



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



# Переходные процессы в системах электроснабжения

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

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

Томск – 2022



Базовыми документами для расчета режимов короткого замыкания в электроэнергетических системах, включая системы электроснабжения, являются:

- **ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ»**
- **ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ»**



При расчетах токов КЗ следует в общем случае учитывать **все элементы электроэнергетической системы**. Допускается эквивалентировать удаленную от места КЗ часть электроэнергетической системы.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока КЗ допускается проводить, **не учитывая активные сопротивления элементов электроэнергетической системы**, если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления (при этом погрешность расчетов не превышает 5%). Указанное условие может не выполняться, когда расчетная схема содержит кабельные линии 6-10 кВ и воздушные линии электропередачи 35-150 кВ с проводами небольшого сечения.

*ГОСТ Р 52735-2007*



При расчетах токов КЗ в электроустановках до 1 кВ **необходимо учитывать**:

- 1) индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- 2) активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи;
- 3) активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- 4) значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей.

При расчетах токов КЗ **рекомендуется** учитывать:

- 1) сопротивление электрической дуги в месте КЗ;
- 2) изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ;
- 3) влияние комплексной нагрузки (электродвигатели, преобразователи, термические установки, лампы накаливания) на ток КЗ, если номинальный ток электродвигателей нагрузки превышает 1,0% начального значения периодической составляющей тока КЗ, рассчитанного без учета нагрузки.



## ВЫВОДЫ ДЛЯ ИДЗ!!!

- 1) Изначально проводим расчет всех активных и реактивных сопротивлений для всех элементов схемы (трансформаторы, линии электропередач, асинхронные и синхронные двигатели и т.д.) по имеющимся формулам.
- 2) При расчете до 1 кВ учитываются все активные и реактивные сопротивления (включая сопротивления защитных аппаратов).
- 3) При расчете свыше 1 кВ учитываются:
  - активные и реактивные сопротивления воздушных и кабельных линий;
  - активные и реактивные сопротивления трансформаторов, асинхронных и синхронных двигателей. При этом при ссылке на соответствующий пункт *ГОСТ Р 52735-2007* возможно пренебречь активной составляющей, если  $R \ll X$  (на практике примем,  $R < 10\% X$ ).

Для трансформаторов можно принять, что  $R \ll X$  при  $U_{ВН} \geq 110$  кВ.

*Пренебрежение конкретными сопротивлениями и обоснование **обязательно** привести в тексте пояснительной записки. На схему замещения нанести только учитываемые сопротивления, по ним же вести дальнейшие преобразования.*



В формулах для расчета часто присутствует  $U_{осн}$ . Например, при расчете сопротивления системы в именованных единицах.

$$x_c = \frac{E_c^2}{S_k^{(3)}} \cdot \left( \frac{U_{осн}}{U_б} \right)^2 \quad \text{— реактивное сопротивление системы Ом;}$$

$$E_c = E_c \frac{U_{осн}}{U_б} \quad \text{— ЭДС системы, кВ.}$$

В данном случае за значение  $U_{осн}$  принимают номинальное напряжение рассматриваемой ступени трансформации  $U_{ном}$ !

Необходимость введения отношения  $U_{осн}/U_б$  обусловлено тем, что в идеале базисное напряжение каждой ступени должно рассчитываться по коэффициентам трансформаторов силовых трансформаторов (т.е. по каталожным данным).

$$U_{бII} = U_{бI} \frac{1}{k_{I-II}}, \quad U_{бIII} = U_{бII} \frac{1}{k_{II-III}} \quad \text{и т. д.,}$$

где  $k_{I-II}$ ,  $k_{II-III}$  — коэффициенты трансформации, определяемые как отношения напряжений на выводах трансформаторов в направлении от ступени, для которой  $U_б$  известно к той ступени, для которой оно рассчитывается.




В итоге возможны случаи, когда  $U_{\text{осн}} \neq U_{\text{б}}$ , и введение поправки  $U_{\text{осн}}/U_{\text{б}}$  оказывается оправданным.

В практических расчетах часто выполняется **приближенное приведение**. Оно заключается в том, что для каждой ступени трансформации устанавливают среднее номинальное напряжение  $U_{\text{ср}}$  из шкалы среднономинальных напряжений. Тогда  $U_{\text{осн}} = U_{\text{б}}$ , и необходимость в поправке  $U_{\text{осн}}/U_{\text{б}}$  пропадает.

**В учебных расчетах допустимо изначально пользоваться формулами приближенного приведения (колонка 2 в таблице), либо считать, что  $U_{\text{осн}}/U_{\text{б}} = 1$ .**



*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) $x_p (\text{Ом}), U_{\text{НОМ}}$ | $x_{*(6)} = \frac{x_p \% U_{\text{НОМ}} I_6}{100 I_{\text{НОМ}} U_6}$     |
|  | $x_{*(6)} = \frac{x_p \% I_6}{100 I_{\text{НОМ}}}$                        |
|  | $x_{*(6)} = x_p \frac{S_6}{U_6^2}$  |
| 4.  Воздушные и кабельные линии $x_0, l, U_{\text{НОМ}}$  | $x_{*(6)} = x_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$                                      |
|  | $x_{*(6)} = x_0 l \frac{S_6}{U_6^2}$                                      |







При расчетах токов КЗ допускается максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту КЗ и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту КЗ.

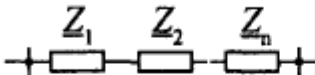
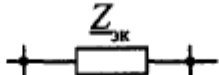
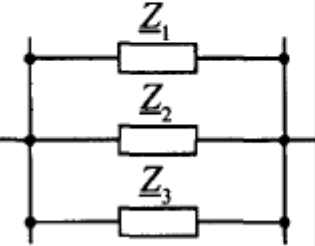
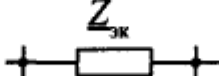
*ГОСТ 28249-93*



При аналитических расчетах токов КЗ исходные схемы замещения, в которых представлены различные элементы исходных расчетных схем, следует путем последовательных преобразований приводить к **эквивалентным результирующим схемам замещения**, содержащим эквивалентную ЭДС (в схемах прямой последовательности), эквивалентное результирующее сопротивление соответствующей последовательности и источник напряжения одноименной последовательности, а при трехфазном КЗ – точку КЗ.

Если исходная схема замещения не содержит замкнутых контуров, то она легко преобразуется в эквивалентную результирующую схему путем последовательного и параллельного соединения элементов и путем замены нескольких источников, имеющих разные ЭДС и разные сопротивления, но присоединенных в одной точке, одним эквивалентным источником.



| Вид преобразования          | Исходная схема  | Преобразованная схема  | Сопротивление элементов преобразованной схемы   |
|-----------------------------|---|--|---|
| Последовательное соединение |  |  | $\underline{Z}_{\text{эк}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$   |
| Параллельное соединение     |  |  | $\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{1}{\underline{Y}_{\text{эк}}}, \text{ где}$ $\underline{Y}_{\text{эк}} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$ <p>При двух ветвях</p> $\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ |



При более сложных исходных схемах замещения для определения эквивалентного результирующего сопротивления следует использовать известные способы преобразования, такие как преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений, звезду сопротивлений – в эквивалентный треугольник сопротивлений и т. д.

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| <p>Замена нескольких источников эквивалентным</p> |  |  | $E_{\text{эк}} = \frac{\sum E_i Y_i}{\sum Y_i}$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$   |
| <p>Преобразование треугольника в звезду</p>       |  |  | $\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ |
| <p>Преобразование звезды в треугольник</p>        |  |  | $\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$                                     |



## Задание 2

---

### Расчет режима 3-фазного КЗ системы электроснабжения

Используя, результаты своей работы в задании 1 в соответствии с заданием своего варианта в 7 точках простейшей системы электроснабжения выполнить:

1. расчет режима трехфазного КЗ,
2. ударного тока,
3. остаточного напряжения в шине ГПП (ГРП).

Расчет выполнить для относительных единиц, результаты представить в виде таблицы в системе СИ.



## Задачи, решаемые при расчете КЗ

---

**Для выбора и проверки электрооборудования** допускаются упрощенные методы расчета токов КЗ, если их погрешность не превышает 5%-10%. При этом определяют:

- начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ и значение этой составляющей в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи;
- начальное значение апериодической составляющей тока КЗ и значение этой составляющей в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи;
- ударный ток КЗ.

**Для выбора параметров настройки релейной защиты и автоматики** определяют максимальное и минимальное расчетные значения периодической и апериодической составляющих тока КЗ в начальный и произвольный моменты времени как в месте КЗ, так и в отдельных ветвях расчетной схемы.

**Для целей выбора заземляющих устройств** расчету подлежит значение тока однофазного КЗ.



## Составляющие тока КЗ

---

**Периодическая составляющая тока короткого замыкания** – составляющая тока короткого замыкания в электроустановке, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

**Апериодическая составляющая тока короткого замыкания** – свободная составляющая тока короткого замыкания в электроустановке, изменяющаяся во времени без перемены знака.

**Постоянная времени апериодической составляющей тока короткого замыкания** – электромагнитная постоянная времени, характеризующая скорость затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания.

*ГОСТ Р 52735-2007*





## Составляющие тока КЗ

---

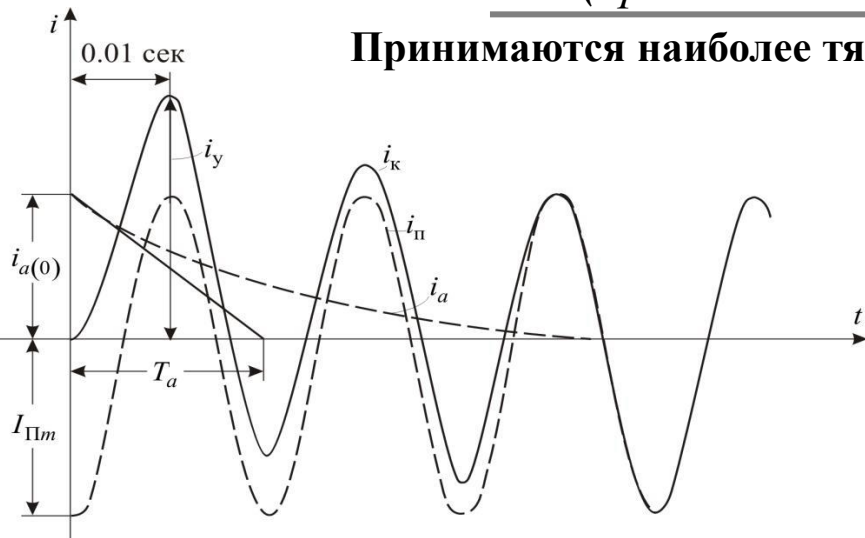
**Ударный ток короткого замыкания** – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания в одной из фаз трехфазной электрической цепи, которое имеет место, когда короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, а до возникновения короткого замыкания ток в цепи носит емкостной характер или отсутствует.

**Ударный коэффициент тока короткого замыкания** – отношение ударного тока короткого замыкания к амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в начальный момент времени.

**Мощность короткого замыкания** – условная величина, равная увеличенному в раз произведению тока трехфазного короткого замыкания на номинальное напряжение соответствующей электрической сети.

## 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

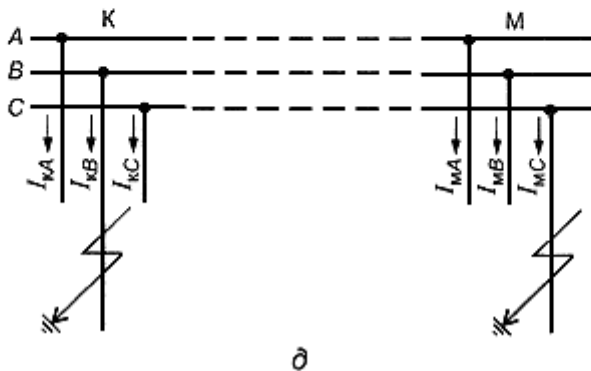
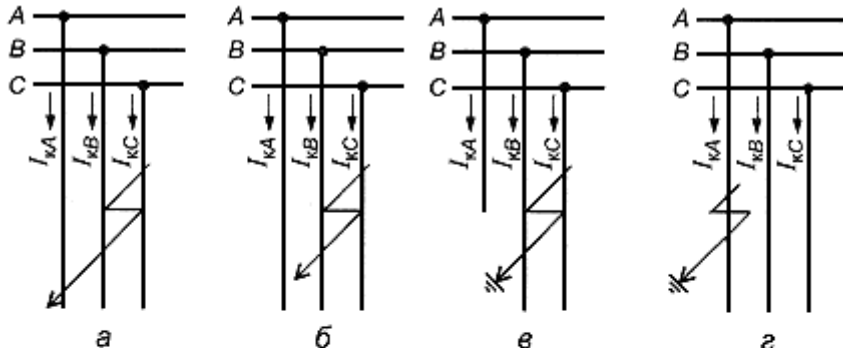
$I_{Пm}$  ( $= I_{П0}$ ) – максимальное расчетное значение периодической сост. тока КЗ;

$i_{a(0)}$  – 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);

## Виды и обозначения КЗ

**Трехфазное короткое замыкание** – короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.



### Виды коротких замыканий

- а – трехфазное КЗ –  $K^{(3)}$ ;
- б – двухфазное КЗ –  $K^{(2)}$ ;
- в – двухфазное КЗ на землю –  $K^{(1,1)}$ ;
- г – однофазное КЗ на землю –  $K^{(1)}$ ;
- д – двойное КЗ на землю –  $K^{(1-1)}$



## Задание 2

### Расчет режима 3-фазного КЗ системы электроснабжения

1. расчет режима трехфазного КЗ:

- $I_{Пm}$  – максимальное расчетное 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;
- $i_{п}$  и  $i_a$  – 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 трехфазного КЗ

$$i_k = i_{\Pi} + i_a \quad - \text{ток КЗ}$$

$$i_{\Pi} = \frac{U_{\max}}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{\Pi \max} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad - \text{периодическая сост. тока КЗ}$$

$$\text{где } Z_k = r_k + j\omega L_k \quad - \text{сопротивление цепи КЗ}$$

$$I_{\Pi \max} = I_{\Pi(0)} = \frac{U_{\max}}{Z_k} \quad - \text{периодическая сост. тока КЗ}$$

$$i_a = i_{a(0)} e^{-t/T_a} \quad - \text{апериодическая составляющая тока КЗ}$$

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k} \quad - \text{постоянная времени апериодической составляющей тока КЗ}$$



## Расчет аperiodической составляющей

Наибольшее значение аperiodической слагающей тока определяется не только фазой включения, но также предшествующим режимом.

Так, при отсутствии предшествующего тока (холостой ход) **величина может достигать амплитуды периодической слагающей**, если в момент короткого замыкания эта слагающая проходит через свой положительный или отрицательный максимум.

Указанные условия представляют наиболее тяжелые условия возникновения КЗ, которые на практике принимают в качестве расчетных.

$i_{к(0)} = i_{п(0)} + i_{а(0)} = 0$  – ток КЗ в начальный момент времени

$i_{а(0)} = I_{п(0)}$  – максимальное расчетное значение аperiodической сост. тока КЗ



## Расчет ударного тока

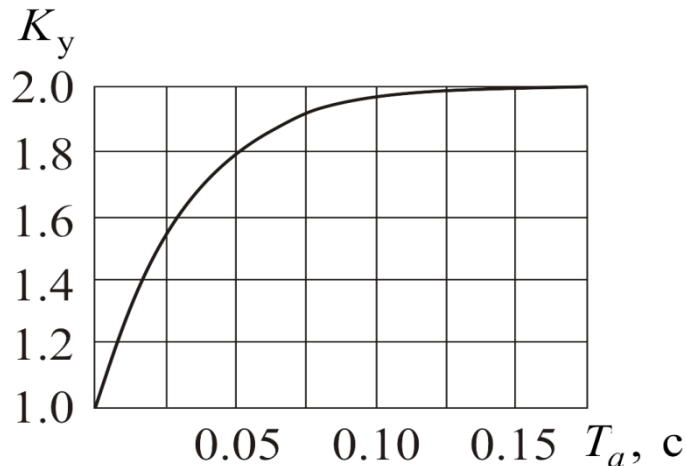
В практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока короткого замыкания, которое называют **ударным током** короткого замыкания, обычно находят при наибольшем значении апериодической слагающей, считая что он наступает приблизительно через полпериода, что при  $f = 50$  Гц составляет около 0,01 секунды с возникновения короткого замыкания.

$$i_{уд} = I_{Пmax} + I_{Пmax} e^{-0,01/T_a} = I_{Пmax} K_{уд} = \sqrt{2} I_{П} K_{уд},$$

где  $K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$  – ударный коэффициент

Ударный коэффициент показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической слагаемой.

$$1 < K_{уд} < 2$$





## Расчет действующего значения тока

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

где  $I_{\Pi t} = I_{\Pi \max(t)} / \sqrt{2}$  – 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:**

$$I_y = I_{\Pi(0)} \sqrt{1 + 2(K_{уд} - 1)^2}.$$

**Диапазон отношения**

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