



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



# Переходные процессы в системах электроснабжения

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

**Преподаватель: Никитин Дмитрий Сергеевич**  
**к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ**  
**248 ауд. 8 корп., вн. тел. 1978**

Томск – 2022



*Сопротивления элементов схемы замещения*

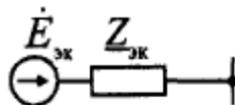
Формулы точного приведения	Формулы приближенного приведения
1.  Генераторы	$x_d'', S_{\text{НОМ}}, U_{\text{НОМ}}$
$x_{*(6)} = x_d'' \frac{U_{\text{НОМ}}^2 S_6}{S_{\text{НОМ}} U_6^2}$	$x_{*(6)} = x_d'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
2.  Трансформаторы	$u_k \%, S_{\text{НОМ}}, U_{\text{НОМ}}$
$x_{*(6)} = \frac{u_k \% U_{\text{НОМ}}^2 S_6}{100 S_{\text{НОМ}} U_6^2}$	$x_{*(6)} = \frac{u_k \% S_6}{100 S_{\text{НОМ}}}$
3.  Реакторы	а) $x_{p\%} I_{\text{НОМ}}, U_{\text{НОМ}}$ ;      б) $x_p (\text{ОМ}), U_{\text{НОМ}}$
а) $x_{*(6)} = \frac{x_{p\%} U_{\text{НОМ}} I_6}{100 I_{\text{НОМ}} U_6}$	$x_{*(6)} = \frac{x_{p\%} I_6}{100 I_{\text{НОМ}}}$
б) $x_{*(6)} = x_p \frac{S_6}{U_6^2}$	$x_{*(6)} = x_p \frac{S_6}{U_6^2}$
4.  Воздушные и кабельные линии	$x_0, l, U_{\text{НОМ}}$
$x_{*(6)} = x_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$	$x_{*(6)} = x_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$

- расчет элементов схемы замещения (активные, реактивные сопротивления, ЭДС);
- составление схемы замещения;
- эквивалентирование до точек КЗ.

**Для каждой точки КЗ:**

- закончить эквивалентирование;
- получить значения эквивалентного сопротивления  $\dot{Z}_{\text{эк н}} = R_{\text{эк н}} + jX_{\text{эк н}}$ ;
- получить значения эквивалентного ЭДС  $\dot{E}$ .

Эквивалентная схема для каждой точки КЗ должна иметь следующий вид при учете только подпитки от энергосистемы



В случае учета асинхронных и синхронных двигателей добавляются соответствующие ветви подпитки.



## Расчет в о.е.

---

При расчете в относительных базисных единицах используют обозначения:

$E_{*эк\ n(\delta)}''$  – результирующее эквивалентное ЭДС для  $n$ -ой точки КЗ;

$Z_{*\Sigma\ n(\delta)}$  – результирующее эквивалентное сопротивление относительно  $n$ -ой расчетной точки КЗ.

$x_{*\Sigma\ n(\delta)}$  – результирующее реактивное эквивалентное сопротивление относительно  $n$ -ой расчетной точки КЗ.

$r_{*\Sigma\ n(\delta)}$  – результирующее активное эквивалентное сопротивление относительно  $n$ -ой расчетной точки КЗ.



## Задание 2

### Расчет режима 3-фазного КЗ системы электроснабжения

1. расчет режима трехфазного КЗ:

- $I_{\Pi m}$  – максимальное расчетное значение периодической составляющей тока КЗ;
- $I_{\Pi}$  – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ;
- $i_{a(0)}$  – максимальное расчетное значение аperiodической составляющей тока КЗ;
- $i_y$  – ударный ток КЗ;
- $T_a$  – постоянная времени;
- $I_y$  – наибольшее действующее значение полного тока КЗ;
- $i_{\Pi}(t)$  и  $i_a(t)$  – мгновенные значения периодической и аperiodической составляющей в произвольный момент времени;

2. ударного тока КЗ  $i_y$ ;

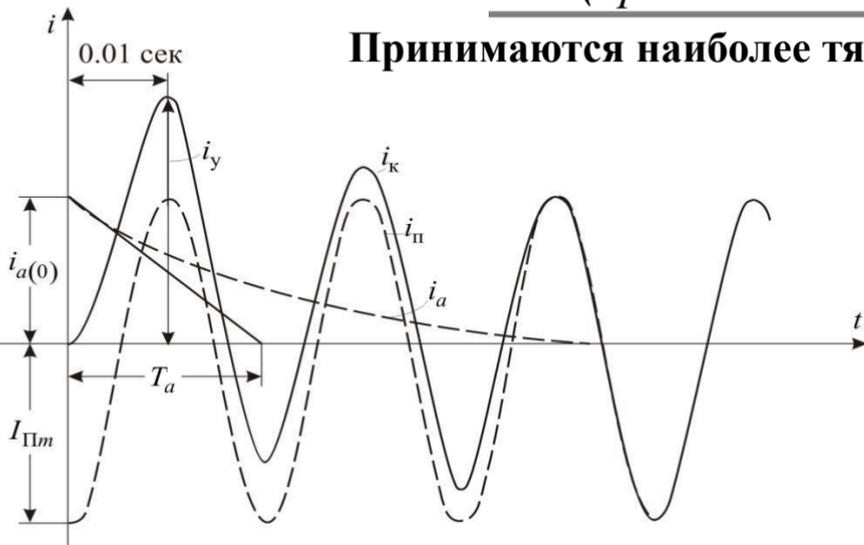
3. остаточного напряжения в шине ГПП (ГРП)  $U_{ост}$ .

Расчет указанных величин осуществляется для каждой точки КЗ.

Соответственно необходимо вводить индексы для каждой точки КЗ.

## Осциллограмма тока короткого замыкания (при наибольшей аperiodической слагающей)

Принимаются наиболее тяжелые условия возникновения КЗ!!!



$i_k$  – ток КЗ;

$i_n$  – периодическая (вынужденная)  
составляющая тока КЗ;

$i_a$  – аperiodическая (свободная)  
составляющая тока КЗ;

$T_a$  – постоянная времени (затухания)  
аperiodической составляющей  
тока КЗ

$I_{Пm}$  – максимальное расчетное значение периодической сост. тока КЗ;

$i_{a(0)}$  – расчетное значение аperiodической составляющей тока КЗ в начальный момент времени;

$i_y$  – ударный ток КЗ (при наибольшем значении аperiodической слагающей, считая, что он наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  Гц составляет около 0,01 с);



## Периодическая составляющая тока КЗ

При аналитическом расчете токов КЗ схему замещения следует путем преобразований привести к простейшему виду и определить результирующую эквивалентную ЭДС  $E''_{\text{ЭК}}$  (или  $E''_{*\text{ЭК}(\text{б})}$ ) и результирующее эквивалентное сопротивление  $Z_{\Sigma}$  (или  $Z_{*\Sigma(\text{б})}$ ) относительно расчетной точки КЗ.

**Начальное действующее значение периодической составляющей тока** в месте КЗ составляет

$$I''_{\text{П}(0)} = \frac{E''_{\text{ЭК}}}{\sqrt{3}Z_{\Sigma}} = \frac{E''_{*\text{ЭК}(\text{б})}}{Z_{*\Sigma(\text{б})}} I_{\text{б}}$$

где  $I_{\text{б}}$  – базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится расчетная точка КЗ

**Максимальное расчетное значение (амплитуда) периодической составляющей тока КЗ**

$$I''_{\text{П}m(0)} = \sqrt{2}I''_{\text{П}(0)} = i_{a(0)}$$



## Постоянная времени

---

**Постоянная времени** затухания апериодической слагаемой

$$T_a = \frac{L_K}{r_K} = \frac{x_K}{\omega r_K}$$

Для расчета постоянной времени можно не пересчитывать о.е в и.е.

$$T_{a n} = \frac{x_{*\Sigma n(\sigma)}}{\omega r_{*\Sigma n(\sigma)}},$$

поскольку

$$r_{*\Sigma n(\sigma)} = r_n / Z_{\sigma} = r_n \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2}$$

$$x_{*\Sigma n(\sigma)} = x_n / Z_{\sigma} = x_n \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2}$$



## Мгновенные значения тока КЗ

**Мгновенное значение аperiodической составляющей в произвольный момент времени  $t$**

– по эквивалентной постоянной времени  $T_a$  для всей схемы:

$$i_{at}(t) = \sqrt{2} I_{\Pi(0)}'' e^{-t/T_a}$$

– при наличии нескольких независимых друг от друга частей (многолучевой схемы) относительно точки КЗ:

$$i_{at}(t) = \sqrt{2} \sum I_{\Pi(0)i}'' e^{-t/T_{ai}}$$

где  $T_{ai}$  – постоянные времени затухания аperiodических составляющих  $i$ -й части схемы.

**Мгновенное значение периодической составляющей в произвольный момент времени  $t$**

$$i_{\Pi}(t) = \sqrt{2} I_{\Pi(0)} \sin(\omega t - \psi_K)$$

$\psi_K$  подбирается так, чтобы выполнялись наиболее тяжелые условия КЗ



## Ударный ток КЗ

---

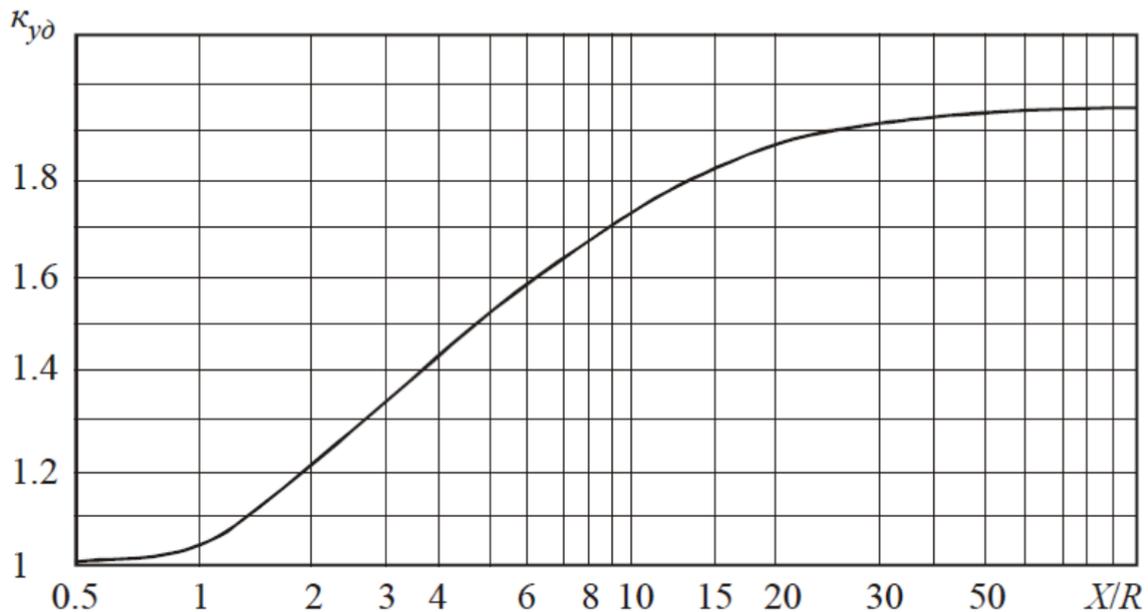
**Ударный ток КЗ**, рассчитываемый по общему ударному коэффициенту, определяется выражением:

$$i_y = \sqrt{2} I_{\Pi(0)}'' K_y,$$

или с учетом индивидуальных ударных коэффициентов для выделенных источников питания:

$$i_y = \sqrt{2} \sum I_{\Pi(0)i}'' K_{yi}$$

где  $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$  – ударный коэффициент, который показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагаемой.



Кривая для определения ударного коэффициента



## Наибольшее действующее значение тока

Действующим значением тока в произвольный момент времени  $t$  называют среднеквадратичное значение за один период  $T$ , в середине которого находится рассматриваемый момент времени  $t$

$$I_t = \sqrt{I_{\Pi t}^2 + I_{at}^2}$$

где  $I_{\Pi t} = I_{\Pi m(t)} / \sqrt{2}$  – действующее значение периодической слагающей для момента времени  $t$ ;

$I_{at} = i_{at}$  – действующее значение аperiodической слагающей равно ее мгновенному значению для  $t$ .

**Наибольшее действующее значение полного тока КЗ:**

$$I_y = \sqrt{I_{\Pi}^2 + I_a^2} = I_{\Pi} \sqrt{1 + 2e^{-0,02/T_a}} = I_{\Pi} \sqrt{1 + 2(K_{уд} - 1)^2}.$$

**Диапазон отношения**

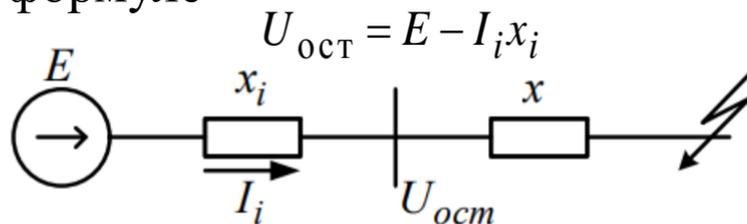
$$1 < I_y / I_{\Pi} < \sqrt{3}$$

**Мощность КЗ**

$$S_k = \sqrt{3} I_{\Pi} U_{cp}$$

## Остаточные напряжения в узлах системы

Необходимо определить остаточные напряжения в заданной точке системы. При этом следует помнить, что по мере удаления от точки КЗ напряжение увеличивается и, согласно рисунку, определяется по формуле



Остаточное напряжение определяют через базисные единицы, а затем переводят в именованные.

$$U_{*\text{ост}} = E_{*\text{ЭК}(\bar{b})}'' - I_{*\Pi(0)(\bar{b})}'' Z_{*\Sigma(\bar{b})}$$

$$U_{\text{ост}} = U_{*\text{ост}} \cdot U_{\bar{b}}$$

Для расчета остаточного напряжения на шинах ГПП (ГРП) выбирают две произвольные точки, находящиеся ниже шин ГПП (ГРП) на разных ступенях трансформации.