

## Лекция № 27. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением выше 1 кВ.

В нормальных режимах работы в электрической сети протекают токи, допустимые для данной установки. При нарушении изоляции проводов или оборудования в электрической сети внезапно может возникнуть аварийный режим короткого замыкания, вызывающий резкое увеличение токов.

Значительные по величине токи короткого замыкания представляют опасность для элементов электрической сети и оборудования, так как они вызывают чрезмерный нагрев токоведущих частей и создают большие механические усилия.

Кроме того, короткое замыкание в системе электроснабжения вызывает резкое снижение напряжения у потребителей. Понижение напряжения сохраняется до тех пор, пока аппарат под действием защиты не отключит аварийный участок сети.

Для сохранения необходимого уровня надежности электроснабжения потребителей применяют быстродействующие релейные защиты и выключатели, которые отключают аварийный участок, уменьшая последствия коротких замыканий.

Для обеспечения требуемой работоспособности электрической сети и оборудования кроме расчетов нормальных электрических режимов их работы производят расчеты возможных аварийных режимов, выбирая электрическую сеть и оборудование таким образом, чтобы они выдерживали без повреждения действие наибольших возможных токов короткого замыкания.

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы электрическое соединение различных точек электроустановки между собой или с землей, при котором токи в аппаратах и проводниках, примыкающих к месту соединения, т.е. к месту КЗ, возрастают, превышая, как правило, расчетные значения нормального режима.

В трехфазных электрических установках различают три основных вида коротких замыканий: трехфазное, двухфазное и однофазное.

Трехфазное короткое замыкание является симметричным замыканием.

Двухфазное и однофазное короткое замыкание являются несимметричными, так как при их возникновении нарушается симметрия напряжений и токов трехфазной системы.

Наиболее часты однофазные КЗ (до 60 % от их общего количества).

Значение токов КЗ зависит от мощности источника питания, сопротивления цепи, от вида, а также момента возникновения КЗ и длительности его действия.

При расчете токов короткого замыкания в установках напряжением выше 1 кВ пренебрегают активным сопротивлением генераторов, силовых трансформаторов и реакторов, так как они невелики по сравнению с их индуктивными сопротивлениями, что практически не влияет на результат расчета токов короткого замыкания.

В кабельных и воздушных линиях большой протяженности следует учитывать активные сопротивления, особенно в кабельных, так как индуктивное сопротивление у них относительно мало.

В установках напряжением до 1 кВ активные сопротивления элементов цепи достаточно велики, поэтому при расчете следует учитывать индуктивные и активные сопротивления.

Расчет токов короткого замыкания можно производить в именованных (омах, амперах, вольтах и т.д.) или в относительных единицах, т.е. в долях от номинальных или базовых значений.

В проектной и эксплуатационной практике расчеты токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1 кВ выполняют только в именованных единицах, а в распределительных сетях свыше 1 кВ - производят как в именованных, так и в относительных единицах. Любой элемент трехфазной электрической сети (генератор, трансформатор, реактор) характеризуется номинальными параметрами.

#### **Расчет токов короткого замыкания в относительных единицах.**

В этом случае все расчетные данные приводят к базисному напряжению и базисной мощности. За базисное напряжение принимают номинальные напряжения  $U_{ном}$  0,23; 0,4; 0,69; 6,3; 10,5; 21; 37; 230 кВ.

За базисную мощность  $S_б$  можно выбрать мощность, принимаемую при расчетах за единицу, например мощность системы, суммарные номинальные мощности генераторов станции или трансформаторов подстанции или удобное для расчетов число, кратное десяти [8].

Расчет токов КЗ в сетях выше 1 кВ выполняется в следующей последовательности.

1. Составляется расчетная схема электрической сети, соответствующая нормальному режиму работы системы электроснабжения, считая, что все источники питания включены параллельно. В расчетной схеме учитываются сопротивления питающих генераторов, трансформаторов, высоковольтных линий (воздушных, кабельных), реакторов.

2. По расчетной схеме составляется схема замещения, в которой указываются сопротивления всех элементов: генераторов, трансформаторов, линий, реакторов и т.п.

3. Намечаются точки для расчета токов КЗ. За расчетную точку КЗ принимается такая, в которой аппараты и проводники находятся в наиболее тяжелых условиях [1].

4. Задаются базисными значениями напряжения  $U_б$  и мощности  $S_б$ .

5. Для отдельных элементов схемы принимаются следующие значения индуктивных сопротивлений:

- для синхронных генераторов -  $x_d''$  сверхпереходное реактивное сопротивление  $x_d''$  по продольной оси полюсов:

для турбогенераторов  $x_d'' = 0,125$ ;

для гидрогенераторов с успокоительной обмоткой -  $x_d'' = 0,2$ ,

без успокоительной обмотки  $x_d'' = 0,27$ ;

- для синхронных и асинхронных двигателей  $x_d'' = 0,2$ ;
- для трансформаторов, если пренебречь их активным сопротивлением, напряжение короткого замыкания  $U_k$  (%);
- для воздушных линий напряжением выше 1 кВ значение  $x_0 = 0,4$  Ом/км;
- для кабельных линий напряжением 6÷20 кВ величина  $x_0 = 0,08$  Ом/км;
- для реакторов сопротивление дается в процентах и переводится в относительные единицы или Омы.

Погонное (удельное) активное сопротивление линии определяется по выбранному сечению  $S$  или по справочным таблицам.

В схеме замещения все указанные сопротивления выражают в относительных единицах и обозначают “\*” в индексе.

6. Приводятся сопротивления элементов расчетной схемы КЗ к базисным условиям по формулам:

#### Генераторы

$$X_{*б} = x_{d*}'' \cdot \frac{S_б}{S_H}, \quad (1.44)$$

где  $x_{d*}''$  - сверхпереходное реактивное сопротивление генератора;

#### Энергосистема

$$X_{*б} = x_{*с} \cdot \frac{S_б}{S_H}, \quad (1.45)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность системы, МВ·А.

#### Двухобмоточные трансформаторы

$$X_{*б} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H}, \quad (1.46)$$

где  $U_k$  – напряжение короткого замыкания, %;

$S_H$  – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

#### Трехобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы

*сторона высшего напряжения*

$$X_{*в} = \frac{1}{200} (U_{к(вс)} + U_{к(вн)} - U_{к(сн)}) \cdot \frac{S_б}{S_H}; \quad (1.47)$$

*сторона среднего напряжения*

$$X_{*с} = \frac{1}{200} (U_{к(вс)} + U_{к(сн)} - U_{к(вн)}) \cdot \frac{S_б}{S_H}; \quad (1.48)$$

*сторона нижнего напряжения*

$$X_{*н} = \frac{1}{200} (U_{к(вн)} + U_{к(сн)} - U_{к(вс)}) \cdot \frac{S_б}{S_H}; \quad (1.49)$$

#### Реактор

$$X_{*б} = x_{*р} \cdot \frac{S_б}{U_{ср}^2}, \quad (1.50)$$

где  $x_{*p}$  – номинальное сопротивление реактора, % ;

Воздушные и кабельные линии

$$x_{*6} = x_0 \cdot l \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (1.51)$$

где  $x_0$  – сопротивление 1 км линии, Ом/км

среднее значение  $x_0$  воздушной линии – 0,4 Ом/км,

кабельных напряжением 6-10 кВ - 0,08 Ом/км;

$l$  – длина линии, км;

$U_{cp}$  – среднее напряжение линии (6,3; 10,5; 37; 115 и т. д.), кВ;

*активное сопротивление*

$$r_{*6} = r_0 \cdot l \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (1.52)$$

где  $r_0$  - сопротивление 1 км линии, Ом/км.

Синхронные электродвигатели и компенсаторы вводятся в схему замещения своими сопротивлениями  $X_d''$  и ЭДС  $E_0''$

$$x_* = X_d'' \frac{S_6}{S_H}, \quad (1.53)$$

где  $X_d''$  - сверхпереходное сопротивление в относительных единицах. При отсутствии каталожных данных можно принимать следующие средние значения:

для синхронных электродвигателей

$$x_d'' = 0,2, E_0'' = 1,1;$$

для синхронных компенсаторов

$$x_d'' = 0,2, E_0'' = 1,2.$$

Асинхронные электродвигатели учитываются сопротивлениями  $X''$  и ЭДС  $E_0''$

$$x_* = x_d'' \frac{S_6}{S_H}, \quad (1.54)$$

где  $x_d''$  - сверхпереходное сопротивление, средние значения  $x'' = 0,2$ ,  $E_0'' = 0,9$ ;

7. Выполняется преобразование схемы замещения, которая путем различных преобразований приводится к такому виду, чтобы между каждым источником питания и точкой короткого замыкания находилось только одно результирующее сопротивление  $x_\Sigma$ . Обычными приемами преобразования схемы являются последовательное и параллельное сложение сопротивлений, преобразование треугольника в звезду и т.п.

8. Определяется результирующее сопротивление схемы, например для схемы, состоящей из двух ветвей по формуле:

$$x_{*рез} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3. \quad (1.55)$$

9. Определяются коэффициенты распределения при двух ветвях

$$c_1 = \frac{x_2}{x_1 + x_2}; \quad c_2 = \frac{x_1}{x_1 + x_2}, \quad (1.56)$$

проверка  $\Sigma C = 1$ .

10. Вычисляются сопротивления ветвей преобразованной схемы:

$$x_1' = \frac{x_{*рез}}{c_1}; \quad x_2' = \frac{x_{*рез}}{c_2}. \quad (1.57)$$

При преобразованиях схема сворачивается к точке КЗ.

11. Производится вычисление токов трехфазного короткого замыкания. После преобразования (сворачивания) схема состоит из нескольких ветвей. В каждой ветви источник питания отделен от точки короткого замыкания своим результирующим сопротивлением  $x_{*\Sigma}$  или  $z_{*\Sigma}$ . Если результирующее сопротивление не превышает  $\frac{1}{3} x_{*\Sigma}$ , то его можно исключить из последующего расчета.

В зависимости от параметров источника вычисление токов трехфазного КЗ осуществляется одним из следующих способов.

1. Источник известного типа (генераторы и электростанции). При малом удалении источников от точки короткого замыкания ( $x_{расч} < 3$ ) вычисление ведется по расчетным кривым (рис. 1.5). Так как расчетные кривые показывают зависимость тока короткого замыкания от сопротивления, приведенного к номинальной мощности источника, то предварительно определяется расчетное сопротивление ветви:

$$x_{*расч} = x_{*\Sigma} \frac{S_H}{S_6}, \quad (1.58)$$

где  $S_H$  – номинальная мощность источника, МВ·А.

По расчетным кривым находят относительные значения токов  $I_*''$  при  $t=0$  и  $I_{*\infty}$  при  $t=\infty$ .

Вычисляются токи в ветвях

$$I'' = I_*'' \cdot I_H; \quad I_{\infty} = I_{*\infty} \cdot I_H, \quad \text{кА}, \quad (1.59)$$

где  $I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H}$  – номинальный ток источника для ступени напряжения

$U_H$ , на которой находится точка КЗ, кА.

Если  $x_{*расч} > 3$ , то токи короткого замыкания определяются следующим образом

$$I'' = I_{\infty} = \frac{I_H}{x_{*расч}} \quad \text{или} \quad I'' = I_{\infty} = \frac{I_6}{x_{*\Sigma}}.$$

Мощность короткого замыкания

$$S_K = \sqrt{3} \cdot I'' \cdot U_H. \quad (1.60)$$

Ударный ток КЗ

$$i_y = \sqrt{2}k_y \cdot I'' \approx 2,55I'', \quad (1.61)$$

где  $\sqrt{2}k_y = 2,55$ , если активные сопротивления при вычислении тока КЗ не учитывались и ударный коэффициент  $k_y = 1,8$ .

В этом случае, когда токи короткого замыкания определяются с учетом активного сопротивления кабелей,

$$k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}, \quad (1.62)$$

где  $T_a = \frac{x}{\omega r}$ .

Действующее значение полного тока короткого замыкания за период

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)}, \quad (1.63)$$

при  $k_y = 1,8$   $i_y = 1,52I''$ .

1. Энергосистема неограниченной мощности:

$$I'' = I_\infty = \frac{I_6}{x_{*\Sigma}}. \quad (1.64)$$

$S_k, i_y, i_y$  – вычисляются также, как в случае питания точки КЗ от генераторов.

**Пример.** Определить токи трехфазного короткого замыкания в точке  $K$  схемы, приведенной на рис. 1.6

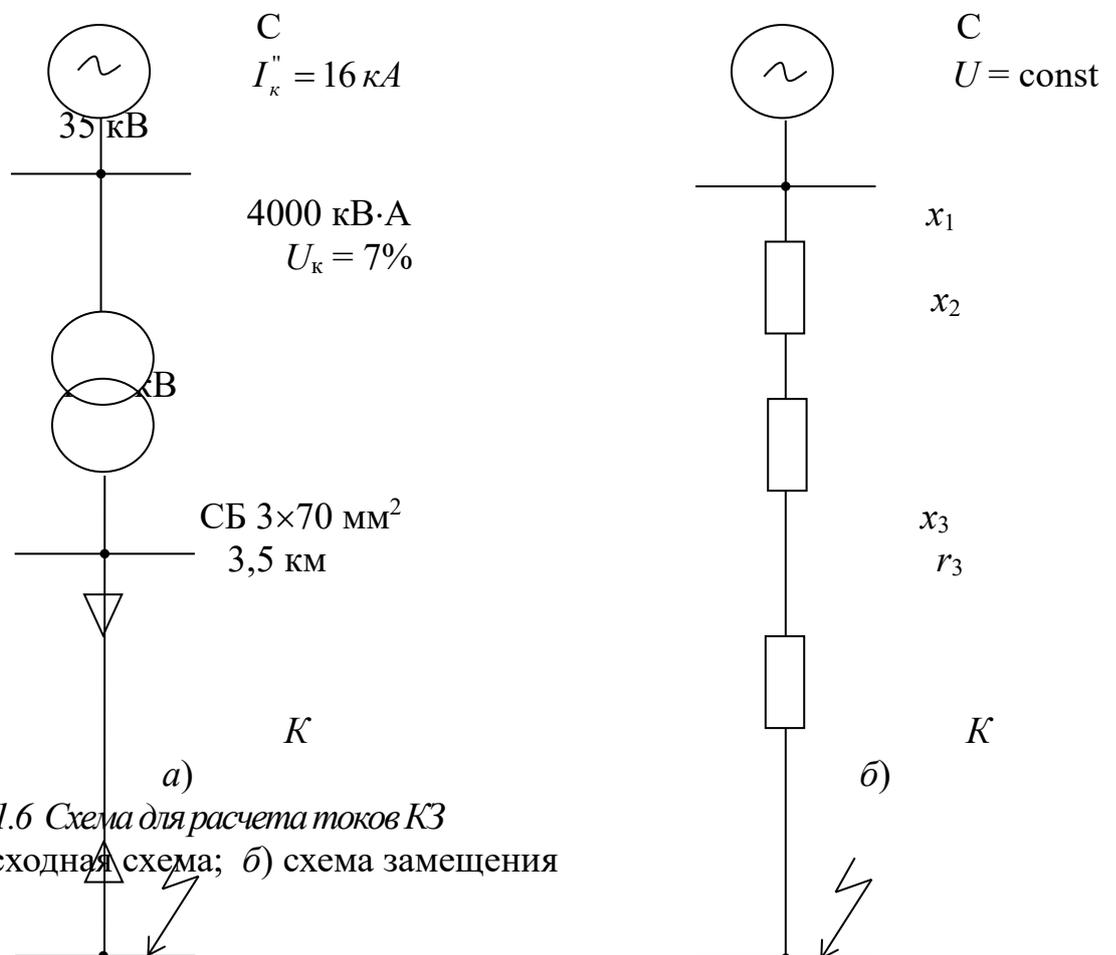


Рис. 1.6 Схема для расчета токов КЗ  
а) исходная схема; б) схема замещения

**Решение.** Принимаем базисную мощность  $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . Базисный ток для ступени 35 кВ  $I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$ .

Вычисляем сопротивление, на которое удален источник неограниченной мощности от шин 35 кВ:

$$x_1 = \frac{I_6}{I''} = \frac{1,56}{16} = 0,097 \approx 0,1.$$

Приводим сопротивления к базисным условиям и составляем схему замещения (рис. 1.7, б).

$$x_2 = 0,07 \cdot \frac{100}{4} = 1,75;$$

$$x_3 = 0,08 \cdot 3,5 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,25;$$

$$r_3 = \frac{1000}{53 \cdot 70} \cdot 3,5 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,86.$$

Результирующее сопротивление:

$$x_\Sigma = 0,1 + 1,75 + 0,25 = 2,1;$$

$$r_\Sigma = 0,86;$$

$$z_\Sigma = \sqrt{2,1^2 + 0,86^2} = 2,27.$$

Базисный ток для ступени напряжения 10,5 кВ

$$I_{6,10,5} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Токи трехфазного короткого замыкания

$$I'' = I_\infty = \frac{5,5}{2,27} = 2,42 \text{ кА}.$$

По кривой (рис. 1.6) определяем  $k_y$ :

$$\text{для } \frac{x}{r} = \frac{2,1}{0,86} = 2,44 \quad k_y = 1,3;$$

$$i_y = \sqrt{2} \cdot 1,3 \cdot 2,42 = 4,45 \text{ кВ};$$

$$S_K = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 2,42 = 44,01 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$