



# Переходные процессы в электроэнергетических системах

Приведение магнитосвязанных цепей к одному уровню напряжения. Расчет начального значения периодической составляющей. Расчет аperiodической составляющей и ударного тока КЗ.

лектор

Беспалов Александр Владимирович

Приведение магнитосвязанных цепей к одному уровню напряжения - магнитные связи заменяются электрическими.

Точное приведение параметров расчетной схемы к одному уровню напряжения при расчетах в именованных единицах

$$E' = E \cdot n_1 \cdot n_2 \dots \cdot n_N$$
$$Z' = Z \cdot n_1^2 \cdot n_2^2 \dots \cdot n_N^2$$

где  $n$  – отношение напряжения холостого хода обмотки трансформатора (автотрансформатора), обращенной в сторону выбранной основной ступени напряжения сети к напряжению холостого хода обмотки, обращенной в сторону ступени, подлежащей приведению.

Приближенное приведение параметров расчетной схемы к одному уровню напряжения при расчетах в именованных единицах

$$E'_N = E_N \frac{U_{CP,och}}{U_{CP,N}}; \quad Z'_N = Z_N \left( \frac{U_{CP,och}}{U_{CP,N}} \right)^2$$

$U_{CP}$  выбирается из ряда средних номинальных напряжений сетей, кВ:

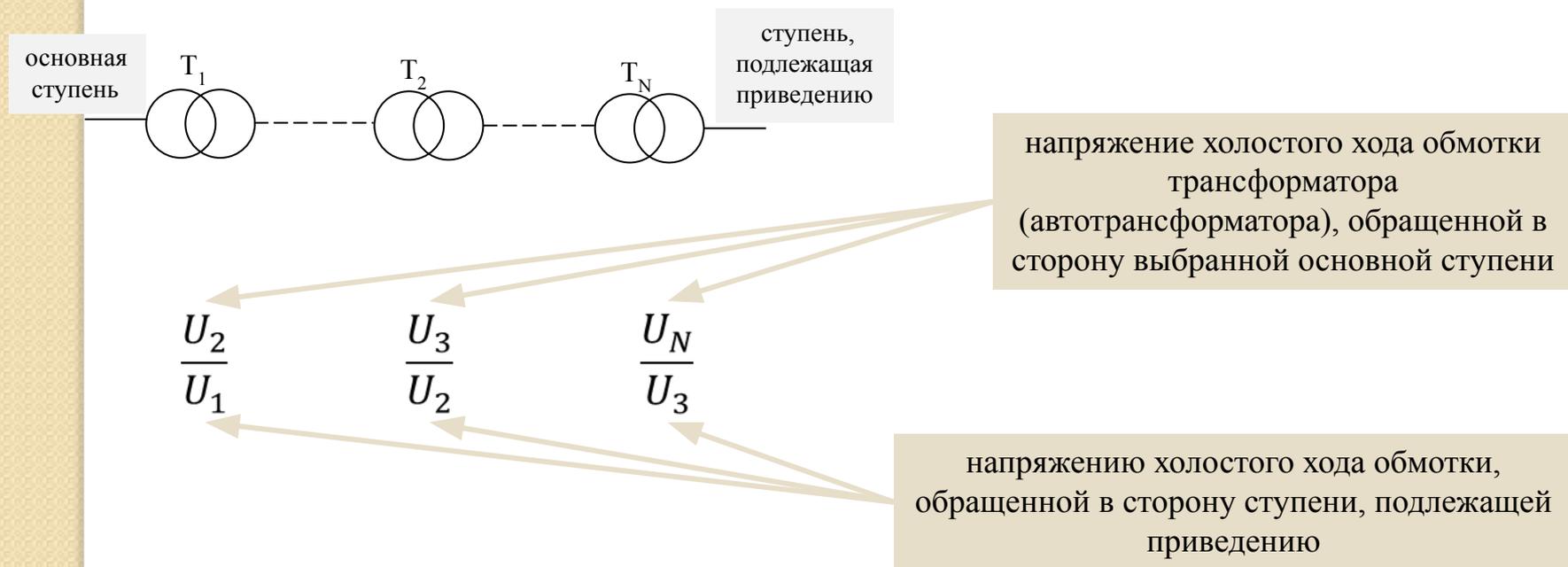
3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 27; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175

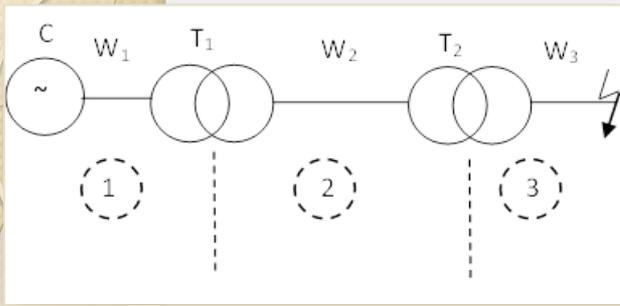
Точное приведение параметров расчетной схемы к одному уровню напряжения при расчетах в относительных единицах. где среднее номинальное напряжение

$$U_{Б,N} = U_{Б,осн} \frac{1}{n_1 \cdot n_2 \dots \cdot n_N}$$

Приближенное приведение параметров расчетной схемы к одному уровню напряжения при расчетах в относительных единицах

$$U_{Б,N} = U_{CP,N}$$





Исходные данные:

Система:  $E_C = 515$  кВ,  $I_{KC} = 2,2$  кА,

Трансформаторы

$T_1$  -  $S_H = 250000$  кВА,  $U_{ВН} = 510$  кВ,  $U_{НН} = 230$  кВ,  $U_{K\%} = 10$ ;

$T_2$  -  $S_H = 200000$  кВА,  $U_{ВН} = 215$  кВ,  $U_{НН} = 36$  кВ,  $U_{K\%} = 9,5$ ;

Воздушные линии

$W_1$  - провод АС-300/66 мм<sup>2</sup> длина 55 км;

$W_2$  - провод АС-240/32 мм<sup>2</sup> длина 73 км;

$W_3$  - провод АС-150/24 мм<sup>2</sup> длина 19 км.

### 1. Расчет в именованных единицах при использовании точного приведения

Для каждого элемента определяем индуктивное сопротивление:

$$\text{Система } X_C = \frac{E_C}{\sqrt{3}I_{KC}} = \frac{515}{\sqrt{3} \cdot 2,2} = 135 \text{ Ом.}$$

Трансформаторы (сопротивление со стороны ВН):

$$X_{T1} = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{U_{ВН}^2}{S_H} = \frac{10}{100} \frac{510^2}{250} = 104 \text{ Ом.}$$

$$X_{T2} = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{U_{ВН}^2}{S_H} = \frac{9,5}{100} \frac{215^2}{200} = 22,0 \text{ Ом.}$$

воздушные линии:

$$X_{W1} = X_{уд1} l_{W1} = 0,31 \cdot 55 = 17,1 \text{ Ом.}$$

$$X_{W2} = X_{уд2} l_{W2} = 0,435 \cdot 73 = 31,8 \text{ Ом.}$$

$$X_{W3} = X_{уд3} l_{W3} = 0,406 \cdot 19 = 7,71 \text{ Ом.}$$

(удельные сопротивления определяются по справочнику)

Разобьем схему на ступени, граница раздела – трансформаторы.

Основной ступенью выбираем ступень 3, на которой произошло к.з.

Все сопротивления элементов ступени 3 (это  $W_3$ ) остаются неизменными.

Сопротивления элементов, расположенных на ступени 2 ( $W_2$ ,  $T_2$ ), приводятся к ступени 3:

$$X'_{T2} = X_{T2} \left( \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} \right)^2 = 22 \left( \frac{36}{215} \right)^2 = 0,617 \text{ Ом};$$

$$X'_{W2} = X_{W2} \left( \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} \right)^2 = 31,8 \left( \frac{36}{215} \right)^2 = 0,892 \text{ Ом}$$

Сопротивления и ЭДС элементов, расположенных на ступени 1 ( $E_C$ ,  $W_2$ ,  $T_2$ ), приводятся к ступени 3:

$$E'_C = E_C \frac{U_{HH2} U_{HH1}}{U_{BH2} U_{BH1}} = 515 \frac{36}{215} \frac{230}{510} = 38,9 \text{ В};$$

$$X'_C = X_C \left( \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} \right)^2 \left( \frac{U_{HH1}}{U_{BH1}} \right)^2 = 135 \left( \frac{36}{215} \right)^2 \left( \frac{230}{510} \right)^2 = 0,770 \text{ Ом};$$

$$X'_{T1} = X_{T1} \left( \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} \right)^2 \left( \frac{U_{HH1}}{U_{BH1}} \right)^2 = 104 \left( \frac{36}{215} \right)^2 \left( \frac{230}{510} \right)^2 = 0,593 \text{ Ом};$$

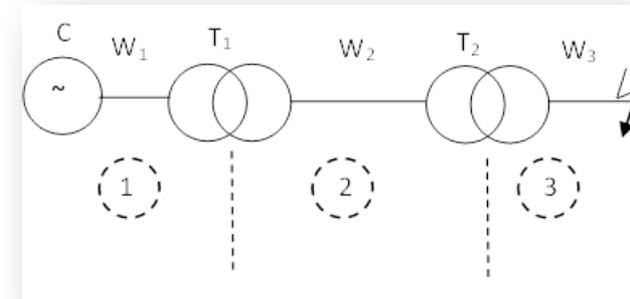
$$X'_{W1} = X_{W1} \left( \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} \right)^2 \left( \frac{U_{HH1}}{U_{BH1}} \right)^2 = 17,1 \left( \frac{36}{215} \right)^2 \left( \frac{230}{510} \right)^2 = 0,0975 \text{ Ом};$$

Рассчитываем ток в месте к.з.:

$$I_K = \frac{E'_C}{\sqrt{3}(X'_C + X'_{T1} + X'_{W1} + X'_{T2} + X'_{W2} + X_{W3})} = \frac{38,9}{\sqrt{3}(0,77 + 0,593 + 0,0975 + 0,617 + 0,892 + 7,71)} = 2,10 \text{ кА.}$$

При расчете тока в линии  $W_2$  воспользуемся коэффициентом приведения:

$$I_{KW2} = I_K \frac{U_{HH2}}{U_{BH2}} = 2,10 \frac{36}{215} = 0,352 \text{ кА.}$$



## 2. Расчет в именованных единицах при использовании приближенного приведения

Средние номинальные напряжения ступеней:

$$U_{\text{CP1}}=515 \text{ кВ}, U_{\text{CP2}}=230 \text{ кВ}, U_{\text{CP3}}=37 \text{ кВ}.$$

$$X'_{T2} = X_{T2} \left( \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp2}}} \right)^2 = 22 \left( \frac{37}{230} \right)^2 = 0,569 \text{ Ом};$$

$$X'_{W2} = X_{W2} \left( \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp2}}} \right)^2 = 31,8 \left( \frac{37}{230} \right)^2 = 0,823 \text{ Ом}$$

Сопротивления и ЭДС элементов, расположенных на ступени 1 ( $E_C$ ,  $W_2$ ,  $T_2$ ), приводятся к ступени 3:

$$E'_C = E_C \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp1}}} = 515 \frac{37}{515} = 37 \text{ В};$$

$$X'_C = X_C \left( \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp1}}} \right)^2 = 135 \left( \frac{37}{515} \right)^2 = 0,697 \text{ Ом};$$

$$X'_{T1} = X_{T1} \left( \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp1}}} \right)^2 = 104 \left( \frac{37}{515} \right)^2 = 0,537 \text{ Ом};$$

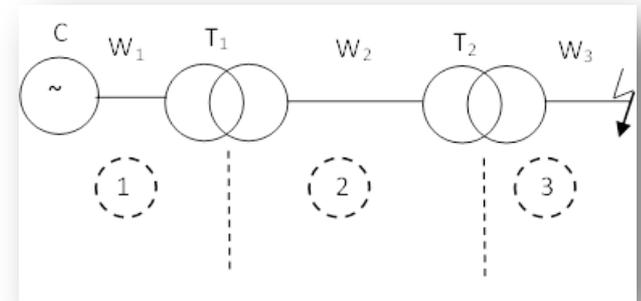
$$X'_{W1} = X_{W1} \left( \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp1}}} \right)^2 = 17,1 \left( \frac{37}{515} \right)^2 = 0,0883 \text{ Ом};$$

Рассчитываем ток в месте к.з.:

$$I_K = \frac{E'_C}{\sqrt{3}(X'_C + X'_{T1} + X'_{W1} + X'_{T2} + X'_{W2} + X_{W3})} = \frac{37}{\sqrt{3}(0,697 + 0,537 + 0,0883 + 0,569 + 0,823 + 7,71)} = 2,05 \text{ кА}.$$

При расчете тока в линии  $W_2$  воспользуемся коэффициентом приведения:

$$I_{kW2} = I_K \frac{U_{\text{cp3}}}{U_{\text{cp2}}} = 2,05 \frac{37}{230} = 0,33 \text{ кА}.$$



### 3. Расчет в относительных единицах при использовании точного приведения

базисные условия:

$S_B = 1000$  МВА- выбираем произвольно.

За основную ступень принимаем ступень 3, на которой произошло к.з. На этой ступени базисное напряжение выбираем произвольно

$$U_{B3} = U_{HH2} = 36 \text{ кВ.}$$

рассчитываем базисные напряжения остальных ступеней по коэффициентам трансформации:

$$U_{B2} = U_{B3} \frac{U_{BH2}}{U_{HH2}} = 36 \frac{215}{36} = 215 \text{ В;}$$

$$U_{B1} = U_{B2} \frac{U_{BH1}}{U_{HH1}} = 215 \frac{510}{230} = 477 \text{ В;}$$

Для каждого элемента определяем индуктивное сопротивление в относительных единицах, при этом базисное напряжение выбираем с той ступени, на которой находится элемент:

Система

$$X_{*C} = \frac{E_C}{\sqrt{3} I_{KC}} \frac{S_B}{U_{B1}^2} = \frac{515}{\sqrt{3} \cdot 2,2} \frac{1000}{477^2} = 0,595$$

$$E_{*C} = \frac{E_C}{U_{B1}} = \frac{515}{477} = 1,08.$$

Трансформаторы:

$$X_{*T1} = \frac{U_{K\%} S_B}{100 S_H} \frac{U_{BH}^2}{U_{B1}^2} = \frac{10}{100} \frac{1000}{250} \frac{510^2}{477^2} = 0,457.$$

$$X_{*T2} = \frac{U_{K\%} S_B}{100 S_H} \frac{U_{BH}^2}{U_{B2}^2} = \frac{9,5}{100} \frac{1000}{200} \frac{215^2}{215^2} = 0,475.$$

воздушные линии:

$$X_{*W1} = X_{уд} l_{W1} \frac{S_B}{U_{B1}^2} = 0,31 \cdot 55 \frac{1000}{477^2} = 0,0749$$

$$X_{*W2} = X_{уд} l_{W2} \frac{S_B}{U_{B2}^2} = 0,435 \cdot 73 \frac{1000}{215^2} = 0,687$$

$$X_{*W3} = X_{уд} l_{W3} \frac{S_B}{U_{B3}^2} = 0,406 \cdot 19 \frac{1000}{36^2} = 5,95$$

Рассчитываем ток в месте к.з.:

$$I_{*K} = \frac{E_{*C}}{X_{*C} + X_{*T1} + X_{*W1} + X_{*T2} + X_{*W2} + X_{*W3}} = \frac{1,08}{0,595 + 0,457 + 0,0749 + 0,475 + 0,687 + 5,95} = 0,131.$$

Пересчитываем в именованные единицы:

$$I_K = I_{*K} I_{B3} = I_{*K} \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{B3}} = 0,131 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 36} = 2,10 \text{ кА.}$$

$$I_{KW2} = I_{*K} I_{B2} = I_{*K} \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{B2}} = 0,131 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 215} = 0,352 \text{ кА.}$$

#### 4. Расчет в относительных единицах при использовании приближенного приведения

базисные условия:  $S_B = 1000$  МВА- выбираем произвольно.

В качестве базисного на каждой ступени выбираем среднее номинальное напряжение (из ряда).  $U_{Б3} = 37$  кВ,  $U_{Б2} = 230$  кВ,  $U_{Б1} = 515$  кВ,

Для каждого элемента определяем индуктивное сопротивление в относительных единицах, при этом базисное напряжение выбираем с той степени, на которой находится элемент. При этом считаем, что для всех элементов (кроме реакторов) номинальные напряжения равны средним номинальным.

$$\text{Система } X_{*C} = \frac{E_C}{\sqrt{3} I_{KC}} \frac{S_B}{U_{Б1}^2} = \frac{515}{\sqrt{3} \cdot 2,2} \frac{1000}{515^2} = 0,51; E_{*C} = \frac{E_C}{U_{Б1}} = \frac{515}{515} = 1.$$

Трансформаторы:

$$X_{*T1} = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{S_B}{S_H} = \frac{10}{100} \frac{1000}{250} = 0,4. \quad X_{*T2} = \frac{U_{K\%}}{100} \frac{S_B}{S_H} = \frac{9,5}{100} \frac{1000}{200} = 0,475.$$

воздушные линии:

$$X_{*W1} = X_{уд} l_{W1} \frac{S_B}{U_{Б1}^2} = 0,31 \cdot 55 \frac{1000}{515^2} = 0,0643 \quad X_{*W2} = X_{уд} l_{W2} \frac{S_B}{U_{Б2}^2} = 0,435 \cdot 73 \frac{1000}{230^2} = 0,6$$

$$X_{*W3} = X_{уд} l_{W3} \frac{S_B}{U_{Б3}^2} = 0,406 \cdot 19 \frac{1000}{37^2} = 5,63$$

Рассчитываем ток в месте к.з.:

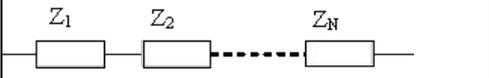
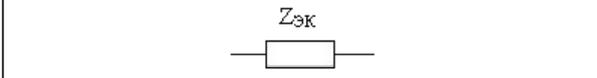
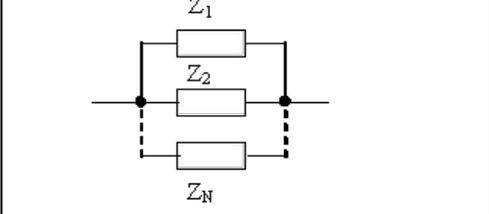
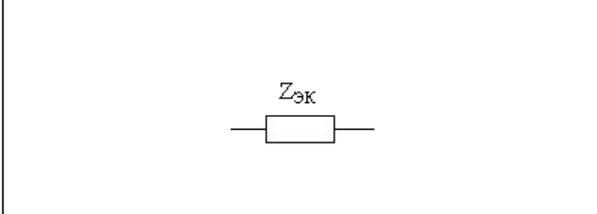
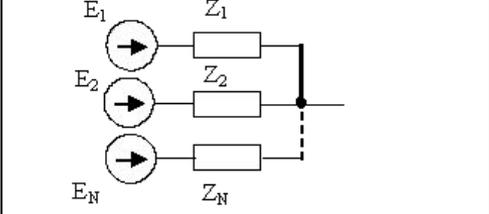
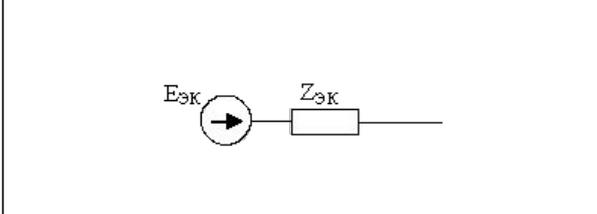
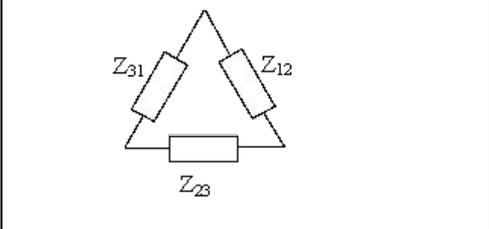
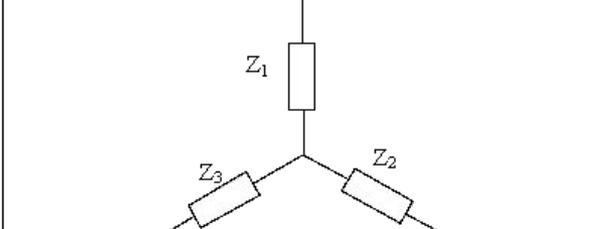
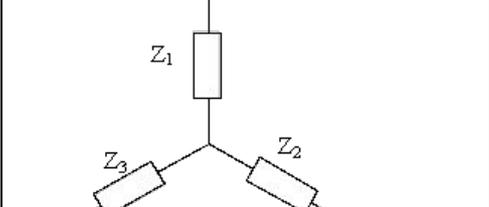
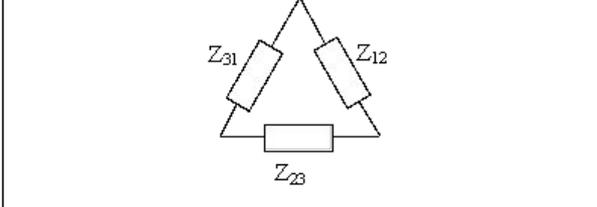
$$I_{*K} = \frac{E_{*C}}{X_{*C} + X_{*T1} + X_{*W1} + X_{*T2} + X_{*W2} + X_{*W3}} = \frac{1}{0,51 + 0,4 + 0,0643 + 0,475 + 0,6 + 5,63} = 0,13.$$

Пересчитываем в именованные единицы:

$$I_K = I_{*K} I_{Б3} = I_{*K} \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{Б3}} = 0,13 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 37} = 2,03 \text{ кА.}$$

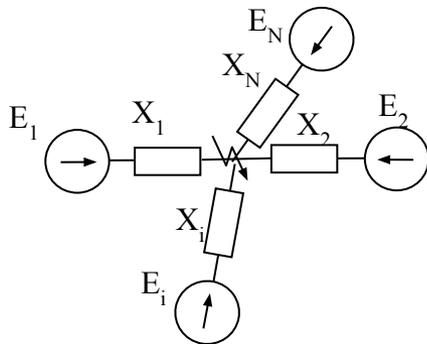
$$I_{KW2} = I_{*K} I_{Б2} = I_{*K} \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{Б2}} = 0,13 \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,327 \text{ кА.}$$

# Преобразования схем замещения

Исходная схема	Схема после преобразования	Эквивалентные соотношения
		$z_{эк} = \sum_{k=1}^n z_k$
		$z_{эк} = 1 / \sum_{k=1}^n (1 / z_k)$
		$z_{эк} = 1 / \sum_{k=1}^n (1 / z_k)$ $\dot{E}_{эк} = z_{эк} \sum_{k=1}^n (\dot{E}_k / z_k)$
		$z_{123} = z_{12} + z_{31} + z_{23}$ $z_1 = z_{12} \cdot z_{31} / z_{123}$ $z_2 = z_{12} \cdot z_{23} / z_{123}$ $z_3 = z_{23} \cdot z_{31} / z_{123}$
		$z_{12} = z_1 + z_2 + z_1 \cdot z_2 / z_3$ $z_{23} = z_2 + z_3 + z_2 \cdot z_3 / z_1$ $z_{31} = z_3 + z_1 + z_3 \cdot z_1 / z_2$

Последовательность расчета к.з. в сетях выше 1000 В  
**Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания**

1. Определяются базисные условия. Базисная мощность – произвольно, базисные напряжения – в соответствии с методами приведения к одному уровню напряжения.
2. Составляется схема замещения для расчетной схемы электрической системы, состоящая только из индуктивных сопротивлений и ЭДС.
3. При помощи эквивалентных преобразований схема замещения приводится к простейшему многолучевому виду.
4. Для каждой ветви многолучевой схемы определяется начальное действующее значение периодической составляющей – ток к.з.
5. Ток короткого замыкания в точке к.з. – сумма токов ветвей.



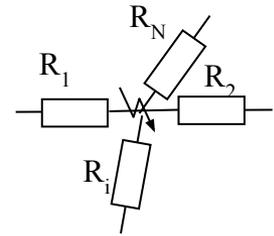
$$I_{\text{По}i} = \frac{E_i}{X_i}$$

$$I_{\text{По}} = \sum_{i=1}^N I_{\text{По}i}$$

Последовательность расчета к.з. в сетях выше 1000 В

## Расчет ударного тока и апериодической составляющей тока короткого замыкания

1. Для каждой ветви многолучевой схемы определяется начальное действующее значение периодической составляющей тока к.з.
2. Составляется схема замещения, состоящая из активных сопротивлений и приводится к многолучевому виду. Преобразования повторяют расчет схемы для индуктивных сопротивлений.
3. Для каждой ветви схемы определяется ударный коэффициент



$$T_{\text{аз}} = \frac{X}{\omega R} \quad \begin{array}{l} \text{если } \frac{X}{R} < 5 - K_y = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega T_{\text{аз}}}} \\ \text{если } \frac{X}{R} > 5 - K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\text{аз}}}} \end{array}$$

4. Определяется ударный ток в месте к.з.

$$i_y = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N I_{\text{Пoi}} K_{yi}$$

5. При необходимости определяется ток апериодической составляющей в произвольный момент времени

$$i_{\text{ат}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N I_{\text{Пoi}} e^{-\frac{t}{T_{\text{аз}i}}}$$