

## Расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю с учётом характеристик заземления оборудования

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2018.435

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

*В статье описаны способы расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью для целей оценки термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей, учитывающие характеристики заземления оборудования – сопротивление заземляющего устройства и сопротивление металlosвязи оборудования с заземляющим устройством. Выведены новые формулы для расчёта токов двухфазного короткого замыкания на землю и определена их область применения.*

**Słowa kluczowe:** ток короткого замыкания, заземляющий проводник, заземлитель, сопротивление заземляющего устройства, сопротивление металlosвязи, термическая стойкость..

### Введение

Известные методы расчёта токов короткого замыкания в высоковольтных электроустановках в настоящее время в целом представляются устоявшимися и проверенными временем, поскольку одной из целей расчёта токов короткого замыкания является очень важная для нормального функционирования объекта электроэнергетики задача – выбор и настройка релейных защит, требующая выполнения расчётов максимальных и минимальных токов трёхфазного короткого замыкания в электроустановках с изолированной нейтралью 6-35 кВ [1, 2].

При выполнении оценки технического состояния (обследовании) заземляющих устройств электроустановок, выполнении проектов реконструкции заземляющих устройств электроустановок возникает ещё одна задача, связанная с расчётом тока короткого замыкания – расчёт термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей. При этом расчётным режимом в электроустановках с изолированной нейтралью 6-35 кВ является режим двухфазного короткого замыкания на землю [3, 4, 5, 6].

Как правило, расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю  $I_{k2}$  выполняется по хорошо известной формуле [2]

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3} \quad (1)$$

где  $I_{k3}$  – расчётное значение максимального тока трёхфазного короткого замыкания.

Формула (1) не учитывает путь тока двухфазного короткого замыкания, проходящий в том числе через заземляющее устройство электроустановки. Поскольку токи трёхфазного короткого замыкания  $I_{k3}$  не замыкаются через заземляющее устройство электроустановки, расчётная схема для их определения не предусматривает включение сопротивления заземляющего устройства в цепь короткого замыкания. Соответственно, значение тока двухфазного короткого замыкания на землю  $I_{k2}$ , определённое по формуле (1), будет

отличаться от значения тока, рассчитанного с учётом характеристик заземления оборудования – не только сопротивления заземляющего устройства, но и сопротивления металlosвязи оборудования с заземляющим устройством.

В большинстве практических случаев обследования и проектирования заземляющих устройств применение значения тока двухфазного короткого замыкания на землю, рассчитанного по формуле (1), не вызывает вопросов у заказчиков обследования и проектной продукции. Однако в мае 2016 года, в процессе согласования отчётной документации по обследованию заземляющего устройства и электромагнитной обстановки Новосибирской ТЭЦ-2 – филиала АО «Сибирская энергетическая компания», выполненного ООО «Альфа ЭМС», специалисты ООО «Альфа ЭМС» столкнулись с требованием заказчика обследования применить для расчёта термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей оборудования 10 кВ ток двухфазного короткого замыкания, рассчитанный с учётом характеристик заземления оборудования – сопротивления заземляющего устройства и сопротивления металlosвязи оборудования с заземляющим устройством. Основанием такого требования было желание заказчика исключить избыточные затраты на реконструкцию заземляющего устройства, связанные с некорректным расчётом тока двухфазного короткого замыкания на землю по формуле (1).

Анализ существующей нормативной документации по расчёту токов короткого замыкания, а также прочей научно-технической информации по данному вопросу показал, что в настоящее время отсутствует опыт выполнения расчётов токов двухфазного короткого замыкания с учётом характеристик заземления оборудования.

Целью настоящей работы является вывод расчётных формул для определения тока двухфазного короткого замыкания с учётом характеристик заземления оборудования – сопротивления заземляющего устройства и сопротивления металlosвязи оборудования с заземляющим устройством.

### 1. Метод расчёта тока двухфазного короткого замыкания, применяемый в эксплуатации

При выполнении обследования заземляющего устройства и электромагнитной обстановки Новосибирской ТЭЦ-2, выполненного ООО «Альфа ЭМС» в феврале 2016 года, в качестве исходных данных для расчёта термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей оборудования 10 кВ службой релейной защиты и автоматики АО «Сибирская энергетическая компания» были предоставлены ток трёхфазного замыкания 79090 А и время действия основной защиты 0,1 с.

В соответствии с результатами расчёта по формуле (1), ток двухфазного замыкания на оборудовании 10 кВ был принят равным 68494 А. Такому значению тока короткого замыкания, в соответствии с п. 2.1.1 РД 153-34.0-20.525-00 [3], по условию термической стойкости соответствует минимально допустимое сечение заземляющих проводников и заземлителей

$$S = I_{k2} \cdot \frac{\sqrt{t+0,1}}{60} = 68494 \cdot \frac{\sqrt{0,1+0,1}}{60} = 511 \text{ мм}^2,$$

где  $t$  – время действия основной защиты, с.

Поскольку минимальное сечение заземляющих проводников и заземлителей оборудования 10 кВ Новосибирской ТЭЦ-2 на момент обследования составляло 288 мм<sup>2</sup>, был сделан вывод о их несоответствии условию термической стойкости и даны рекомендации о выполнении ремонта в объёме монтажа дополнительных заземляющих проводников и заземлителей оборудования 10 кВ.

Данные рекомендации по ремонту заземляющего устройства не отвечали желанию заказчика минимизировать затраты на ремонт. Для исключения данных затрат служба РЗА АО «Сибирская энергетическая компания» выполнила расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю с учётом сопротивления заземляющего устройства и сопротивления металлосвязи оборудования с заземляющим устройством и предоставила новое значение тока двухфазного замыкания на оборудовании 10 кВ – 34682 А. Расчёт был выполнен в программе АРМ СРЗА [7], с предоставлением расчётного файла и способа задания расчётной аварии – двухфазного короткого замыкания на землю (рис. 1).

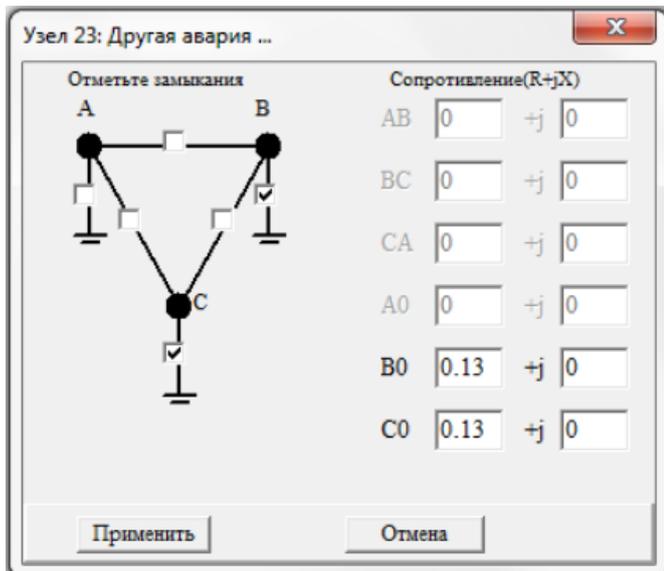


Рис. 1. Окно программы АРМ СРЗА – задание двухфазного короткого замыкания на землю в расчётной точке

## 2. Нормативный подход к расчёту тока двухфазного короткого замыкания на землю

Программа АРМ СРЗА является основным программным средством по расчёту токов короткого замыкания, применяемым в энергетике Российской Федерации, а также в энергетике Казахстана, Монголии, Беларуси, Латвии и Литвы. При этом метод расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью в данной программе по сути не отличается от метода расчёта тока двухфазного замыкания между фазами в одной точке по формуле (1). При этом в п. 15.3 СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5] указано, что при расчёте тока двухфазного короткого замыкания на землю места замыкания разных фаз следует располагать в точках, наиболее удалённых друг от друга в пределах территории, занимаемой сетью с изолированной нейтралью, а в п. 8.6 СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] уточнено, что одна из точек двухфазного короткого замыкания

должна быть принята вне заземляющего устройства, для которого производится расчёт.

Расчётная электрическая схема, соответствующая методу расчёта программы АРМ СРЗА (рис. 1), представлена на рис. 2. Расчётная электрическая схема, соответствующая требованиям нормативных документов по обследованию и проектированию заземляющих устройств электроустановок, представлена на рис. 3.

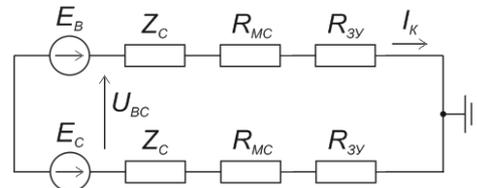


Рис. 2. Электрическая схема расчёта тока двухфазного короткого замыкания фаз В и С на землю, реализованная в программе АРМ СРЗА

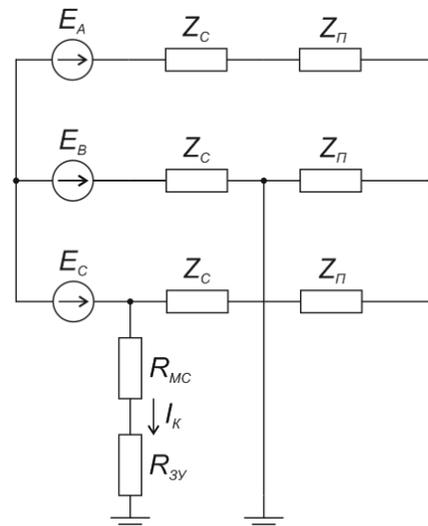


Рис. 3. Электрическая схема расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю фаз В и С, предусмотренная нормативной документацией по обследованию и проектированию заземляющих устройств электроустановок

На схемах по рис. 2, 3 обозначены:

$I_k$  – ток двухфазного короткого замыкания на землю, протекающий по заземляющему проводнику;

$E_A, E_B, E_C$  – максимальные фазные напряжения эквивалентного генератора;

$U_{BC}$  – максимальное линейное напряжение фаз ВС эквивалентного генератора;

$Z_C$  – эквивалентное полное сопротивление сети току короткого замыкания;

$Z_n$  – полное сопротивление фазы наиболее удалённого потребителя электрической сети с изолированной нейтралью;

$R_{MC}$  – активное сопротивление металлосвязи оборудования с заземляющим устройством;

$R_{3y}$  – активное сопротивление заземляющего устройства.

Характеристики заземления оборудования (сопротивление заземляющего устройства и сопротивление металлосвязи оборудования с заземляющим устройством) приняты активными, поскольку в соответствии с РД 153-34.0-20.525-00 [3] и СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] при обследовании заземляющих устройств, как правило, измеряется только активная составляющая указанных сопротивлений. Если

реактивные составляющие сопротивлений заземляющего устройства и металlosвязи оборудования с заземляющим устройством были измерены, они могут быть введены в цепь последовательно с соответствующими активными сопротивлениями.

Ввод сопротивлений  $R_{MC}$  и  $R_{3y}$  в программу АРМ СРЗА (рис. 2) производится для каждой замкнутой фазы, что обусловлено тем, что программа АРМ СРЗА выполняет расчёт несимметричных коротких замыканий методом симметричных составляющих. Такая особенность программы АРМ СРЗА обусловлена её областью применения – расчётом токов короткого замыкания для выбора и настройки устройств релейной защиты, выполняемым в соответствии с РД 153-34.0-20.527-98 [8] методом симметричных составляющих.

В соответствии с п. 5.9.2 РД 153-34.0-20.527-98 [8] ток двухфазного короткого замыкания на землю определяется выражением

$$I_{K2} = \frac{E_{\phi}}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}}, \quad (2)$$

где  $E_{\phi}$  – максимальное фазное напряжение эквивалентного генератора;

$Z_1$  – полное эквивалентное сопротивление схемы замещения прямой последовательности относительно точки несимметричного короткого замыкания;

$Z_2$  – полное эквивалентное сопротивление схемы замещения обратной последовательности относительно точки несимметричного короткого замыкания. В соответствии с п. 3.8.1 РД 153-34.0-20.527-98 [8]  $Z_2 = Z_1$ ;

$Z_0$  – полное эквивалентное сопротивление схемы замещения нулевой последовательности относительно точки несимметричного короткого замыкания.

Величина  $Z_0$  определяется по разным формулам п. 4.2.5 РД 153-34.0-20.527-98 [8] для воздушных и кабельных линий электропередачи разного типа. При этом все формулы п. 4.2.5 РД 153-34.0-20.527-98 [8] не включают характеристики заземления оборудования.

Метод расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю по ГОСТ Р 52735-2007 [9] полностью аналогичен расчёту по РД 153-34.0-20.527-98 [8].

Схема по рис. 3, выполненная в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5] для расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю с целью расчёта термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей имеет следующие особенности:

1. Схема включает сопротивление металlosвязи оборудования с заземляющим устройством только на объекте, для которого выполняется оценка термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей, но не включает сопротивление металlosвязи оборудования с заземляющим устройством на удалённом объекте сети с изолированной нейтралью. Это обусловлено тем, что в соответствии с п. 8.2 СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] на объекте обследования сопротивление металlosвязи оборудования с заземляющим устройством измеряется относительно опорной точки (заземляющего проводника другого оборудования), имеющей удовлетворительную металlosвязь с заземлителем. Таким образом, измеренное сопротивление металlosвязи включает как минимум два переходных (контактных) сопротивления между оборудованием и заземляющим устройством.

2. Схема не включает сопротивление заземляющего устройства удалённого объекта сети с изолированной нейтралью, поскольку при выполнении обследования заземляющего устройства конкретного объекта (электростанции или подстанции) выполнение измерений сопротивлений заземляющих устройств всех удалённых объектов сети с изолированной нейтралью представляется практически не реализуемым в связи с большим объёмом и стоимостью данной работы. В случае, если сопротивление заземляющего устройства удалённого объекта сети с изолированной нейтралью известно,  $R_{3y}$  на схеме по рис. 3 можно определить как сумму сопротивлений заземляющих устройств обследуемого объекта и удалённого объекта сети с изолированной нейтралью.

### 3. Направления развития методов расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю

Одной из задач настоящей работы было выявление современных подходов к расчёту токов двухфазного короткого замыкания на землю для целей расчёта термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей. Эта работа выполнялась путём поиска научных работ по указанной теме в открытых источниках. Наиболее близкие к теме настоящей статьи научные работы приведены в источниках [10, 11, 12, 13, 14].

Результаты анализа направлений развития методов расчёта тока двухфазного короткого замыкания показали:

1. Ни в одной научной работе не найдены модели расчёта тока короткого замыкания на землю, учитывающие характеристики заземления оборудования – сопротивление заземляющего устройства и сопротивление металlosвязи оборудования с заземляющим устройством.
2. Основным расчётным методом для расчёта токов короткого замыкания является метод симметричных составляющих. Другие методы расчёта электрических цепей (методы законов Кирхгофа, контурных токов, узловых потенциалов, наложения, эквивалентного генератора), несмотря на нормативно закреплённую допустимость их применения для расчёта токов короткого замыкания (п. 4.4 ГОСТ Р 52735-2007 [9], п. 3.7.1 РД 153-34.0-20.527-98 [8]), используются для расчётов крайне редко.
3. Совершенствование метода симметричных составляющих для расчёта двухфазных коротких замыканий выполняется в направлении:
  - учёта сопротивления нагрузки потребителя в незамкнутой, третьей фазе;
  - учёта дуговых процессов при коротком замыкании;
  - расчёта токов короткого замыкания при замыкании двух фаз разных классов напряжения на одном объекте (например, одной фазы 35 кВ и одной фазы 6 кВ);
  - расчёта токов короткого замыкания при замыкании одной фазы до токоограничивающего реактора 6-10 кВ, а другой фазы – за токоограничивающим реактором;
  - расчёта наложения переходных процессов при множественных коротких замыканиях, перехода одного вида короткого замыкания в другой.

### 4. Предлагаемые методы расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю

#### 4.1. Расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю с учётом сопротивления нагрузки потребителя

Схема по рис. 3, выполненная в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-

29.130.15.114-2012 [5] для расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю с целью расчёта термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей, включает сопротивление нагрузки потребителя  $Z_{\Pi}$  электрической сети с изолированной нейтралью. Для расчёта данной схемы выполним её эквивалентное преобразование в схему по рис. 4.

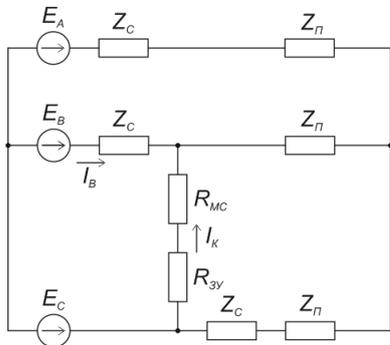


Рис. 4. Преобразованная электрическая схема расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю фаз В и С с учётом сопротивления нагрузки потребителя

Расчёт схемы по рис. 4 удобно выполнить методом узловых потенциалов. Для этого выполним эквивалентное преобразование схемы по рис. 4 в схему по рис. 5.

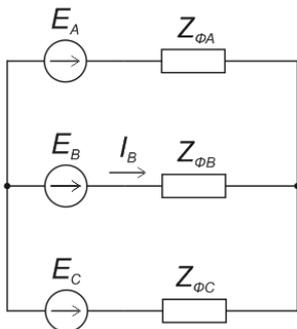


Рис. 5. Преобразованная электрическая схема расчёта тока двухфазного короткого замыкания методом узловых потенциалов

В схеме по рис. 5 эквивалентные сопротивления

$$\begin{aligned} Z_{\Phi A} &= Z_C + Z_{\Pi} + \frac{Z_{\Pi} \cdot (Z_C + Z_{\Pi})}{2Z_{\Pi} + Z_C + R_{MC} + R_{3y}}, \\ Z_{\Phi B} &= Z_C + \frac{Z_{\Pi} \cdot (R_{MC} + R_{3y})}{2Z_{\Pi} + Z_C + R_{MC} + R_{3y}}, \\ Z_{\Phi C} &= \frac{(Z_C + Z_{\Pi}) \cdot (R_{MC} + R_{3y})}{2Z_{\Pi} + Z_C + R_{MC} + R_{3y}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда расчётный ток фазы В  $I_B$  по методу узловых потенциалов определится по формуле

$$I_B = \frac{1}{Z_{\Phi B}} \cdot \left( E_B - \frac{\frac{E_A}{Z_{\Phi A}} + \frac{E_C}{Z_{\Phi C}}}{\frac{1}{Z_{\Phi A}} + \frac{1}{Z_{\Phi C}}} \right). \quad (4)$$

Ток двухфазного короткого замыкания на землю, протекающий по заземляющему проводнику  $I_K$ , в соответствии со схемой по рис. 4, можно определить по второму закону Кирхгофа:

$$I_K = \frac{E_C - E_B + I_B \cdot Z_C}{R_{MC} + R_{3y}}. \quad (5)$$

#### 4.2. Расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю без учёта сопротивления нагрузки потребителя

В случае отсутствия необходимости точного расчёта токов двухфазного короткого замыкания на землю по формулам (3-5), представляется возможным принять сопротивление потребителя  $Z_{\Pi}$  равным бесконечности, что соответствует работе фидера 6-35 кВ на холостом ходу. При обследовании и проектировании заземляющего устройства возможность такого допущения можно определить по соотношению максимального рабочего тока и тока трёхфазного короткого замыкания на шинах 6-35 кВ – чем больше ток короткого замыкания по сравнению с максимальным рабочим током – тем меньшую погрешность в расчёт введёт указанное допущение.

Преобразованная схема по рис. 4, в которой не учитывается сопротивление нагрузки потребителя, представлена на рис. 6.

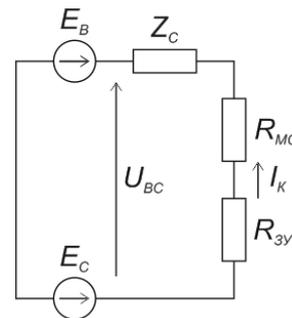


Рис. 6. Электрическая схема расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю фаз В и С без учёта сопротивления нагрузки потребителя

Расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю в соответствии со схемой по рис. 6 может быть выполнен по формуле

$$I_K = \frac{U_{\Pi}}{Z_C + R_{MC} + R_{3y}}, \quad (6)$$

где  $U_{\Pi}$  – максимальное линейное напряжение эквивалентного генератора.

Нередко при обследовании и проектировании заземляющего устройства в качестве исходных данных не предоставляется эквивалентное полное сопротивление сети току короткого замыкания  $Z_C$ . Как правило, в таком случае предоставляется только ток трёхфазного короткого замыкания  $I_{K3}$  на шинах распределительного устройства 6-35 кВ и максимальное линейное напряжение на шинах  $U_{\Pi}$ . Соотношение активного и реактивного сопротивления сети току короткого замыкания также обычно не предоставляется. Как правило, реактивная составляющая полного сопротивления сети току короткого замыкания в электроустановках высокого напряжения значительно больше активной составляющей. Соответственно, найденное по закону Ома сопротивление  $Z_C$  в таком случае можно принять реактивным:

$$Z_C = X_C = \frac{U_{\Phi}}{I_{K3}} = \frac{U_{\Pi}}{I_{K3} \cdot \sqrt{3}}, \quad (7)$$

где  $U_{\Phi}$  – максимальное фазное напряжение эквивалентного генератора.

Также следует отметить, что формула (7) может быть использована в том числе и для нахождения полного сопротивления фазы наиболее удалённого потребителя электрической сети с изолированной нейтралью  $Z_{\Pi}$ , поскольку указанный параметр электрической сети обычно при

обследовании и проектировании заземляющего устройства в качестве исходных данных также не предоставляется.

С учётом изложенного, удобная для практического применения упрощённая формула расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю, протекающего в заземляющем проводнике, будет иметь следующий вид:

$$I_{k2} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{I_{k3}^2 \cdot 3 + (R_{\text{MC}} + R_{3\text{V}})^2}} \quad (8)$$

### 4.3. Сравнение формул для расчёта тока двухфазного короткого замыкания, протекающего в заземляющих проводниках

Сравнение результатов расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю по предложенным формулам приведено в табл. 1 на примере первой секции шин 10 кВ Новосибирской ТЭЦ-2. В качестве исходных данных для расчётов приняты следующие параметры сети 10 кВ, предоставленные службой РЗА АО «Сибирская энергетическая компания», а также характеристики заземления оборудования, измеренные ООО «Альфа ЭМС» на электростанции:

- ток трёхфазного короткого замыкания – 79090 А;
- максимальное линейное напряжение – 10600 В. Угол сдвига фаз трёхфазной системы – 120°;
- эквивалентное полное сопротивление сети 10 кВ току короткого замыкания – 0,002 + j0,077 Ом;
- максимальные рабочие токи фидеров удалённых потребителей 10 кВ приняты равными 3000 А, 1000 А, 300 А. Характер нагрузки – активная;
- сопротивление заземляющего устройства – 0,09 Ом;
- сопротивление металлосвязи оборудования 10 кВ с заземляющим устройством – 0,04 Ом.

**Табл. 1.** Результаты расчёта токов двухфазного короткого замыкания на землю

№	Описание расчёта	Расчётное значение тока коротк. зам., А
1	Расчёт по широко известной формуле (1), не учитывающей характеристики заземления оборудования	68494
2	Расчёт в программе АРМ СРЗА по РД 153-34.0-20.527-98 [8] с учётом характеристик заземления оборудования, вводимых в цепь короткого замыкания последовательно с эквивалентными сопротивлениями фаз	34682
3	Расчёт по формулам (3-5) в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5], с учётом сопротивления удалённого потребителя с максимальным рабочим током 3000 А	67846
4	Расчёт по формулам (3-5) в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5], с учётом сопротивления удалённого потребителя с максимальным рабочим током 1000 А	68863
5	Расчёт по формулам (3-5) в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5], с учётом сопротивления удалённого потребителя с максимальным рабочим током 300 А	69230
6	Расчёт по формуле (6) в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5], без учёта сопротивления удалённого потребителя и с учётом соотношения активного и реактивного сопротивления сети току короткого замыкания	69364
7	Расчёт по формуле (8) в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 [4] и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 [5], без учёта сопротивления удалённого потребителя и соотношения активного и реактивного сопротивления сети току короткого замыкания	70066

## Выводы

Результатами настоящей работы являются следующие выводы:

1. В программе АРМ СРЗА, в связи с особенностями реализованного в ней метода симметричных составляющих, принципиально невозможно рассчитать ток двухфазного короткого замыкания на землю, протекающий через заземляющий проводник оборудования 6-35 кВ с повреждённой изоляцией. Программа АРМ СРЗА, предназначенная для расчётов токов короткого замыкания для целей выбора и настройки релейных защит по РД 153-34.0-20.527-98, рассчитывает токи короткого замыкания, протекающие по фазным проводам, а не по заземляющим проводникам и заземлителям. Ввод характеристик заземления оборудования (сопротивления заземляющего устройства и сопротивления металлосвязи) в цепь короткого замыкания последовательно с эквивалентными сопротивлениями фаз приводит к значительному занижению расчётного тока двухфазного короткого замыкания на землю. Указанная особенность программы АРМ СРЗА не является её недостатком – программа АРМ СРЗА просто не предназначена для выполнения расчётов токов двухфазного короткого замыкания на землю для целей оценки термической стойкости заземляющих проводников и заземлителей по СТО 56947007-29.130.15.105-2011 и СТО 56947007-29.130.15.114-2012.
2. Ток двухфазного короткого замыкания на землю, рассчитанный по СТО 56947007-29.130.15.105-2011 и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 с учётом характеристик заземления оборудования (сопротивления заземляющего устройства и сопротивления металлосвязи) в типичном случае, рассмотренном на примере Новосибирской ТЭЦ-2, отличается от расчёта по традиционно используемой формуле (1) незначительно. Погрешность, вносимая неоднозначностью оценки сезонного изменения сопротивления заземляющего устройства и коррозионного состояния заземляющих проводников и заземлителей, как минимум на порядок больше погрешности, вносимой в расчёт тока двухфазного короткого замыкания на землю без учёта характеристик заземления оборудования.
3. Из множества удалённых потребителей электрической сети с изолированной нейтралью для расчёта тока двухфазного короткого замыкания на землю по СТО 56947007-29.130.15.105-2011 и СТО 56947007-29.130.15.114-2012 по формулам (3-5) следует выбирать потребителя минимальной мощности (с минимальным током фидера). При этом расчётное значение тока короткого замыкания будет максимальным, что с запасом обеспечит правильный выбор сечения заземляющих проводников и заземлителей.
4. Результаты расчётов токов двухфазного короткого замыкания по упрощённым формулам (6) и (8), не учитывающим характеристики удалённого потребителя в типичном случае, рассмотренном на примере Новосибирской ТЭЦ-2, отличаются от расчётов с учётом характеристик удалённого потребителя по формулам (3-5) незначительно. При этом расчёты по формулам (6) и (8) значительно проще расчётов по формулам (3-5). Соответственно, при обследовании заземляющего устройства в соответствии с СТО 56947007-29.130.15.105-2011 представляется возможным рассчитывать токи двухфазного короткого замыкания для каждого аппарата 6-35 кВ по формуле (6) или (8), с индивидуальным учётом сопротивления металлосвязи аппарата с заземляющим

- устройством, что повысит достоверность результатов обследования.
5. Расчёты токов однофазного короткого замыкания в электроустановках с заземлённой нейтралью (110 кВ и выше), выполненные в программе АРМ СРЗА, также не учитывают характеристики заземления оборудования в связи с особенностями моделирования электрической сети в программе АРМ СРЗА в соответствии с РД 153-34.0-20.527-98. Для учёта характеристик заземления оборудования в таком случае необходимым и достаточным представляется ввод в программе АРМ СРЗА дополнительного сопротивления (суммы сопротивлений заземляющего устройства и металлоосвязи оборудования с заземлителем) в точке однофазного короткого замыкания.
  9. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» – ВНИИЭ, МЭИ (ТУ), Москва 2007.
  10. Веселовский А.Н., Климов Н.А., Климов С.А., Влияние переходного сопротивления в месте замыкания на аварийные режимы фидера 35 кВ с трёхобмоточным трансформатором. КГСА, Кострома 2015.
  11. Мигунов С.Д., Применение метода симметричных составляющих для выявления аварийных режимов в трёхфазных электроэнергетических системах. ИГЭУ им. В.И. Ленина, Иваново 2015.
  12. Каневский Я.М., Расчёты токов при двойном замыкании на землю до и после токоограничивающего реактора 6-10 кВ на электростанциях. Электричество 2005, № 11.
  13. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В., Кержаев Д.В., Романов Ю.В., Многомерная релейная защита. Эквивалентирование моделей. Электричество 2010, № 1.
  14. Вайнштейн Р.А., Лозинский К.С., Коломиец Н.В., Расчёт несимметричных режимов в электроэнергетической системе на основе сочетания систем координат. Известия Томского политехнического университета 2010, № 4.
- Литература:**
1. Почаевец В.С., Электрические подстанции. Желдориздат, Москва 2001.
  2. Прохорский А.А., Тяговые и трансформаторные подстанции. Транспорт, Москва 1983.
  3. РД 153-34.0-20.525-00. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РАО «ЕЭС России», Москва 2000.
  4. Стандарт организации СТО 56947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. ОАО «ФСК ЕЭС», Москва 2011.
  5. Стандарт организации СТО 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», Москва 2012.
  6. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 08.07.2002 №204 «Правила устройства электроустановок».
  7. Черняков В.Н., Седельников Г.Ф., Дубрановская Н.Л., Стенина В.В., Рубина Е.Н., Программный комплекс для расчётов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты. Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011618568. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 31 октября 2011 г.
  8. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. ЭНАС, Москва 2002.

---

#### Calculation of two-phase ground fault current with consideration of equipment grounding specifications

The article describes ways of calculating two-phase ground fault current in electrical networks with isolated neutral for needs of calculating thermal resistance in equipment's grounding elements. Grounding resistance and metal resistance of high-voltage equipment are added to the existing methods of short circuit currents calculation.

---

**Keywords:** ground fault current, grounding electrode, grounding resistance, metal connection, thermal resistance.

**Autorzy:**

dr inż. **Aleksiej Kosjakow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, «Alfa EMS» sp. z o.o., Jekaterynburg, Rosja

prof. dr inż. **Aleksandr Suhoguzow** – Uralski Państwowy Uniwersytet Transportu Kolejowego, Jekaterynburg, Rosja