

## ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

### КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

#### Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ

#### Short circuits in electrical installations. Calculation methods in a. c. electrical installations with voltage more than 1 kV

ОКСТУ 3403

Дата введения 1989-01-01

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Министерством энергетики и электрификации СССР

#### ИСПОЛНИТЕЛИ

Л.Г.Мамиконянц, д-р техн. наук; Б.Н.Неклепаев, д-р техн. наук (руководители темы); В.П.Морозкин, д-р техн. наук; И.П.Крючков, канд. техн. наук; Ю.Н.Львов, канд. техн. наук; В.В.Жуков, канд. техн. наук; Ю.П.Кузнецов, канд. техн. наук; Ю.А.Морозова, канд. техн. наук

2. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 14.12.87 N 4495

3. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

4. ПЕРЕИЗДАНИЕ. Январь 1989 г.

Настоящий стандарт распространяется на трехфазные электроустановки напряжением свыше 1 кВ промышленной частоты и устанавливает общую методику расчета токов симметричных и несимметричных коротких замыканий (КЗ) в начальный и произвольный моменты времени.

Стандарт не распространяется на электроустановки напряжением 750 кВ и выше.

Стандарт не регламентирует методику расчета токов:

при сложных несимметриях в электроустановках (например одновременное короткое замыкание и обрыв), при повторных коротких замыканиях и при коротких замыканиях в электроустановках с нелинейными элементами;

короткого замыкания с учетом динамики электрических машин при электромеханических переходных процессах;

при коротких замыканиях внутри электрических машин, трансформаторов и автотрансформаторов;

непромышленных частот, возникающих при коротких замыканиях в линиях электропередачи напряжением 220 кВ и выше.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1.1. Исходные положения

1.1.1. Настоящий стандарт устанавливает общую методику расчета токов короткого замыкания, необходимых для выбора и проверки электрооборудования по условиям короткого замыкания; для выбора установок и оценки возможного действия релейной защиты и автоматики; для определения влияния токов нулевой последовательности линии электропередачи на линии связи; для выбора заземляющих устройств.

1.1.2. Стандарт рассматривает методику расчета токов при КЗ, виды которых показаны на черт. 1.

1.1.3. Величины, подлежащие определению, допустимая погрешность расчета токов КЗ и применяемая при этом методика расчета зависят от целей, указанных в п.1.1.1.

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

начальное значение периодической составляющей тока КЗ и значение этой составляющей в произвольный момент времени, вплоть до расчетного времени размыкания поврежденной цепи;

начальное значение аperiodической 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 аperiodической составляющих тока КЗ в начальный и произвольный моменты времени как в месте КЗ, так и в отдельных ветвях расчетной схемы.

1.1.4. Расчеты токов в произвольный момент времени в отдельных ветвях расчетной схемы требуют учета электромеханических переходных процессов и их следует проводить с применением средств вычислительной техники, используя программы расчетов динамической устойчивости электроэнергетических систем.

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

1.1.6. Расчет периодической составляющей тока КЗ допускается проводить, не учитывая активные сопротивления элементов электроэнергетической системы, в частности, воздушных и кабельных линий электропередачи, если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления.

1.1.7. При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

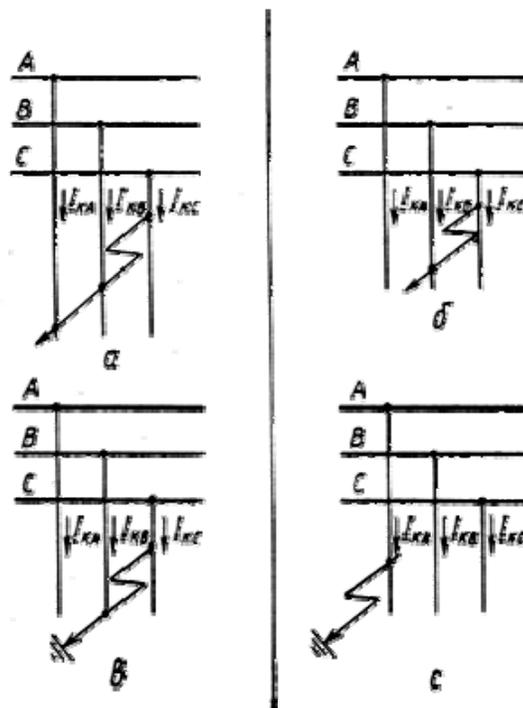
1) сдвиг по фазе ЭДС и изменение частоты вращения роторов, синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;

2) ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

3) насыщение магнитных систем электрических машин;

4) поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330-500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

## Виды коротких замыканий



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

Черт. 1

1.1.8. Для расчета несимметричных КЗ рекомендуется предпочтительно использовать метод симметричных составляющих, принимая полную симметрию по фазам всех элементов электроэнергетической системы (за исключением несимметрии в месте КЗ).

1.1.9. Токи КЗ в зависимости от сложности расчетной схемы и цели расчета допускается определять путем аналитических расчетов с использованием эквивалентных схем замещения, а также расчетов с применением аналоговых расчетных моделей переменного и постоянного тока или с использованием ЭВМ.

## 1.2. Состав необходимых для расчетов токов КЗ параметров элементов расчетной схемы

1.2.1. Состав параметров конкретных элементов расчетной схемы, который в общем случае необходим для расчетов токов КЗ, указан ниже.

### 1.2.1.1. Синхронные машины (генераторы, компенсаторы, электродвигатели):

полная номинальная мощность  $S_{ном}$ , МВ·А, или номинальная активная мощность  $P_{ном}$ , МВт, и номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном}$ ;

номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ;

сверхпереходное сопротивление по продольной оси  $x_d'$ ;

сверхпереходное сопротивление по поперечной оси  $x'_{dq}$ ;

переходное сопротивление по продольной оси  $x''_{d1}$ ;

синхронное сопротивление по продольной оси  $x''_{d2}$ ;

синхронное сопротивление по поперечной оси  $x''_{q2}$ ;

сопротивление обратной последовательности  $x''_2$ ;

сопротивление рассеяния обмотки статора  $x''_{\sigma}$ ;

индуктивное сопротивление обмотки возбуждения  $x''_{f1}$ ;

индуктивное сопротивление продольной демпферной обмотки  $x''_{1d}$ ;

индуктивное сопротивление поперечной демпферной обмотки  $x''_{1q}$ ;

активное сопротивление обмотки возбуждения (при рабочей температуре)  $R_f$ , Ом;

активные сопротивления продольной и поперечной демпферных обмоток (при рабочей температуре)  $R_{1d}$  и  $R_{1q}$ , Ом;

постоянные времени затухания апериодической составляющей тока статора при трехфазном и однофазном КЗ на выводах машины  $T'_s(3\phi)$  и  $T'_s(1\phi)$ , с;

предельный ток возбуждения машины  $I_{f\max}$ , А;

ток возбуждения машины при работе в режиме холостого хода с номинальным напряжением  $I_{f0}$ , А;

коэффициент полезного действия (для синхронных электродвигателей)  $\eta$ , %;

напряжение, ток статора и коэффициент мощности в момент, предшествующий КЗ:  $U_{\text{н}}$ ,  $I_{\text{н}}$  и  $\cos \varphi$ .

1.2.1.2. Асинхронные электродвигатели:

номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ , МВт;

номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ , кВ;

номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{ном}}$ ;

кратность пускового тока по отношению к номинальному току  $K_{\text{п}}$ ;

кратность максимального момента по отношению к номинальному моменту  $k_{max}$ ;

сопротивление статора постоянному току (при рабочей температуре)  $R$ , Ом;

коэффициент полезного действия  $\eta$ , %;

напряжение, ток и коэффициент мощности в момент, предшествующий КЗ.

#### 1.2.1.3. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы:

номинальная мощность  $S_{ном}$ , МВ·А;

номинальные напряжения обмоток, кВ, и фактические коэффициенты трансформации;

напряжения короткого замыкания между обмотками и их зависимость от коэффициентов трансформации;

диапазон регулирования напряжения, определяющий напряжение короткого замыкания в условиях КЗ;

потери короткого замыкания в обмотках, кВт.

#### 1.2.1.4. Токоограничивающие реакторы:

номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ;

номинальный ток  $I_{ном}$ , А;

номинальное индуктивное сопротивление  $x_p$ , Ом, или индуктивность  $L$ , мГн;

номинальный коэффициент связи  $K_{св}$  (только для сдвоенных реакторов);

потери мощности при номинальном токе  $\Delta P$ , кВт.

#### 1.2.1.5. Воздушные и кабельные линии электропередачи:

номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ;

индуктивное сопротивление прямой последовательности  $x_1$ , Ом/км;

индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $x_0$ , Ом/км;

взаимное индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $x_{20}$  (при наличии нескольких воздушных линий на одной трассе), Ом/км;

активные сопротивления прямой и нулевой последовательности  $R_1$  и  $R_0$ , Ом/км;

длина линии  $l$ , км;

емкость  $C$ , Ф/км.

#### 1.2.1.6. Шунтирующие реакторы:

номинальное напряжение  $U_{ном}$ , кВ;

номинальная мощность  $S_{ном}$ , кВ·А.

1.2.2. При расчетах токов КЗ все источники электроэнергии, для которых короткое замыкание является удаленным (см. п.5.3), и соответствующие элементы электрической сети могут быть относительно точки КЗ или иного выбранного узла сети эквивалентированы одним источником неизменного напряжения и одним сопротивлением (далее такой источник называется "системой").

Если для конкретного узла сети известно значение тока трехфазного КЗ от системы  $I_{\Sigma}^{(3)}$ , кА, или мощности трехфазного КЗ от системы  $S_{\Sigma}^{(3)}$ , МВ·А, то эквивалентное индуктивное сопротивление системы ( $x_c$ ) в омах может быть определено по выражению

$$x_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_{\Sigma}^{(3)}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\Sigma}^{(3)}}$$

где  $U_{\text{ср.ном}}$  - среднее номинальное напряжение сети (см. п.1.3.2), кВ, соответствующей ступени напряжения, в узле которой известно значение  $I_{\Sigma}^{(3)}$  или  $S_{\Sigma}^{(3)}$ .

При этом ЭДС системы следует принимать равной среднему номинальному напряжению сети соответствующей ступени напряжения.

### 1.3. Определение параметров элементов эквивалентных схем замещения

#### 1.3.1. Параметры элементов эквивалентных схем замещения могут быть определены:

1) в именованных единицах с приведением значений параметров расчетных схем к выбранной основной (базисной) ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов (см. приложение 1);

2) в относительных единицах с приведением значений параметров расчетных схем к выбранным базисным условиям и с учетом фактических коэффициентов трансформации всех силовых трансформаторов и автотрансформаторов (см. приложение 2);

3) в именованных единицах без приведения значений параметров расчетных схем к одной ступени напряжения сети и с учетом фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

1.3.2. При отсутствии данных о фактических коэффициентах трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов допускается использовать приближенный способ их учета. Он состоит в замене фактических коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов отношением средних номинальных напряжений сетей соответствующих ступеней напряжения. При этом рекомендуется использовать шкалу средних номинальных напряжений сетей: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515 кВ.

Формулы для определения параметров элементов схем замещения в именованных и относительных единицах с приведением их значений к основной ступени напряжения, используя приближенный способ учета коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов, приведены в приложении 3.

### 1.4. Выбор метода расчета токов короткого замыкания

1.4.1. Расчет токов КЗ в малоконтурных расчетных схемах рекомендуется проводить аналитическим способом с использованием известных способов преобразований схем.

1.4.2. Расчет токов КЗ в многоконтурных расчетных схемах рекомендуется проводить методом узловых напряжений или методом контурных токов с использованием ЭВМ.

При использовании метода узловых напряжений необходимо решить матричное уравнение:

$$\underline{I}_{\text{уз}} = \underline{Y}_{\text{уз}} \underline{U}_{\text{уз}}$$

где  $\underline{I}_{\text{уз}}$  - столбцовая матрица узловых токов;

$\underline{Y}_{\text{уз}}$  - квадратная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей;

$\underline{U}_{\text{уз}}$  - столбцовая матрица узловых напряжений.

При использовании метода контурных токов необходимо решить матричное уравнение:

$$\underline{E}_{\text{к}} = \underline{Z}_{\text{к}} \cdot \underline{I}_{\text{к}}$$

где  $\underline{E}_{\text{к}}$  - столбцовая матрица ЭДС;

$\underline{Z}_{\text{к}}$  - квадратная матрица собственных и взаимных сопротивлений независимых контуров;

$\underline{I}_{\text{к}}$  - столбцовая матрица контурных токов.

## 2. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

2.1. При расчете начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами. В автономных системах при расчетах токов КЗ следует учитывать и электродвигатели мощностью менее 100 кВт, если их доля в суммарном токе КЗ составляет не менее 5%.

2.2. Синхронные и асинхронные машины в схему замещения должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Последние следует принимать численно равными значениям этих ЭДС в момент, предшествующий КЗ.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, сверхпереходную ЭДС (фазное значение) в киловольтах следует определять по формуле

$$E_{\phi}^{\prime} = \sqrt{(U_{\phi\text{н}} + I_{\text{ст}} x_d \sin \varphi_{\text{н}})^2 + (I_{\text{ст}} x_d \cos \varphi_{\text{н}})^2}$$

где  $U_{\phi\text{н}}$  - фазное напряжение на выводах машины в момент, предшествующий КЗ, кВ;

$I_{\text{ст}}$  - ток статора в момент, предшествующий КЗ, кА;

$\varphi_{\text{н}}$  - угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, рад.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, работавших до КЗ с недовозбуждением, сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле

$$E_{\phi}^{\prime} = \sqrt{(U_{\phi} - I_{\phi} x_{\text{ад}} \sin \varphi_{\text{пл}})^2 + (I_{\phi} x_{\text{ад}} \cos \varphi_{\text{пл}})^2};$$

для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с перевозбуждением,

$$E_{\phi}^{\prime} = U_{\phi} + I_{\phi} x_{\text{ад}};$$

а работавших с недовозбуждением

$$E_{\phi}^{\prime} = U_{\phi} - I_{\phi} x_{\text{ад}};$$

Для асинхронных электродвигателей сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле

$$E_{\phi}^{\prime} = \sqrt{(U_{\phi} - I_{\phi} x_{\text{ад}} \sin \varphi_{\text{пл}})^2 + (I_{\phi} x_{\text{ад}} \cos \varphi_{\text{пл}})^2};$$

причем сверхпереходное индуктивное сопротивление ( $x_{\text{ад}}$ ) в омах допускается определять по формуле

$$x_{\text{ад}} = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{ном}} \eta}{P_{\text{ном}}},$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение электродвигателя, кВ;

$P_{\text{ном}}$  - номинальная мощность электродвигателя, МВт;

$\cos \varphi_{\text{ном}}$  - номинальный коэффициент мощности электродвигателя;

$\eta$  - КПД электродвигателя, %.

2.3. При расчете токов КЗ в относительных единицах с приведением значений параметров расчетных схем к выбранному базисным условиям для определения сверхпереходной ЭДС электрических машин следует использовать формулы, приведенные в приложении 4.

2.4. Если для расчета токов КЗ используется аналитический способ, то схему замещения, полученную в соответствии с указаниями пп.2.1-2.3, необходимо преобразовать и определить эквивалентную ЭДС  $E_{\phi}^{\prime}$  (или  $E_{\phi}^{\prime}(t)$ ) и эквивалентное сопротивление  $x_{\Sigma}$  (или  $x_{\Sigma}(t)$ ) относительно точки КЗ. Начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ ( $I_{\text{кз}}$ ) в килоамперах равно

$$I_{\text{ш0}} = \frac{E_{\text{экф}}}{x_{\text{эк}}} = \frac{E_{\text{эк(0)}}}{x_{\text{эк(0)}}} I_{\text{б}}$$

где  $I_{\text{б}}$  - базисный ток той ступени напряжения сети, где находится точка КЗ, кА.

2.5. Методика учета комплексной нагрузки при расчете начального значения периодической составляющей тока КЗ изложена в разд. 9.

2.6. При приближенных расчетах начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ допускается определять по методу эквивалентного генератора, приняв ЭДС всех источников электроэнергии равной нулю и используя формулу

$$I_{\text{ш0}} = \frac{U_{\text{рп}}}{\sqrt{3} x_{\text{эк}}} = \frac{c U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} x_{\text{эк}}}$$

или

$$I_{\text{ш0}} = \frac{c}{x_{\text{эк(0)}}} I_{\text{б}}$$

где  $U_{\text{рп}}$  - напряжение в месте КЗ в момент, предшествующий КЗ, кВ;

$U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение (линейное) сети, в которой произошло короткое замыкание, кВ;

$c$  - коэффициент, значение которого рекомендуется принимать равным:  $c=1,1$  - при определении максимального значения тока КЗ;  $c=1,0$  - при определении минимального значения тока КЗ;

$x_{\text{эк}}$  - результирующее эквивалентное сопротивление расчетной схемы относительно точки КЗ, Ом;

$x_{\text{эк(0)}}$  - результирующее эквивалентное сопротивление расчетной схемы относительно точки КЗ, в относительных единицах, при выбранных базисных условиях.