованных единицах	В относительных единицах
Система			$x_c'' = \frac{U_{\text{ср.НОМ}}^2}{S_{\text{КЗ}}}$	$x_c'' = \frac{S_6}{S_{\text{КЗ}}}$
Синхронный генератор (с демпферными обмотками) или синхронный двигатель		$t=0$ 	$x_d'' = x_d'' \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_d'' = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
		$t=\infty$ 	$x_d = x_d \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_d = x_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
Асинхронный двигатель		$t=0$ 	$x_M'' = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{I_{\text{П}} S_{\text{НОМ}}}$	$x_M'' = \frac{S_6}{I_{\text{П}} S_{\text{НОМ}}}$
		$t=\infty$ 	$x_M = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ ДВ}}}$	$x_M = \frac{S_6}{S_{\text{НОМ ДВ}}}$
Обобщенная нагрузка		$t=0$ 	$x_H'' = 0,35 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_H'' = 0,35 \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
		$t=\infty$ 	$x_H = 1,2 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_H = 1,2 \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
Трансформатор			$x_T = \frac{U_{\text{К}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_T = \frac{U_{\text{К}} \% S_6}{100 S_{\text{НОМ}}}$
Трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор	 		$x_B = \frac{U_{\text{КВ}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_B = \frac{U_{\text{КВ}} \% S_6}{100 S_{\text{НОМ}}}$
			$x_C = \frac{U_{\text{КС}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_C = \frac{U_{\text{КС}} \% S_6}{100 S_{\text{НОМ}}}$
			$x_H = \frac{U_{\text{КН}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_H = \frac{U_{\text{КН}} \% S_6}{100 S_{\text{НОМ}}}$
Реактор			$x_P = \frac{x_P \% U_{\text{PНОМ}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{PНОМ}}}$	$x_P = \frac{x_P \% I_6 U_{\text{PНОМ}}}{100 I_{\text{НОМ}} U_6}$
Воздушная или кабельная линия			$R_L = r_0 l$	$R_L = r_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$
			$x_L = x_0 l$	$x_L = x_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$

### ТОЧНОЕ приведение в ОТНОСИТЕЛЬНЫХ единицах

За базисную мощность принимается мощность системы, суммарная мощность генераторов электростанций, трансформаторов подстанций или удобное для расчёта число, кратное 10, например  $S_6 = 1000$  (МВА), за базисное напряжение может быть выбрано напряжение любой ступени, выбираем первую ступень –  $U_{61} = 15$  (кВ).



При **точном** составлении схемы замещения, базисные напряжения остальных ступеней пересчитываются по формулам:

$$U_{62} = U_{61} \left( \frac{1}{k_1} \right); \quad U_{63} = U_{61} \left( \frac{1}{k_1 k_2} \right)$$

Обратите внимание, что при **точном приведении** участвуют действительные коэффициенты трансформации, заданные в качестве исходных величин.

Под коэффициентом трансформации  $k$  трансформатора понимается **отношение междуфазного напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону основной ступени напряжения, к аналогичному напряжению его обмотки, находящейся ближе к ступени, элементы которой подлежат приведению.**

Базисные напряжения на других ступенях:

$$U_{62} = \frac{U_{61}}{k_{T1}} = \frac{15}{\frac{15}{115}} = 115 \text{ (кВ)};$$

$$U_{63} = \frac{U_{61}}{k_{T1} \cdot k_{T2}} = \frac{15}{\frac{15}{115} \cdot \frac{110}{10}} = 10,45 \text{ (кВ)}$$

$$U_{64} = \frac{U_{61}}{k_{T1} \cdot k_{T3}} = \frac{15}{\frac{15}{115} \cdot \frac{120}{10,5}} = 10,06 \text{ (кВ)}$$

Базисные токи на каждой ступени рассчитываются следующим образом:

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{62}}, \quad I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{63}}$$

Базисный ток на ступени КЗ:

$$I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{63}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,45} = 55,25 \text{ (кА)}$$

Относительные величины реактивных сопротивлений:

$$x_{r1} = x_* \cdot \frac{S_6 \cdot U_{номГ}^2}{S_{ном} \cdot U_{61}^2} = 0,2 \cdot \frac{1000}{62,5} = 3,2$$

$$x_{r2} = x_* \cdot \frac{S_6 \cdot U_{\text{НОМГ}}^2}{S_{\text{НОМ}} \cdot U_{64}^2} = 0,2 \cdot \frac{1000}{62,5} \cdot \left(\frac{10,5}{10,06}\right)^2 = 3,49$$

$$x_{T1} = x_* \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМТ}}}{U_{61}}\right)^2 = 0,1 \cdot \frac{1000}{60} = 1,67$$

$$x_{T2} = x_* \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМТ}}}{U_{62}}\right)^2 = 0,08 \cdot \frac{1000}{30} \cdot \left(\frac{110}{115}\right)^2 = 2,44$$

$$x_{T3} = x_* \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМТ}}}{U_{62}}\right)^2 = 0,1 \cdot \frac{1000}{60} \cdot \left(\frac{120}{115}\right)^2 = 1,82$$

$$x_{w1} = x_0 l \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2,42$$

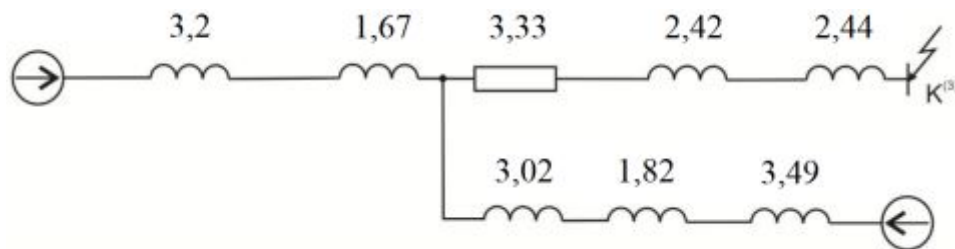
$$r_{w1} = r_0 l \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0,55 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 3,33$$

$$x_{w2} = x_0 l \frac{S_6}{U_{62}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{115^2} = 3,02$$

$$E_1'' = \frac{E_{\text{НОМ1}}}{U_{61}} = \frac{16,95}{15} = 1,13$$

$$E_2'' = \frac{E_{\text{НОМ2}}}{U_{64}} = \frac{11,87}{10,06} = 1,18$$

Составим эквивалентную схему замещения:



$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,13 \cdot 8,33 + 1,18 \cdot 4,87}{8,33 + 4,87} = 1,15$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = 3,07$$

Вычисляем полное сопротивление цепи до точки КЗ:

$$x_{\Sigma} = 3,07 + 2,42 + 2,44 = 7,93$$

$$r_{\Sigma} = 3,33$$

$$z = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = 8,6$$

Начальный сверхпереходный ток в точке КЗ:

$$I_{K*6}'' = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{z} = \frac{1,15}{8,6} = 0,13$$

Значение тока КЗ в именованных единицах:

$$I_K'' = I_{K*6}'' \cdot I_{63} = 0,13 \cdot 55,25 = 7,18 \text{ (кА)}$$

### ПРИБЛИЖЕННОЕ приведение в ОТНОСИТЕЛЬНЫХ единицах

В случае **приближенного** приведения базисные напряжения ( $U_0$ ) на каждой ступени будут равны среднономинальным напряжениям тех же ступеней:

**0,23; 0,4; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515 кВ**

При этом принимается, что номинальные напряжения всех элементов, кроме реакторов, находящихся на одной ступени, одинаковы и равны  $U_{cp}$ .

$U_{01} = 15,75$  кВ;  $U_{02} = 115$  кВ;  $U_{03} = 10,5$  кВ;  $U_{04} = 10,5$  кВ.

Базисный ток на ступени КЗ:

$$I_{03} = \frac{S_0}{\sqrt{3} \cdot U_{03}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ (кА)}$$

Расчет сопротивлений в случае приближенного приведения значительно упрощается:

$$x_{r1} = x_* \cdot \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,2 \cdot \frac{1000}{62,5} = 3,2$$

$$x_{r2} = x_* \cdot \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,2 \cdot \frac{1000}{62,5} = 3,2$$

$$x_{T1} = x_* \cdot \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,1 \cdot \frac{1000}{60} = 1,67$$

$$x_{T2} = x_* \cdot \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,08 \cdot \frac{1000}{30} = 2,67$$

$$x_{T3} = x_* \cdot \frac{S_0}{S_{ном}} = 0,1 \cdot \frac{1000}{60} = 1,67$$

$$x_{w1} = x_0 l \frac{S_0}{U_{02}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 2,42$$

$$r_{w1} = r_0 l \frac{S_0}{U_{02}^2} = 0,55 \cdot 80 \cdot \frac{1000}{115^2} = 3,33$$

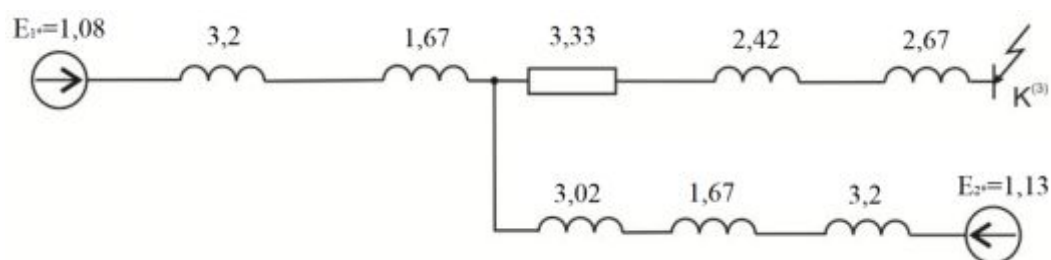
$$x_{w2} = x_0 l \frac{S_0}{U_{02}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{1000}{115^2} = 3,02$$

Относительная величина ЭДС:

$$E_1'' = \frac{E_{ном1}}{U_{01}} = \frac{16,95}{15,75} = 1,08$$

$$E_2'' = \frac{E_{ном2}}{U_{04}} = \frac{11,87}{10,5} = 1,13$$

Составим эквивалентную схему замещения:



$$E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,08 \cdot 7,89 + 1,13 \cdot 4,87}{7,89 + 4,87} = 1,1$$

$$x_{\text{ЭКВ}} = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = 3,01$$

Вычисляем полное сопротивление цепи до точки КЗ:

$$x_{\Sigma} = 3,01 + 2,42 + 2,67 = 8,1$$

$$r_{\Sigma} = 3,33$$

$$z = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = 8,76$$

Начальный сверхпереходный ток в точке КЗ:

$$I''_{\text{К*6}} = \frac{E_{\text{ЭКВ}}}{z} = \frac{1,1}{8,76} = 0,13$$

Значение тока КЗ в именованных единицах:

$$I''_{\text{К}} = I''_{\text{К*6}} \cdot I_{63} = 0,13 \cdot 55 = 7,15 \text{ (кА)}$$

Приведение	В именованных единицах	В относительных единицах
Точное	7,37	7,18
Приближенное	7,1	7,15