



Казахский агротехнический университет имени С.Сейфуллина  
Энергетический факультет  
Кафедра «Электроснабжение»

## **Лекционно-практическое (СРСР)**

по дисциплине профильного цикла ОП «Электроснабжение» для ДО  
**«ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ»**

*Рожков Виталий Игоревич – к.т.н., старший преподаватель*

**Астана, 2014**



# ***Системы расчёта и приведения к базисным условиям параметры схем замещения***



- Данный расчёт заключается в **приведении (представлении)** паспортных величин по заданным условиям расчёта ТКЗ ( $t = 0$  секунд и место КЗ, являющаяся **основной ступенью U СЗ**), к которой и требуется **привести** все параметры СЗ ( $E$  и  $X$ );
- **ВАЖНО!** При определении параметров СЗ учесть их преобразование силовыми  $T(AT)$  путём учёта  $k_T = U_1 / U_2$  – отношения  $U_{xx}$  его обмотки, обращенной в сторону основной ступени  $U$  сети (место КЗ), к  $U_{xx}$  другой обмотки;
- **По этой причине!** Все параметры СЗ **приводят** к одному базисному  $U$  ( $U_{осн}$ ) или базисным условиям с целью замены магнитных связей силовых  $T$  электрическими, для упрощения расчётов. **Параметры режима КЗ и СЗ пересчитываются по:**

$$\bar{E} = (k_1 k_2 \dots k_n) E; \quad \bar{Z} = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 Z; \quad \text{где } \bar{A} - \text{приведённый}$$

$$\bar{U} = (k_1 k_2 \dots k_n) U; \quad \bar{I} = (1 / k_1 k_2 \dots k_n) I. \quad \text{параметр.}$$

- **Причем** величины должны быть пересчитаны столько раз, сколько трансформаторов встречается на пути между приводимым элементом и основной ступенью;
- **Необходимо иметь в виду**, что запись формул предполагает, что коэффициенты трансформации определены в направлении **от выбранной основной ступени  $U_б$** ;
- **Приводить параметры необходимо всегда**, как для случая расчета в **именованных единицах**, так и для случая расчета в **относительных единицах**.

- в именованных единицах (кВ, А, Ом) – производится **приведение параметров СЗ** к выбранной основной (базисной) ступени напряжения ( $U_{осн}$ ) сети с учетом фактических  $k_T$  силовых трансформаторов (АТ);
- в относительных единицах (% , доли 1) – производится **приведение параметров СЗ** к базисным условиям ( $S_б, U_б$ ) сети с учётом фактических  $k_T$  всех Т, а итог расчёта в им.ед.

**Первая система преимущественно используется в:**

- простейших схемах с одной (таж двумя) ступенью трансформации;
- при расчете токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ;
- обходятся без приведения, но с фактическими  $K_T$  в специальном ПО.

**Вторая система расчёта даёт ряд преимуществ:**

- рекомендуется применять в ЭС с двумя и более ступенями трансформации;
- простая структура представления сложных вычислений;
- численное совпадений фазных и линейных физических величин;
- наглядность – возможность быстро ориентироваться в порядке расчёта.

*к одной ступени трансформации, принятой за основную (место КЗ) – это очень важный момент в расчетах КЗ, который необходимо учитывать !!!*

**Приведённый параметр – такой, который пересчитан через  $i$ -ое число коэффициентов трансформации к ступени напряжения (трансформации), принятой за **базисную (основную)**.**



## В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЗНАЧЕНИЯ РАСЧЁТА ПРИМЕНЯЮТ:

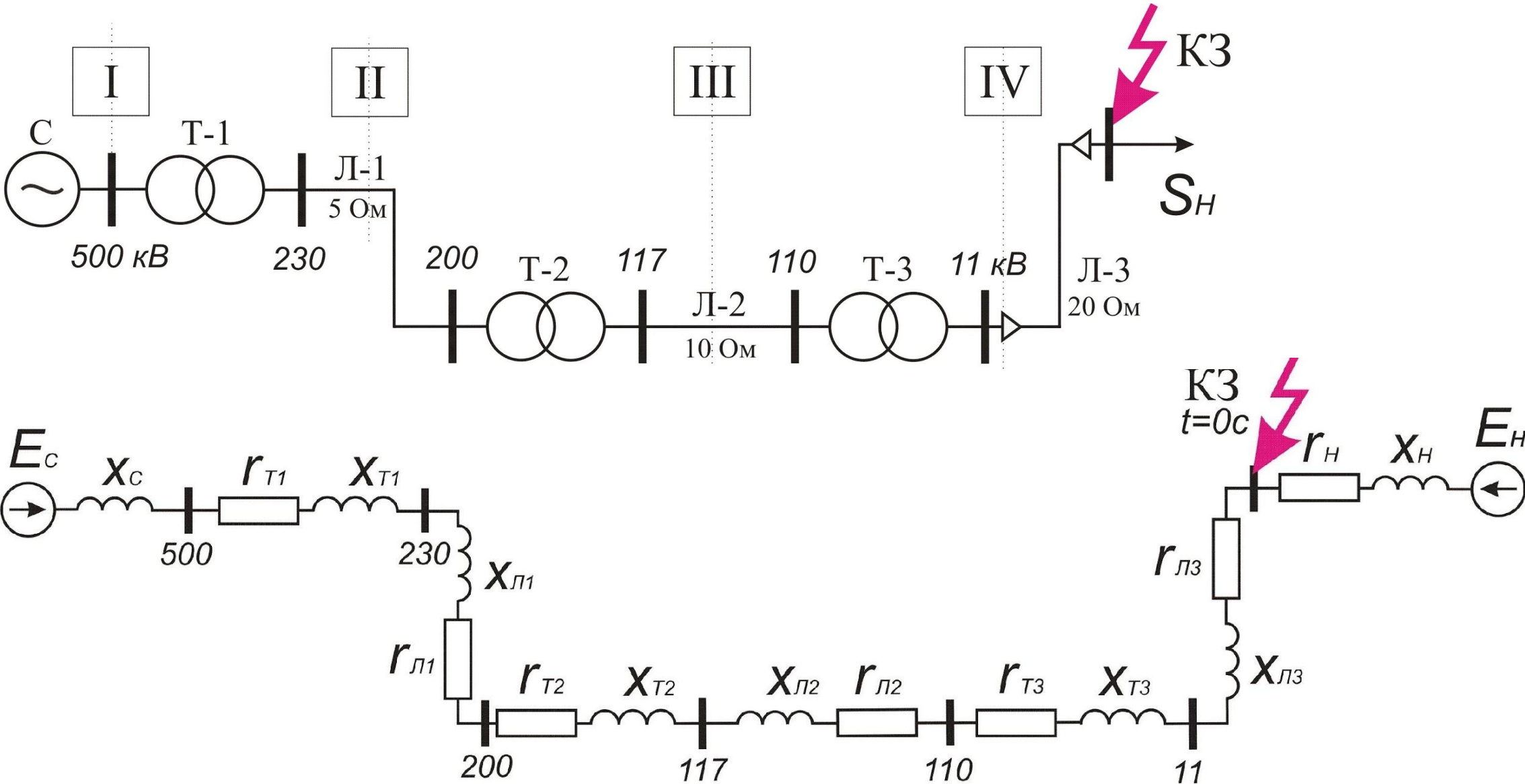
- **точное приведение** – учёт действительных  $k_T$   $i$ -ого числа силовых трансформаторов;
- **приближённое приведение** – определение по средним номинальным напряжениям ( $U_{CP}$ ) нормированных для каждой ступени номинального напряжения:
- **для генераторов:** 11; 13,8; 15,75; 18; 20; 24 кВ;
- **для электрических сетей:** 0,4; 0,69; 6,3; 10,5; 37; 115; 230; 515.

**Следовательно, расчёт ТКЗ возможно решить четырьмя способами:**

1. **точным приведением в относительной системе единиц,**
2. **точным приведением в именованных единицах,**
3. **приближенным приведением в относительных единицах,**
4. **приближенным приведением в именованных единицах.**

**Система единиц и вид приведения при расчёте ТКЗ каждому студенту при выполнении РГР задаётся преподавателем (возможно согласование).**

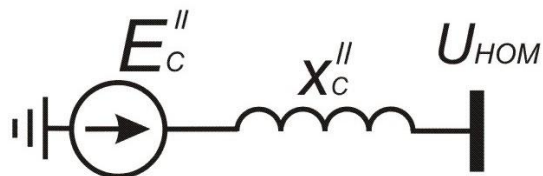
# I. Составление схем замещения (СЗ)



## Схема замещения

## Расчётные выражения параметров

### 1) Система



**эдс:**  $E_C = E''_{\phi} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}} = U_{\phi|0|_{-режим до КЗ(ном)}}$ , т.е. 1 о.е.

$U_{НОМ(б)}$  – номинальное элемента по паспорту или базисное в (·) КЗ, кВ

**Сопротивление**, в зависимости от паспортных данных:

– при  $U_{НОМ}, S_{КЗ}$ :  $x_{C1} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{КЗ}}$  или  $\frac{U_{б}^2}{S_{б}}$  или  $S_{б} = \frac{U_{н}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл}} x_{*(н)} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}}$

– при  $I_{отк.НОМ}$ :  $x_{C1} = \frac{U_{НОМ}}{S_{КЗ}}$  или  $\frac{U_{б}}{S_{б}}$  или  $S_{б} = \frac{U_{н}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл}} x_{*(н)} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}}$

– при  $S_{НОМ}, x_{*(НОМ)}$ :  $x_{C1} = \frac{U_{НОМ}}{S_{КЗ}}$  или  $\frac{U_{б}}{S_{б}}$  или  $S_{б} = \frac{U_{н}}{\sqrt{3} \cdot I_{откл}} x_{*(н)} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}}$

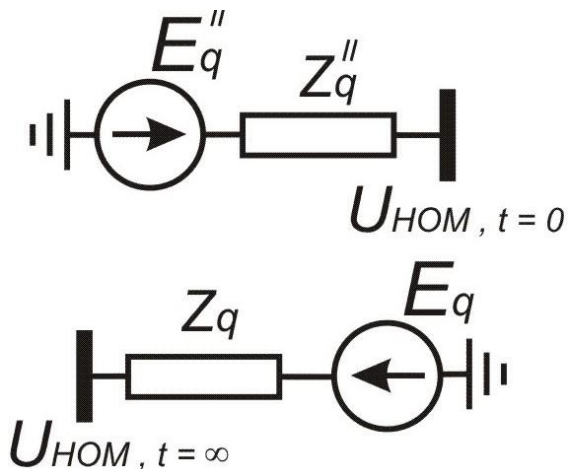
№ узла	Состав потребителей узла, %						Параметры узла нагрузки напряжением 6 - 10 кВ	
	СД	АД	АДН	П	ЭТ	О	$Z''_{*нг(н)}$	$E''_{*нг(н)}$
1	100	-	-	-	-	-	$0,04 + j0,15$	1,11
2	-	100	-	-	-	-	$0,03 + j0,17$	0,936
3	25	10	40	10	11	4	$0,3 + j0,43$	0,865
4	50	10	15	-	-	25	$0,1 + j0,33$	1,03
5	-	-	35	-	-	65	$0,17 + j0,23$	0,788
6	50	50	-	-	-	-	$0,02 + j0,2$	1



# I. Расчётные паспортные данные элементов СЗ

## Схема замещения

3) Синхронные (генераторы, компенсаторы, двигатели) > S, учитываются отдельно



4) АД, S ≥ 100 кВт

## Расчётные выражения параметров

• **сверхпереходное (в начальный момент) E'' (фазное, кВ):** для СГ и ЭД, до КЗ работающих в режимах:

$$\text{н.в.: } E''_{\phi} = \sqrt{\left( U_{\phi|0|} + I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_{|0|} \right)^2 + \left( I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_{|0|} \right)^2},$$

$$\text{н.в.: } E''_{\phi} = \sqrt{\left( U_{\phi|0|} - I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \sin \varphi_{|0|} \right)^2 + \left( I_{|0|} \cdot x''_d \cdot \cos \varphi_{|0|} \right)^2} \quad \text{АД, х}$$

$U_{\phi|0|}, I_{|0|}, \varphi_{|0|}$  – напряжение на выводах, ток статора, угол сдвига фаз [кВ; кА; град].

• **сопротивления элементов:**

$$x_{*G} = x''_{*d(н)} \cdot \frac{U_{н}^2}{S_{н}}; \quad r_G = \frac{x_G}{\omega T_a}; \quad S_{н} = \frac{P_{н}}{\cos \varphi_{н}}$$

При КЗ на шинах СГ применять типовые кривые [2,3]

$$x_{MS} = \frac{1}{I_{*пуск}} \sqrt{1 - \left( \frac{M_{*пуск}}{I_{*пуск}} \right)^2} \cdot x_{*АД} \approx \frac{1}{I_{*П}}; \quad r_{*АД} \approx \frac{s_{НОМ} (1...4\%)}{100}$$

кратность  $\frac{I_{*П}}{I_{*пуск}}$   
пускового тока ( $I_{пуск} / I_{НОМ}$ );  $s_{н}$  – скольжение, %

- **Ориентировочные значения в приближённых расчётах:**
- При КЗ на шинах, питаемых непосредственно от генераторов средней и большой мощности:  $T_a = 0,09$  с,  $K_y = 1,9$ .
- При КЗ в установках и сетях напряжением выше 1 кВ:  $T_a = 0,045$  с,  $K_y = 1,8$ .
- При КЗ на стороне низшего напряжения понижающих трансформаторов мощностью 1,6 МВ·А и ниже:  $T_a = 0,008$  с,  $K_y = 1,3$ .

• **Средние значения отношений X/R для генераторов:**

Мощность, МВт	12,5 – 30	37,5 – 55	62,5 – 100	Более 100
Гидрогенераторы	40	50	60	-
Турбогенераторы	60	80	90	120

• **Асинхронные двигатели при КЗ на их зажимах:**

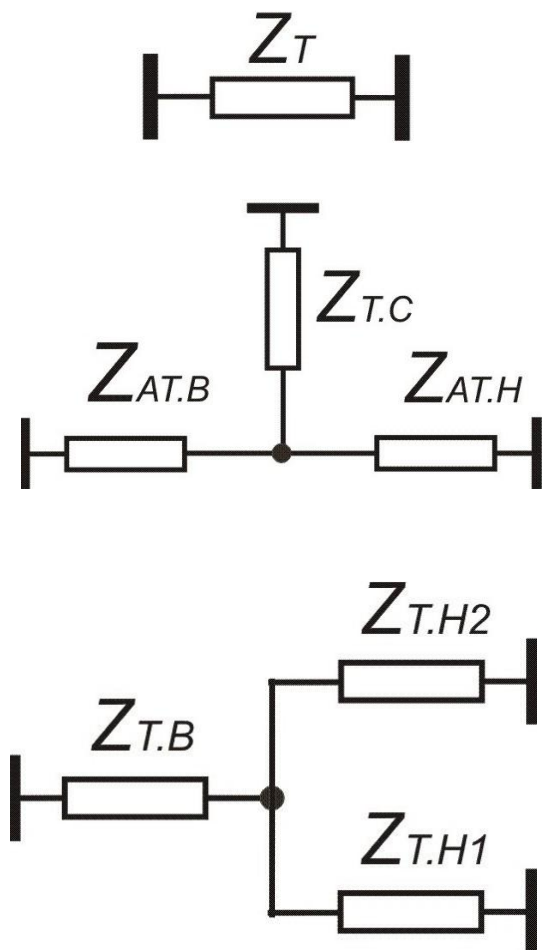
Параметр	Асинхронные двигатели серий						
	А	АО	ДА30	АТД	АТМ	ВДД, ДВДА	ДАМС О
$T'_{АД}$ , с	0.04	0.04	0.09	0.06	0.075	0.06	0.044
$T_{aАД}$ , с	0.04	0.03	0.02	0.058	0.043	0.05	0.035
$K_{y(АД)}$	1.56	1.49	1.5	1.69	1.67	1.66	1.55

# I. Расчётные паспортные данные элементов СЗ

## Схема замещения

## Расчётные выражения параметров

### 5) Трансформаторы:



$$X_T = \frac{U_K(\%) \cdot U_H^2}{100 \cdot S_H}; \quad R_T = \frac{\Delta P_K \cdot 10^{-3} \cdot U_H^2}{S_H} \quad [\text{ОМ}]$$

$$\left. \begin{aligned} x_B &= \frac{(u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H}) \cdot U_H^2}{2 \cdot 100 \cdot S_H} \\ x_C &= \frac{(u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H}) \cdot U_H^2}{2 \cdot 100 \cdot S_H} \\ x_H &= \frac{(u_{KB-H} + u_{KC-H} - u_{KB-C}) \cdot U_H^2}{2 \cdot 100 \cdot S_H} \end{aligned} \right\}; \quad r_T = \frac{\Delta P_K \cdot 10^{-3} \cdot U_H^2}{2 \cdot S_H};$$

$$r_{AT.C} \approx 0.$$

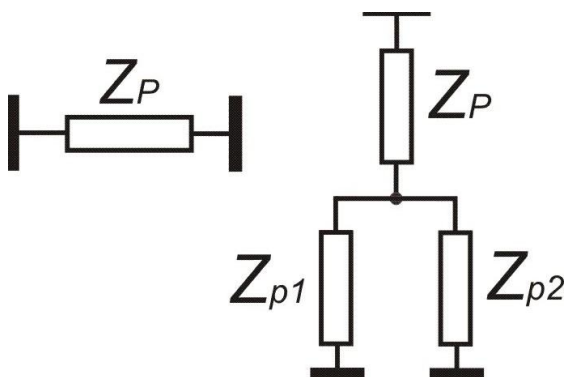
$$x_B = \frac{0,125 \cdot u_{KB-H} \cdot U_H^2}{100 \cdot S_H}; \quad x_{H1} = x_{H2} = \frac{1,75 \cdot u_{KB-H} \cdot U_H^2}{100 \cdot S_H}$$

$$K_p = \frac{U_{k.H1-H2}}{U_{k.B-H}} \text{ коэффициент расщепления ТР, обычно принимают } = 3,5.$$

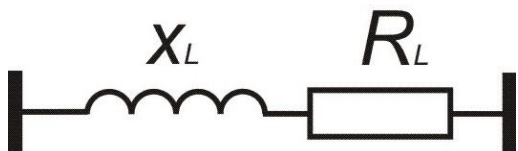
# I. Расчётные паспортные данные элементов СЗ

## Схема замещения

### 7) Реакторы (LR):



### 8) ЛЭП (ВЛ, КЛ):



## Расчётные выражения параметров

$$x_P = \frac{\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3}I_{\text{нр}}} \cdot \frac{U_{\text{осн}}^2}{U_{\text{ср}}^2}; \quad R = \frac{\Delta P_{(\text{ффкВт})}}{I_{\text{н(А)}}^2} 10^3$$

$$x_P = -k_{\text{св}} \cdot x_{\text{ном}}; \quad x_{P1} = x_{P2} = (1 + k_{\text{св}}) \cdot x_{\text{ном}}; \quad R = \frac{\Delta P}{2I_{\text{н}}^2} 10^3$$

$$x_{\text{Л}} = x_{\text{уд}} \cdot l; \quad R_{\text{Л}} = r_{\text{уд}} \cdot l \quad \text{ввлэп!!!} \quad r_{\Sigma} \leq 30 \% \cdot x_{\Sigma}$$

Значения  $X_{\text{уд}}$  и  $r_{\text{уд}}$  (Ом/км) принимать по справочникам.

В приближённых расчётах рекомендуется принимать:

- для ВЛ 500 кВ – 0,307 Ом/км;
- для одноцепных ВЛ 6-220 кВ – 0,4;
- для ВЛ до 1 кВ – 0,3 Ом/км;
- для 3-ф КЛ 35 кВ – 0,12 Ом/км;
- для 3-ф КЛ 6 и 10 кВ – 0,08 Ом/км;
- для 3-ф КЛ до 1 кВ – 0,07 Ом/км.

$$r_{\text{уд}} = \frac{1000}{\gamma S} = \frac{30}{S}$$

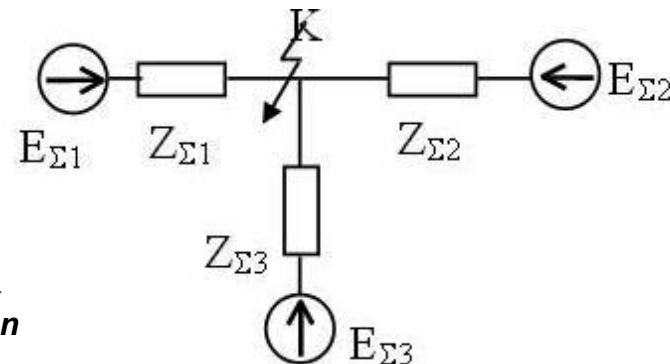
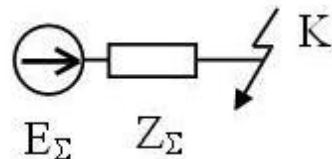
– для Al и стали-Al проводов:  $\gamma = 32$  км/(Ом·мм<sup>2</sup>) – уд. проводимость; S – сечение провода одной фазы, мм<sup>2</sup>.

а) ВЛ-220 (АС-240):  $x_{\text{уд}} = 0,435; r_{\text{уд}} = 0,121$

б) ВЛ-110 (АС-150):  $x_{\text{уд}} = 0,42; r_{\text{уд}} = 0,2$

## II. Преобразование схем замещения

Целью преобразования СЗ является ее приведение к **простейшему виду**, т.е. в СЗ с несколькими источниками производят замену отдельных генерирующих ветвей с  $E_1, \dots, E_n$  и сопротивлениями  $x_1, \dots, x_n$  одной эквивалентной генерирующей ветвью.



**В частности, если источники энергии в СЗ учтены только индуктивными сопротивлениями и ЭДС, то эквивалентные ЭДС и сопротивление:**

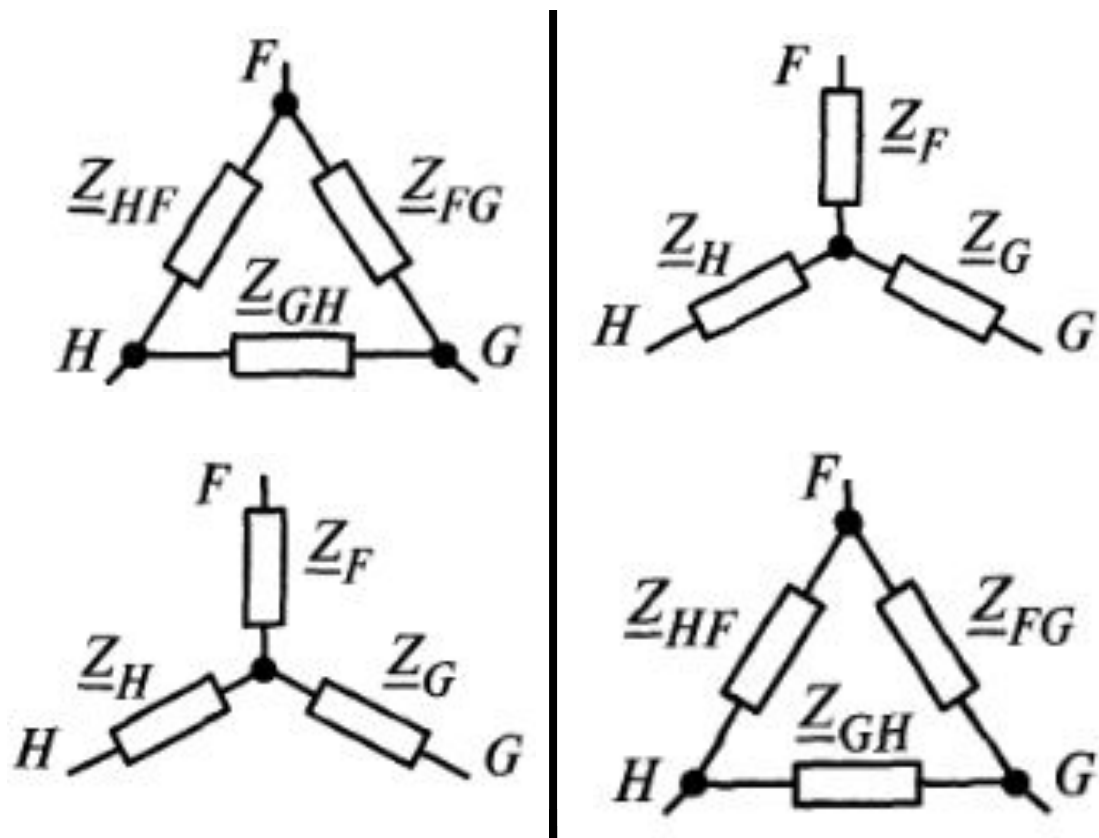
$$E_{\text{эк}} = \frac{\frac{E_1}{x_1} + \frac{E_2}{x_2} + \dots + \frac{E_n}{x_n}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}; \quad x_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$

- Преобразование СЗ производится в направлении от источника питания ( $E_n$ ) к расчётной точке КЗ;
- Первоочередной задачей расчета КЗ обычно является нахождение тока непосредственно в аварийной ветви или в месте КЗ. Поэтому преобразование СЗ рекомендуется вести так, чтобы аварийная ветвь была сохранена до конца преобразования или участвовала в преобразовании только на последних его этапах.

## II. Формулы для преобразования СЗ

Схема до преобразования	Схема после преобразования	Эквивалентный расчётный вид после преобразования
-------------------------	----------------------------	--

### 4) Преобразования треугольника в звезду и обратно 5):



$$\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$$

$$\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$$

$$\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$$

$$\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$$

$$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$$

$$\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$$

# Пример расчёта в и.е.

- сопротивления L-1, L-2 и T-1, которые затем можно привести к относительным БУ:

$$x_L = x_{уд} l (k_2)^2, \text{ где } k_2 = \frac{U_3}{U_2};$$

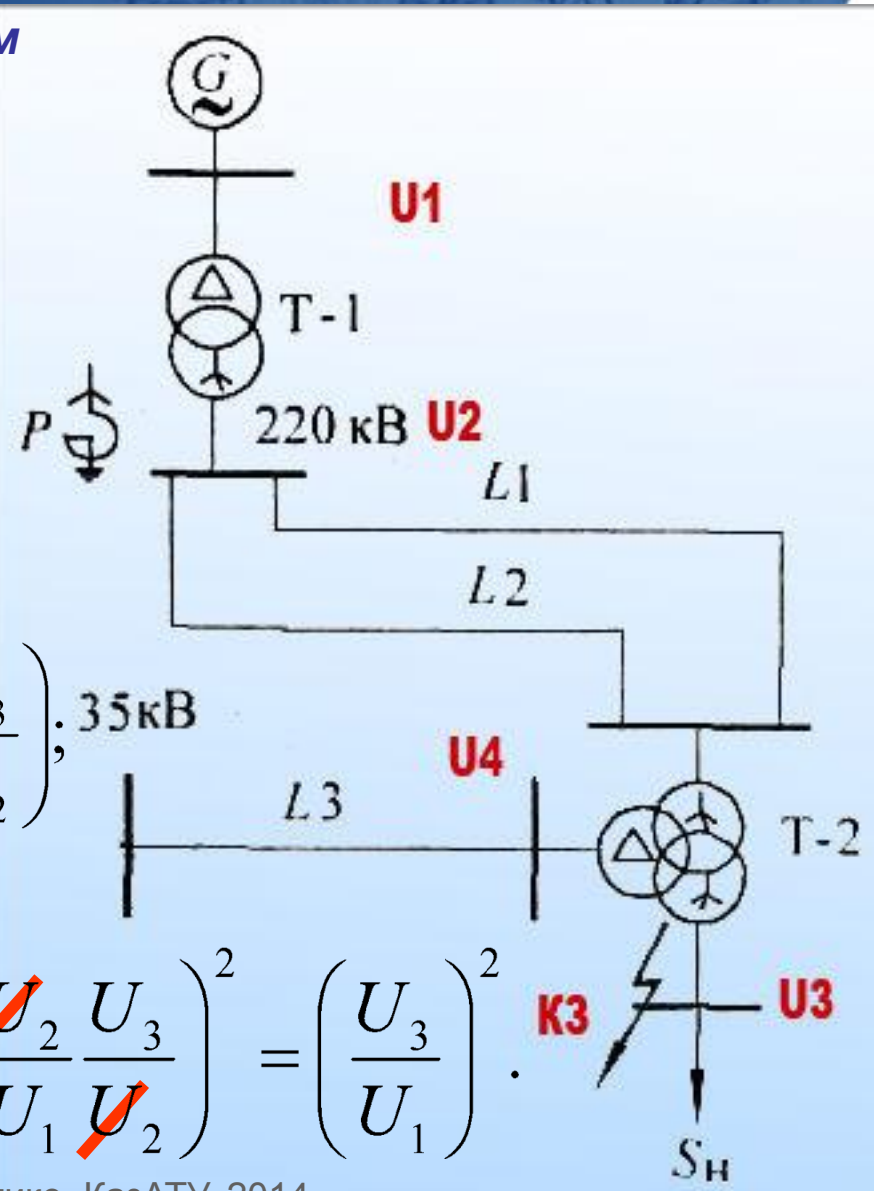
$$x_{T1} = \frac{U_K \% \cdot U_H^2}{100 \cdot S_H} (k_1 k_2)^2, \text{ где } k_1 k_2 = \left( \frac{U_2}{U_1} \frac{U_3}{U_2} \right);$$

- сопротивление генератора сразу в относительных базисных единицах:

$$x_{G*6} = x_{G*H} \frac{S_6 \cdot U_{HG}^2}{S_{HG} U_6^2} (k_1 k_2)^2, \text{ где } k_1 k_2 = \left( \frac{U_2}{U_1} \frac{U_3}{U_2} \right);$$

- использование приближенных  $K_T$  определяемых отношением  $U_{CP}$ :

$$x_{G*6} = x_{G*H} \frac{S_6 \cdot U_{HG}^2}{S_{HG} U_6^2} (k_1 k_2)^2, \text{ где } (k_1 k_2)^2 = \left( \frac{U_2}{U_1} \frac{U_3}{U_2} \right)^2 = \left( \frac{U_3}{U_1} \right)^2.$$

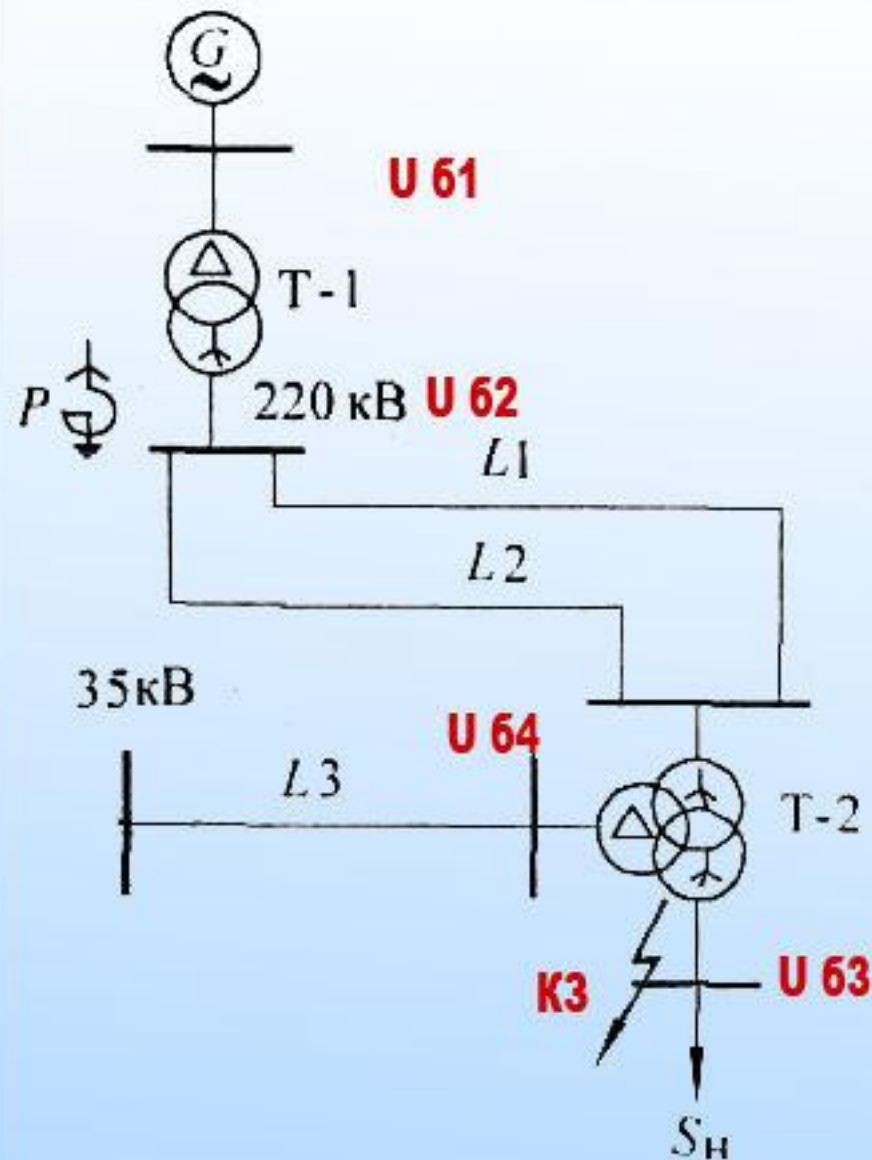


- Определив БУ ( $U_{бi}$  и  $I_{бi}$ ) всех ступеней напряжения, с целью применения для расчетов элементов в местах их расположения без умножения на набор  $k_T$ :

$$x_{G*б} = x_{G*H} \frac{S_{б} \cdot U_{HG}^2}{S_{HG} U_{б1}^2};$$

$$x_{L_{1,2}*б} = x_{уд} l \frac{S_{б}}{U_{б2}^2};$$

$$x_{T_1*б} = \frac{U_K \%}{100} \frac{S_{б}}{S_{H.T}} \frac{U_{H.T}^2}{U_{б3}^2}.$$







***Благодарю  
за внимание !***



# *Рекомендуемый алгоритм расчёта и «приведения» схем замещения (РГР)*

Такую систему рекомендуется применять в простейших схемах с одной или двумя ступенями трансформации, а также при расчете ТКЗ в ЭУ напряжением до 1 кВ.

**Точное приведение** параметров к выбранной основной (базисной) ступени  $U_{осн}$ :

$$\bar{E} = E(k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i); \quad \bar{Z} = Z \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i)^2.$$

если  $E$  и  $Z$  элемента СЗ выражены в **относительных номинальных единицах**, то приводят их к  $U_{осн}$  по следующим выражениям:

$$\bar{E} = E_{*(H)} \cdot U_H (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i);$$

$$\bar{Z} = Z_{*(H)} \frac{U_H^2}{S_H} (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i)^2,$$

**Приближённое приведение**, при соответствующих исходных данных:

$$\bar{E} = E \frac{U_{\delta}}{U_{cpN}}; \quad \bar{Z} = Z \cdot \left( \frac{U_{\delta}}{U_{cpN}} \right)^2;$$

$E$  и  $Z$  - истинные значения (по паспорту);  
 $U_{\delta}$  – среднее номинальное напряжение той ступени, которая принята за основную (базис);  
 $U_{cpN}$  - среднее номинальное той ступени напряжения, с которой производится пересчёт.

$$\bar{E} = E_{*H} \cdot U_{cpN}; \quad \bar{Z} = Z_{*H} \frac{U_{\delta}^2}{S_H}.$$

**Под относительным значением  $\Phi B$  понимают ее отношение к другой одноименной  $\Phi B$ , выбранной за базисную единицу измерения.**

**Пример из ПП:** Трехфазный Т, G или LR с номинальными параметрами  $U_{НОМ}$  (кВ),  $I_{НОМ}$  (кА),  $S_{НОМ}$  (МВ·А),  $x_{НОМ}$  (Ом) связанных соотношениями:

$$S_{НОМ} = \sqrt{3} I_{НОМ} U_{НОМ}; \quad x_{НОМ} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} I_{НОМ}}.$$

Любой другой режим работы (**не номинальный**) этого же элемента, характеризуется некоторыми значениями  $U$ ,  $I$ ,  $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$  и  $X = U / (\sqrt{3} \cdot I)$ , которые выражая в долях номинальных параметров этого же элемента, **принимаемых за базисные**:

$$U_{*(НОМ)} = \frac{U}{U_{НОМ}}; \quad I_{*(НОМ)} = \frac{I}{I_{НОМ}}; \quad S_{*(НОМ)} = \frac{S}{S_{НОМ}}; \quad x_{*(НОМ)} = \frac{x}{x_{НОМ}} = \frac{\sqrt{3} I_{НОМ} x}{U_{НОМ}} = \frac{x \cdot S_{НОМ}}{U_{НОМ}^2}.$$

**Отметим, что** относительные значения  $U_{л}$  и  $U_{\phi}$  (и ЭДС) численно равны, что также касается  $S_{\phi}$  и  $S$  трёх фаз:

$$U_{*лин} = \frac{U_{лин}}{U_{блин}} = \frac{\sqrt{3} U_{\phi}}{\sqrt{3} U_{б\phi}} = \frac{U_{\phi}}{U_{б\phi}} = U_{*\phi}.$$

**А также,** что % переводятся в о.е. делением на 100 ( $U_{к}$  у Т), а долю  $1^{цб}$  умножив на 100

**Возможность замены одних относительных величин другими является существенным достоинством системы о.е. – ех., **время**.**

**За базисную величину принимается время**, в течение которого ротор электрической машины (ЭМ) повернется на 1 электрический радиан при синхронной скорости вращения  $\omega_0$ , т.е.  $\omega_0 t_0 = 1$  или  $t_0 = 1/\omega_0$ . Время в о.е., при  $f = 50$  Гц равно:

$$t_{*6} = \frac{t}{t_0} = \omega_0 t = 314t.$$

За единицу измерения угловой скорости принимают синхронную угловую скорость  $\omega_0$ , тогда:

$$\omega_{*6} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

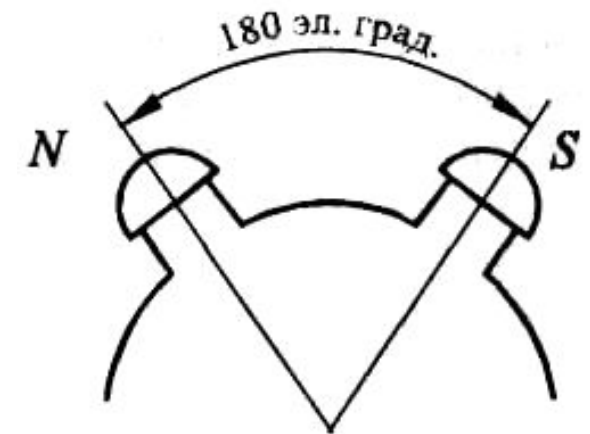
Угол поворота ротора электрической машины определяется в электрических радианах или электрических градусах. Угол в электрических градусах или радианах связан с углом в геометрических градусах выражением:

$$\frac{\delta_{эл}}{\delta_{геом}} = \frac{180}{360/2m_p}$$

откуда

$$\delta_{эл} = \delta_{геом} m_p$$

— число пар полюсов генератора



Отношение между углами, выраженными в радианах и градусах, имеет вид:

$$\frac{\delta_{рад}}{\delta_{град}} = \frac{2\pi f}{360 f}, \quad \text{и т.п.}$$

Эта с.р. позволяет этап «Приведение - учет  $k_{Tn}$ » выполнять на стадии расчета ПСЗ.

## Данный расчёт производится по алгоритму:

1. **Задают 4 базисные ФВ:** во-первых, мощность  $S_6$  – принимается одна для всей схемы любой сложности значение обычно кратно  $10^n$  МВ·А или равно мощности «системы» ( $S_{K3} = S_6 = \sqrt{3} \cdot U_6 \cdot I_6$ ) или же суммарной мощности генераторов исследуемой системы;

2. **Выбирается  $U_{6(осн)1} = U_{ном}$**  основной ступени  $U$  в месте КЗ;

3. **Определяются остальные ФВ, т.с. задаются БУ:**

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}; \quad Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} I_6} = \frac{U_6^2}{S_6};$$

4. **Определяют  $U_{6i}$  и соответственно  $I_{6i}$  других ступеней напряжения** исходной расчетной схемы равным числу ступеней напряжения. При этом  $U_{6i}$  различных ступеней связаны соотношениями:

$$U_{6i} = \frac{U_{6.осн(1)}}{k_1 k_2 \dots k_n}$$

При этом в дальнейших расчетах элементов используют  $U_{6i}$  тех ступеней, на которых **они** расположены уже без умножения на набор  $k_T$ ;

- 5. Определяем значения всех параметров СЗ ( $E$ ,  $Z$ ) в относительных единицах при выбранных базисных условиях, т.е. приводим к принятым БУ расчётные паспортные данные элементов СЗ, используя соотношения и получаем **относительные базисные единицы (ОБЕ)**:**

**Либо, при сокращении промежуточных вычислений** на основе лишь  $S_{\text{б}}$  и  $U_{\text{б}}$ :

$$E_{*_{\text{б}}} = \frac{E}{U_{\text{б}}}; \quad U_{*_{\text{б}}} = \frac{U}{U_{\text{б}}}; \quad S_{*_{\text{б}}} = \frac{S}{S_{\text{б}}}; \quad I_{*_{\text{б}}} = \frac{I}{I_{\text{б}}} \quad ; \quad \underline{Z}_{*_{\text{б}}} = \frac{Z}{Z_{\text{б}}}$$

\* – величина выражена в о.е.; б – приведена к БУ; которые в индексах, если оговорены, могут быть опущены.

- 5. Частный случай ОБЕ – относительные номинальные единицы**, когда за базисные приняты номинальные единицы элемента, например, в паспортных данных  $G$ ,  $MS$ ,  $M$ ,  $T$ ,  $LR$  - сопротивления задают не в Омах, а в о.е. ( $x_{\text{д}} = 0,2$  о. н.), Для чего необходим пересчет к базисным условиям (БУ) по выражениям:

$$E_{*_{\text{б}}} = E_{*_{\text{н}}} \frac{U}{U_{\text{б}}}; \quad U_{*_{\text{б}}} = U_{*_{\text{н}}} \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}}; \quad S_{*_{\text{б}}} = \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{н}}}; \quad I_{*_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{н}}} = I_{\text{б}} / \frac{\sqrt{3}U_{\text{н}}}{S_{\text{н}}}; \quad Z_{*_{\text{б}}} = Z_{*_{\text{н}}} \frac{I_{\text{б}}U_{\text{н}}}{U_{\text{б}}I_{\text{н}}} = Z_{*_{\text{н}}} \frac{S_{\text{б}}U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}U_{\text{б}}^2}$$

## Вместо заключения:

1) Если при составлении и расчёте СЗ, как в относительных, так и в именованных единицах, использовалось приближенное приведение (приблизённый учёт  $K_T$ ) с целью определения ТКЗ в  $t = 0$ , то за  $U_{НОМ}$  и  $U_6$  каждой ступени должно приниматься  $U_{СР}$  по соответствующей шкале, что наглядно представлено в сводной таблице далее, в которой:

$U_6$  – среднее **базисное напряжение основной ступени**;

$U_{СР}$  – среднее **в месте установки данного элемента**,

2) По результатам приведения параметров СЗ в о.е., а также последующего расчёта токов и напряжений в принятой системе, необходимо дать ответ определённых значений в именованных единицах (что требуется, ех., для проверки ЭО, настройки РЗА), для чего достаточно эти значения умножить на свои базисные значения той ступени  $U$ , где находится точка КЗ:

$$I_{и.е.} = I_{о.е.} \cdot I_6 \quad [\text{кА}];$$

$$U_{и.е.} = U_{о.е.} \cdot U_6 \quad [\text{кВ}].$$



# Сводная таблица второго этапа расчёта ТКЗ

СР	Именованные единицы		Относительные единицы	
	ТОЧНОЕ - по $K_T$	по $U_{\text{ср.ном}}$	ТОЧНОЕ	по $U_{\text{ср.ном}}$
Вид приведен.				
Генератор	$X_{r(н)}^* \frac{U_{\text{нр}}^2}{S_{\text{нр}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$X_{r(н)}^* \cdot \frac{U_{\text{осн}}^2}{S_{\text{нр}}}$	$X_{r(н)}^* \cdot \frac{U_{\text{нр}}^2}{S_{\text{нр}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бг}}^2}$	$X_{r(н)}^* \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{нр}}}$
Трансф. (АТ)	$\frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ТН}}^2}{S_{\text{ТН}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$\frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{осн}}^2}{S_{\text{ТН}}}$	$\frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ТН}}^2}{S_{\text{ТН}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бт}}^2}$	$\frac{U_{\text{к}} \%}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ТН}}}$
Нагрузка	$X_{\text{нз}}^* \cdot \frac{U_{\text{НГ Н}}^2}{S_{\text{НГ Н}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$X_{\text{нз}}^* \cdot \frac{U_{\text{НГ Н}}^2}{S_{\text{НГ Н}}}$	$X_{\text{нз}}^* \cdot \frac{U_{\text{НГ Н}}^2}{S_{\text{НГ Н}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бНГ}}^2}$	$X_{\text{нз}}^* \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НГ Н}}}$
Реактор	$\frac{X_{\text{р}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$\frac{X_{\text{р}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}}} \cdot \frac{U_{\text{осн}}^2}{U_{\text{ср.р}}^2}$	$\frac{X_{\text{р}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бр}}^2} = \frac{X_{\text{р}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{I_{\text{нр}}} \cdot \frac{I_{\text{б}}}{U_{\text{б}}}$	$\frac{X_{\text{р}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.л}}^2}$
ЛЭП	$X_0 \cdot l \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{U_{\text{осн}}^2}{U_{\text{ср.л}}^2}$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бл}}^2}$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.л}}^2}$
Ёмкость	$\frac{U_{\text{с}}^2}{S_{\text{кз}}} \cdot (K_{T1} \cdot K_{T2} \dots K_{Tn})^2$	$\frac{U_{\text{с}}^2}{S_{\text{кз}}} \cdot \left( \frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{ср.с}}} \right)^2$	$\frac{U_{\text{с}}^2}{S_{\text{кз}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бс}}^2}$	$\frac{U_{\text{с}}^2}{S_{\text{кз}}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{ср.с}}^2}$
$E, U$	$E = (k_1 k_2 \dots k_n) E$	$E \cdot \frac{U_{\text{осн}}}{U_{\text{ср}}}$	$\frac{E}{U_{\text{б}}}; \frac{U}{U_{\text{б}}}$	$\frac{E}{U_{\text{ср}}}; \frac{U}{U_{\text{ср}}}$
Токи	$\frac{1}{k_1 k_2 \dots k_n} I$	$I \cdot \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{осн}}}$	$I \frac{\sqrt{3} U_{\text{б}}}{S_{\text{б}}} = \frac{I}{I_{\text{б}}}$	$I \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср}}}{S_{\text{б}}}$

**«Сверхпереходная величина» (″)** значит, что она найдена с учетом влияния ДО.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ ( $I_{п0}$ ) является синонимом термина «начальный сверхпереходный ток – I″».

**Так, если расчёт в:**

– именованных единицах, при питании от системы, где  $I_{п0}$  приведено к основной ступени напряжения:

$$I_{п0} = \frac{U_{\bar{b}i}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma}};$$

– о.е., **аналитическим способом** – преобразовав СЗ к эквивалентным ( $E''_{\text{эк},\phi}$  или  $E''_{*\text{эк},(\bar{b})}$  и  $x_{\text{эк}}$  или  $x_{*\text{эк}(\bar{b})}$ ):

$$I_{п0} = \frac{E''_{\text{эк},\phi}}{x_{\text{эк}}} = \frac{E''_{*\text{эк}(\bar{b})}}{x_{*\text{эк}(\bar{b})}} \cdot I_{\bar{b}i}; \quad I_{\bar{b}i} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{\bar{b}i}}.$$

– при приближенных расчетах токов КЗ в местах непосредственного питания от энергосистемы:

$$I_{п0} = \frac{I_{\bar{b}i}}{Z_{*\Sigma(\bar{b})}}.$$



***Благодарю  
за внимание !***