

11 Расчет токов однофазного короткого замыкания

Меры защиты от поражения электрическим током в наружной электроустановке

Выписка из ТКП339-2022 [10.13]

4.3.2.3 Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении:

- защитное заземление;
- защитное зануление;
- защитное автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

4.3.2.9 Электроустановки напряжением до 1 кВ наружных установок должны, как правило, получать питание от источника с глухозаземленной нейтралью с применением системы TN. Для защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в таких электроустановках должно быть выполнено автоматическое отключение питания.

На стадии проектирования расчет токов однофазного короткого замыкания (КЗ) в наружных электроустановках напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью (системой TN) необходимо проводить для оценки гарантированного автоматического отключения питания электрической цепи в случае повреждения изоляции и появлении потенциала на корпусе электрооборудования, т.е. для проверки мер электробезопасности. В отдельных случаях результаты расчета однофазного тока КЗ также применяются при проверке электрических аппаратов на коммутационную способность [11.1, п.2.3.4].

Основным методом расчета тока КЗ в соответствии с ГОСТ 28249 принят метод симметричных составляющих [11.2, п.8.1], согласно которому начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ $I_{п0}^{(1)}$, кА

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{3U_{нС}}{\sqrt{(r_1 + r_2 + r_0)^2 + (x_1 + x_2 + x_0)^2}}, \quad (11.1)$$

или при равенстве сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов электросети (исключение электродвигатели и генераторы)

$$r_1 = r_2, \quad (11.2)$$

$$x_1 = x_2, \quad (11.3)$$

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{3U_{нс}}{\sqrt{(2r_1 + r_0)^2 + (2x_1 + x_0)^2}}, \quad (11.4)$$

где $U_{нс}$ – номинальное фазное напряжение сети, кВ;

- r_1 – суммарное активное сопротивление прямой последовательности цепи КЗ, Ом;
- r_2 – суммарное активное сопротивление обратной последовательности цепи КЗ, Ом;
- r_0 – суммарное активное сопротивление нулевой последовательности цепи КЗ, Ом;
- x_1 – суммарное индуктивное сопротивление прямой последовательности цепи КЗ, Ом;
- x_2 – суммарное активное сопротивление обратной последовательности цепи КЗ, Ом;
- x_0 – суммарное активное сопротивление нулевой последовательности цепи КЗ, Ом.

Упрощенный вариант применения симметричных составляющих в расчете однофазного тока КЗ – это метод по сопротивлению цепи «фаза-нуль». Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ $I_{п}^{(1)}$, кА, по этому методу рассчитывается по формуле [11.3, п.3-4 Б]:

$$I_{п}^{(1)} = \frac{U_{нс}}{\frac{z_{т}^{(1)}}{3} + z_{п}}, \quad (11.5)$$

где $z_{т}^{(1)}$ – полное сопротивление силового трансформатора току однофазного КЗ, Ом;

$z_{п}$ – полное сопротивление цепи, созданной фазными и нулевыми проводниками, от трансформатора до точки КЗ, Ом.

Рекомендации по выбору метода расчета однофазного тока КЗ в электроустановках до 1 кВ

В международных нормативных документах (серии нормативных документов МЭК 60909 [11.4], ГОСТ 28249 [11.2]) в качестве основного метода расчета тока однофазного короткого замыкания в сетях до 1 кВ закреплен метод симметричных составляющих.

В суммарных сопротивлениях прямой обратной и нулевой последовательностей цепи КЗ по формуле (11.4) в соответствии с ГОСТ 28249 [11.2, п. 1.4] следует учитывать:

- активные и индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники (шинопроводы, провода, кабели), трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- активные сопротивления различных контактных соединений;
- значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей.

Дополнительно при расчетах токов КЗ рекомендуется учитывать [11.2, п. 1.5]:

- сопротивление электрической дуги в месте КЗ;
- изменение активного сопротивления проводников короткозамкнутой цепи вследствие их нагрева при КЗ;
- 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.

Порядок определения вышеуказанных сопротивлений достаточно подробно изложен в ГОСТ 28249 [11.2], за исключением силовых трансформаторов с группами соединения обмоток У/Ун и У/Зн, отдельных серий шинопроводов, кабелей и изолированных проводов воздушных линий. Принять значения сопротивлений для этих элементов цепи рекомендуется «в соответствии с указаниями изготовителей» [11.2], но в практической деятельности такой способ значительно увеличивает время на расчеты из-за необходимости коммуникаций с изготовителями, а часто неосуществим по причине отсутствия необходимой информации у самого изготовителя. По этой причине разрабатываются справочники для сопротивлений типовых элементов электроустановок, а также был предложен упрощенный метод расчета однофазного тока КЗ по сопротивлению цепи (петли) «фаза-нуль» [11.5, 11.6].

Основная формула этого метода (11.5) предполагает частичный переход от геометрического сложения векторов сопротивлений элементов цепи к арифметическому сложению модулей этих сопротивлений.

Полное сопротивление цепи z_{Π} рекомендуется определять через геометрическую сумму активных и реактивных сопротивлений элементов, а при отсутствии информации допускается арифметически суммировать модули полных сопротивлений отдельных участков цепи [11.5, p.3; 11.6, p. 2]. Сумма модулей полных сопротивлений больше геометрической суммы их векторов, что приводит к повышенному значению сопротивления Z_{Π} и для компенсации допускается не учитывать сопротивления трансформаторов тока, контактных соединений и электрической дуги в месте КЗ [11.6, p.2].

Анализ достоверности исходных данных для двух методов показывает, что несмотря на значимые допущения в методе по сопротивлению цепи "фаза-нуль" результаты расчета тока однофазного КЗ нельзя считать априорно менее точными по сравнению с методом симметричных составляющих. Например, в обоих методах крайне трудно с высоким уровнем достоверности оценить значения:

- индуктивных сопротивлений проводов и кабелей при монтаже с различным удалением от металлических конструкций;
- сопротивления нулевого защитного проводника, у которого, как правило, имеется значительная разветвленность при уравнивании потенциалов, повторных заземлениях и объединениях с нулевым рабочим проводником;
- сопротивление нулевой последовательности силовых трансформаторов;
- пр.

Комплексное сопротивление силового трансформатора $\bar{z}_T^{(1)}$, Ом, в общем случае определяется по формуле:

$$\bar{z}_T^{(1)} = \bar{z}_{T1} + \bar{z}_{T2} + \bar{z}_{T0}, \quad (11.6)$$

или модуль этого сопротивления $z_T^{(1)}$, Ом,

$$z_T^{(1)} = \sqrt{(r_{T1} + r_{T2} + r_{T0})^2 + (x_{T1} + x_{T2} + x_{T0})^2}, \quad (11.7)$$

где \bar{z}_{T1} – комплексное сопротивление прямой последовательности трансформатора, Ом;

\bar{z}_{T2} – комплексное сопротивление обратной последовательности трансформатора, Ом;

\bar{z}_{T0} – комплексное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом;

r_{T1} – активное сопротивление прямой последовательности трансформатора, Ом;

r_{T2} – активное сопротивление обратной последовательности трансформатора, Ом;

r_{T0} – активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом;

x_{T1} – индуктивное сопротивление прямой последовательности трансформатора, Ом;

x_{T2} – активное сопротивление обратной последовательности трансформатора, Ом;

x_{T0} – активное сопротивление нулевой последовательности трансформатора, Ом.

Сопротивления прямой и обратной последовательностей трансформатора равны независимо от схемы соединений обмоток [11.3, п.3-4 Б], и также равны сопротивлению (короткого замыкания) трансформатора:

- полному z_T , Ом

$$z_{T1} = z_{T2} = z_T = 10u_k \frac{U_{HT}^2}{S_{HT}}, \quad (11.8)$$

- активному r_T , Ом

$$r_{T1} = r_{T2} = r_T = P_k \frac{U_{HT}^2}{S_{HT}^2}, \quad (11.9)$$

- реактивному x_T , Ом

$$x_{T1} = x_{T2} = x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}, \quad (11.10)$$

где u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; принимается по данным заводов-изготовителей;

$U_{нТ}$ – номинальное линейное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;

$S_{нТ}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

P_k – потери короткого замыкания в трансформаторе, Вт; принимается по данным заводов-изготовителей.

Пояснения по применению справочных данных по сопротивлению нулевой последовательности трансформаторов

В соответствии с техническими нормативными правовыми актами [11.7, 11.8] силовые трансформаторы изготавливаются с контролем напряжения короткого замыкания u_k и потерь короткого замыкания P_k , предельные отклонения которых от нормированных значений, как правило, не превышают 10 %. Следовательно, сопротивления прямой и обратной последовательности для отдельного трансформатора определяются формулам (11.8) – (11.10) примерно с такой же погрешностью.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора зависит от схемы соединений обмоток высшего и низшего напряжений. Порядок измерения полного сопротивления обратной последовательности регламентирован ГОСТ 3484.1 [11.9, p.7]. Однако, заводы-изготовители, как правило, не проводят эти измерения в достаточном количестве, чтобы с помощью методов математической статистики определить достоверные средние значения и допустимые отклонения сопротивлений нулевой последовательности для каждой модели трансформаторов.

С случаях проведения измерений сопротивлений нулевой последовательности силовых трансформаторов не всегда возможно их результаты напрямую использовать для инженерных задач, что отражено в книге Найфельда М. Р. [11-3, p.3-4 Б 5]. Представленные в этой книге "приближенные расчетные сопротивления" масляных трансформаторов (см. таблицу 11.1) стали основой для большинства справочников на следующие пять десятилетий. В справочниках более поздних годов [11.10, табл. 2.50] были заменены только данные по сопротивлениям нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединений обмоток Y/Zn. Значения этих сопротивлений в [11-3, p.3-4 Б 5] были определены на основе гипотезы о равенстве сопротивлений нулевой, прямой и обратной последовательности для этих трансформаторов, что в дальнейших исследованиях не нашло подтверждения.

Также в справочнике [11.10, табл. 2.50] приводятся уточненные значения расчетных сопротивлений трансформаторов со схемой соединений обмоток D/Yn в связи с уменьшением напряжения и потерь короткого замыкания для современных моделей.

Таблица 11.1 – Формулы для определения сопротивлений силовых масляных трансформаторов 10(6)/0,4кВ

Схема соединений обмоток	Сопротивления последовательностей		
	прямой	обратной	нулевой
Y/Yн	$z_{T1} = z_T$	$z_{T2} = z_T$	$z_{T0} = 0,4 \frac{U_{нТ}^2}{S_{нТ}} 10^3$ ¹⁾
D/Yн	$z_{T1} = z_T$	$z_{T2} = z_T$	$z_{T0} = z_T$ ²⁾
Y/Zн	$z_{T1} = z_T$	$z_{T2} = z_T$	$z_{T0} = \sqrt{(0,4r_T)^2 + ((0,1 \div 0,2)x_T)^2}$ ³⁾

Примечания.

¹⁾ Формула справедлива для расчетов режимов с насыщенным сердечником трансформатора. Учитывается уменьшение опытных значений z_{T0} , как правило, определяемых при 10 % номинального фазного напряжения или тока, понижающим коэффициентом $0,5 \div 0,55$ [11.3, п.3-4 Б 5].

²⁾ Формула в соответствии с данными [11.3, п.3-4 Б 5; 11.10, табл. 2.50]. Расчетная формула по справочнику [11.11, ф.(8-16), (8-17)]:

$$z_{T0} = 0,95z_T.$$

³⁾ Формула по справочнику [11.11, ф.(8-18), (8-19)]. Расчетные значения по этой формуле хорошо согласуются с данными [11.10, табл. 2.50].

Формулы расчета сопротивления нулевой последовательности (см. таблицу 11.1) имеют эмпирический характер. При этом результаты расчета будут иметь значимую погрешность к конкретному трансформатору. Это обусловлено не только погрешностью из-за аппроксимации опытных данных, но и значительным до $25 \div 35$ % расхождением значений сопротивления нулевой последовательности в выборке трансформаторов одного и того же типа [11.12; 11.13, табл. 5.2]. С целью уменьшения трудоемкости в этом случае целесообразно применять эмпирические формулы не для расчета составляющих, а непосредственно полного сопротивления трансформатора однофазному току КЗ.

На ОАО “МЭТЗ им.В.И.Козлова” проводятся испытания типового образца каждой серии масляных трансформаторов с различными схемами соединений обмоток, в том числе в программу испытаний входит измерения сопротивления нулевой последовательности. Анализ и обработка этих данных для трансформаторов ТМГ, ТМГ11, ТМГ12, ТМГ21, ТМГ32, ТМГ33 позволили рассчитать сопротивления трансформаторов однофазному току КЗ и построить зависимости от мощности трансформатора (рисунок 11.1) и его сопротивления короткого замыкания (рисунок 11.2).

На рисунках 11.1 и 11.2 штриховой линией показана зависимость для трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Yн при насыщенной магнитной системе, т.е. большой несимметрии нагрузки и загрузке трансформатора. Эта зависимость рассчитана на основании результатов испытаний этих трансформаторов при низких нагрузках с применением согласно [11.3, п.3-4 Б 5] понижающего коэффициента 0,5 для сопротивления нулевой последовательности.

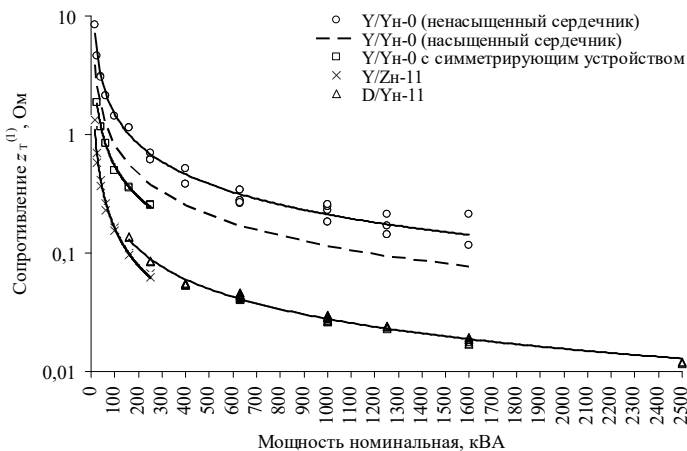


Рисунок 11.1 – Зависимость сопротивления однофазному току КЗ от мощности трансформатора

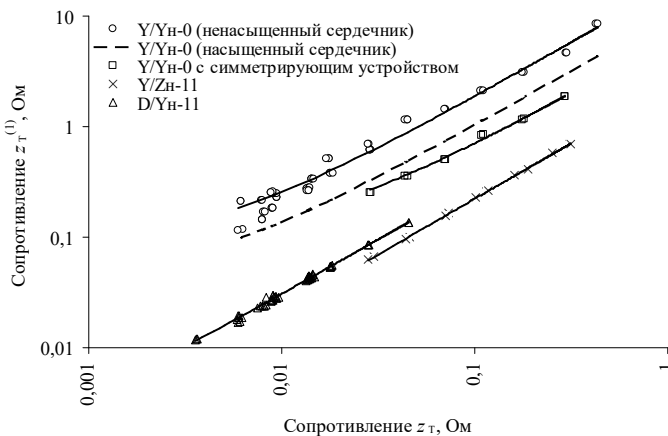


Рисунок 11.2 – Зависимость сопротивления однофазному току КЗ от сопротивления короткого замыкания трансформатора

Диаграмма на рисунке 11.2 построена в логарифмическом масштабе по двум осям, что позволяет не только охватить большой диапазон значений сопротивлений, но также не сильно изменяет визуальный вид зависимостей, которые с достаточной точностью для практических расчетов описываются степенной или линейной функцией:

$$z_T^{(1)} = K_T^{(1)} \cdot A_T \cdot z_T,$$

где $K_T^{(1)}$, A_T – коэффициенты аппроксимирующей функции; значения коэффициентов представлены в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Коэффициенты $K_T^{(1)}$ и A_T , характеризующий изменение сопротивления трансформатора однофазному току КЗ по отношению к его сопротивлению короткого замыкания

Схема соединений обмоток	Расчетные значения $K_T^{(1)} / A_T^{(1)}$ по		
	справочникам	данным испытаний ОАО “МЭТЗ им. В.И.Козлова” при магнитной системе	
		ненасыщенной	насыщенной
Y/Y _n	9,2÷10,8 ²⁾	17,5 / 0,9	9,5 / 0,9 ³⁾
Y/Y _n с СУ ⁴⁾	–	5,8 / 0,9	– ⁵⁾
D/Y _n	3,0 ⁶⁾	3,0	
Y/Z _n	2,2	2,2	

Примечания.

¹⁾ Если значение С не указано, то функция линейного вида (С = 1).

²⁾ Для насыщенного состояния сердечника трансформатора в зависимости от мощности трансформатора [11.3, таблица 3-8].

³⁾ Расчетное значение с учетом понижающего коэффициента 0,5 для z_{T0} при насыщении сердечника трансформатора согласно [11.3, п.3-4 Б 5].

⁴⁾ СУ – симметрирующее устройство.

⁵⁾ Нет достаточного объема данных для статистической оценки значения.

⁶⁾ По данным справочника [11.11, ф.(8-16), (8-17)] коэффициент равен 2,95.

На рисунке 11.3 показаны результаты еще одного эксперимента, который проводился на ОАО “МЭТЗ им. В.И. Козлова” [11.14], и представляет интерес с точки зрения анализа сопротивления нулевой последовательности. Цель эксперимента определить для трансформаторов ТМ-100 10/0,4кВ с различными схемами соединения обмоток зависимости нагрузочных потерь при несимметричной нагрузке фаз.

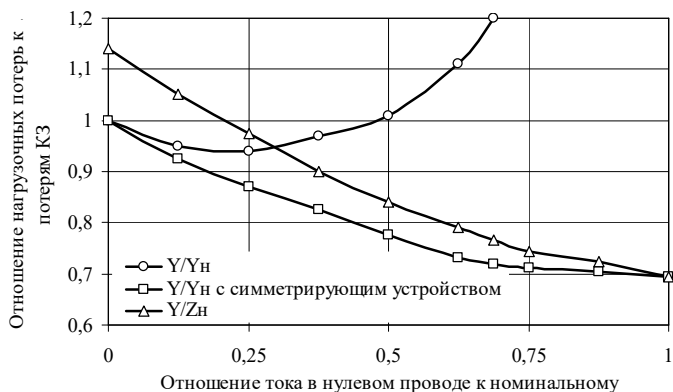


Рисунок 11.3 – Зависимости нагрузочных потерь в трансформаторе ТМ-100 10/0,4кВ при несимметричной нагрузке фаз

Несимметрия нагрузки создавалась путем регулирования тока в одной фазе от номинального значения до нуля, при поддержании токов в двух других фазах равными номинальному значению. Примем, что ток регулировался в фазе L1. Найдем для этого случая прямой токи I_1 , обратной I_2 и нулевой I_0 последовательности:

$$\bar{I}_1 = 1/3(I_{L1}e^{j0} + \bar{a}I_{L2}e^{j-120} + \bar{a}^2I_{L3}e^{j120}),$$

$$\bar{I}_2 = 1/3(I_{L1}e^{j0} + \bar{a}^2I_{L2}e^{j-120} + \bar{a}I_{L3}e^{j120}),$$

$$\bar{I}_0 = 1/3(I_{L1}e^{j0} + I_{L2}e^{j-120} + I_{L3}e^{j120}),$$

заменим

$$\bar{a} = e^{j120},$$

$$\bar{a}^2 = e^{j-120},$$

$$I_{L2} = I_{L3} = I_{HT},$$

$$I_{L1} = k_{L1} I_{HT},$$

где I_{HT} – номинальный ток в обмотке низкого напряжения, А;

k_{L1} – коэффициент снижения тока в фазе L1 относительно номинального тока;

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j-120} e^{j120} + I_{HT}e^{j120} e^{j-120}) = 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j0}) = \\ &= 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + 2I_{HT}e^{j0}) = 1/3(k_{L1} I_{HT} + 2I_{HT})e^{j0}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 &= 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j-120} e^{j-120} + I_{HT}e^{j120} e^{j120}) = 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j120} + I_{HT}e^{j-120}) = \\ &= 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j180}) = 1/3(I_{HT} - k_{L1} I_{HT})e^{j180}, \end{aligned}$$

$$\bar{I}_0 = 1/3(k_{L1} I_{HT}e^{j0} + I_{HT}e^{j-120} + I_{HT}e^{j120}) = 1/3(I_{HT} - k_{L1} I_{HT})e^{j180}.$$

Можно увидеть, что токи обратной \bar{I}_2 и нулевой \bar{I}_0 последовательности равны между собой.

Найдем сумму между модулями токов \bar{I}_1 и \bar{I}_2 :

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= 1/3(k_{L1} I_{HT} + 2I_{HT}) + 1/3(I_{HT} - k_{L1} I_{HT}) = \\ &= 1/3(k_{L1} I_{HT} + 2I_{HT} + I_{HT} - k_{L1} I_{HT}) = I_{HT}. \end{aligned}$$

Для модулей векторов можно записать:

$$I_2 = I_0 = I_N/3,$$

$$I_1 = I_{HT} - I_2 = I_{HT} - I_0,$$

где I_N – модуль вектора тока в нулевом проводе трансформатора, А.

Нагрузочные потери в трансформаторе $P_{нагр}$, Вт

$$P_{нагр} = 3(I_1^2 r_{T1} + I_2^2 r_{T2} + I_0^2 r_{T0}).$$

Учтем равенство (11.9) и введем замены:

$$r_{T0} = K_{T0} r_{T1},$$

$$P_{нагр} = P_k k_3^2,$$

где K_{T0} – коэффициент, характеризующий изменение сопротивления нулевой последовательности трансформатора по отношению к его сопротивлению короткого замыкания;

P_k – потери КЗ (потери мощности в номинальном режиме), Вт;

k_3 – коэффициент загрузки трансформатора.

$$P_k k_3^2 = 3(I_1^2 r_{T1} + I_0^2 r_{T1} + I_0^2 K_{T0} r_{T1}) = 3r_{T1}(I_1^2 + I_0^2 + I_0^2 K_{T0}),$$

заменим

$$P_k/3r_{T1} = I_{HT}^2,$$

из полученного выражения определим K_{T0}

$$I_{HT}^2 k_3^2 = I_1^2 + I_0^2 + I_0^2 K_{T0} = (I_{HT} - I_0)^2 + I_0^2 + I_0^2 K_{T0} = I_{HT}^2 - 2I_{HT}I_0 + 2I_0^2 + I_0^2 K_{T0},$$

$$K_{T0} = k_3^2 I_{HT}^2 / I_0^2 - I_{HT}^2 / I_0^2 + 2I_{HT} / I_0 - 2.$$

В результате этого анализа необходимо определить зависимость коэффициента K_{T0} от отношения тока в нулевом проводе к номинальному, поэтому можно перейти к безразмерным величинам в соответствии с диаграммой на рисунке 11.3:

$$I_{HT} = 1,$$

$$k_N = I_N / I_{HT} = I_N,$$

$$I_0 = I_N / 3 = k_N / 3,$$

$$K_{T0} = 9/k_N^2 (k_3^2 - 1) + 6/k_N - 2.$$

На рисунке 11.4 представлены результаты расчета коэффициента K_{T0} для зависимостей нагрузочных потерь в трансформаторе ТМ-100 10/0,4кВ при несимметричной нагрузке фаз (см. рисунок 11.3).

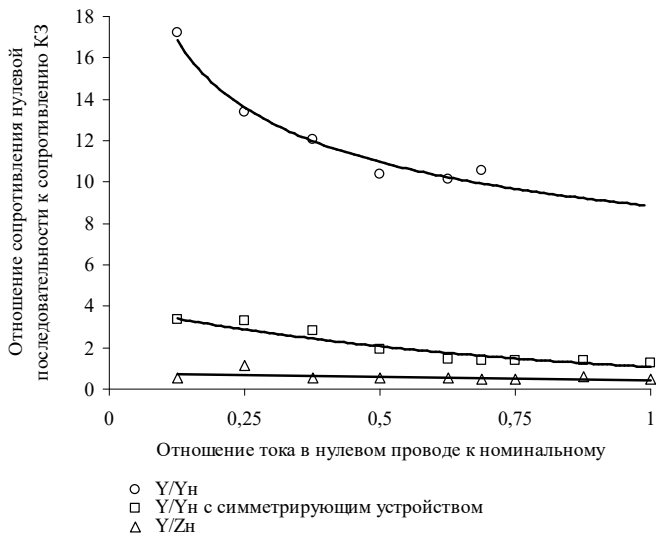


Рисунок 11.4 – Зависимости коэффициента, характеризующего изменение активной составляющей сопротивления нулевой последовательности по отношению к его сопротивлению КЗ, для трансформаторов ТМ-100 10/0,4кВ

Эксперименты по измерению нагрузочных потерь при несимметричной нагрузке фаз показали, что для трансформаторов со схемой соединений обмоток Y/Y_n , в том числе и с симметрирующим устройством (трансформаторы серии ТМГСУ), с увеличением тока в нулевом проводе уменьшается активная составляющая сопротивления нулевой последовательности. Этот результат совпадает с данными [11.12] и подтверждает правомерность применения понижающих коэффициентов, которые использованы в таблице 11.2 при определении коэффициентов для условия насыщенной магнитной системы трансформатора согласно рекомендаций [11.3, п.3-4 Б 5].

Для трансформаторов со схемой соединений обмоток Y/Y_n сопротивление нулевой последовательности и полное сопротивление силового трансформатора току однофазного КЗ не являются постоянными и зависят от загрузки нейтрали (см рисунок 11.4). Причем значения этих сопротивлений в диапазоне эксплуатационных режимов трансформатора изменяются примерно в два раза. По этой причине необходимо обосновать, какое из значений сопротивлений следует применять при расчетах тока однофазного КЗ.

Более низкое значение сопротивления нулевой последовательности трансформатора, которое соответствует значительной несимметрии нагрузки и высокой загрузке нейтрали трансформатора со схемой соединений Y/Y_n , соответствует более высокому расчетному току однофазного КЗ. В справочниках [11.3, п.3-4 Б 5; 11.5, табл. 2; 11.10, табл. 2.50] это значение рекомендуется принимать в качестве расчетного с целью недопущения необоснованных затрат на устройства защиты и линии электропередачи. Однако, при низких значениях токов КЗ в линии, сопротивление трансформатора по справочникам будет меньше фактического, следовательно фактический ток КЗ будет меньше расчетного. В этом случае увеличиваются вероятности несрабатывания электромагнитного расцепителя в аппарате защиты или срабатывания теплового расцепителя, плавкой вставки за интервал больше регламентированного. Следовательно, в расчетах для линии с токами однофазного КЗ меньше половины номинального тока трансформатора со схемой соединений обмоток Y/Y_n , следует учитывать больший коэффициент $K_T^{(1)}$ для ненасыщенной магнитной системы из таблицы 11.2.

Для трансформаторов со схемами соединений обмоток D/Y_n и Y/Z_n сопротивление нулевой последовательности и сопротивление однофазному току КЗ не изменяется при различной несимметрии нагрузки и коэффициенте загрузки (см. рисунок 11.4), поэтому выбор расчетного значения для них более упрощен. Необходимо отметить, что согласно требованиям СП 4.04.03-2023 [10.23, п.6.2.1] эти две схемы соединений обмоток трансформаторов, как правило, следует применять по условиям надежности действия защиты от однофазных замыканий в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

Сопротивление нулевой последовательности трансформатора можно найти по эмпирическим формулам (см. таблицу 11.1). Однако разделение этого сопротивления на активную и реактивную составляющие трудоемка, а также значимо не повышает точность результатов расчета. Поэтому при применении метода расчета по сопротивлению цепи "фаза-нуль" целесообразно по эмпирическим формулам определять непосредственно

модуль полного сопротивления силового трансформатора току однофазного КЗ $z_T^{(1)}$, Ом, в зависимости от схемы соединения обмоток:

- для Y/Yн, Y/Yн с симметрирующим устройством

$$z_T^{(1)} = K_T^{(1)} (10u_k U_{HT}^2 / S_{HT})^{0,9}, \quad (11.11)$$

- для Y/Zн, D/Yн

$$z_T^{(1)} = 10K_T^{(1)} u_k U_{HT}^2 / S_{HT}, \quad (11.12)$$

где $K_T^{(1)}$ – эмпирический коэффициент, характеризующий изменение сопротивления трансформатора однофазному току КЗ по отношению к его сопротивлению короткого замыкания; значения коэффициента представлены в таблице 11.2.

Что такое цепь «фаза-нуль»?

Как указывалось выше полное сопротивление цепи «фаза-нуль» z_{Π} в формуле (11.5) определяется суммой сопротивлений проводников (шинопроводов, проводов, кабелей), трансформаторов тока, реакторов, токовых катушек автоматических выключателей, различных контактных соединений и электрической дуги. В большинстве практических расчетов для предварительного определения тока однофазного КЗ на стадии, когда подробная электрическая схема и ее конструктивные решения еще не разработаны, обычно учитывают только сопротивления фазных и нулевых проводников.

Перед этапом расчета для систем TN-C-S и TN-S зануления электроустановки необходимо определить какой из проводников N или PE принимать за расчетный в цепи «фаза-нуль». Приоритетной функцией системы зануления электроустановки и автоматического отключения ее питания при однофазных КЗ является защита от поражения электрическим током человека при косвенном прикосновении, следовательно, расчет должен быть проведен для цепи с защитным проводником («фаза – PE (PE+PEN)»).

Выписка из ГОСТ 30331.3-95(МЭК 364-4-41-92) [11.15]

413.1.1.1.Отключение питания

Защитное устройство, предназначенное для автоматического отключения питания цепи или электрооборудования, должно обеспечивать защиту от косвенного прикосновения при замыкании токоведущей части на открытую проводящую часть или защитный проводник цепи или электрооборудования...

Выписка из ТКП 181-2023 [11.16]

Б.29.8 Проверка цепи «фаза – нуль» в электроустановках до 1000 В с глуким заземлением нейтрали (в системах TN-C, TN-S, TN-C-S).

При вводе в эксплуатацию нового электрооборудования и электрооборудования после восстановительного ремонта и реконструкции проверка, как правило, проводится в период пусканаладочных работ. Если измерение полного сопротивления цепи «фаза – нуль» невозможно, достаточным является подтверждение электрической непрерывности защитного проводника при условии, что имеются расчеты полного

сопротивления цепи «фаза – нуль» или активного сопротивления защитных проводников, а также токов короткого замыкания.

Однако несрабатывание аппарата защиты при КЗ приводит не только к тяжелым последствиям поражения человека электрическим током, но также может создать условия для возникновения пожара и/или взрыва. Поэтому для правильного выбора аппаратов защиты в системах TN-C-S и TN-S необходимо определить меньший из токов КЗ по цепям «фаза – PE (PE+PEN)» и «фаза – N».

Сопротивление цепи «фаза – нуль» (далее по тексту будет использоваться общепринятое название без указанного выше разделения на две разные цепи протекания однофазного тока КЗ в системах TN-C-S и TN-S) приводится во многих ТНПА и методических пособиях.

В упрощенном варианте расчета сопротивления $z_{пл}$ для кабельных линий учитывают только активные сопротивления фазной и нулевой (PE или N) жилы [11.5, п. 5.2]. Этот метод не применим в случаях, когда в качестве проводника PE используется отдельно проложенный проводник, в том числе металлоконструкция, или когда имеется повторное заземление PE или PEN проводников.

Если имеются данные по сопротивлениям прямой, обратной и нулевой последовательности кабельной или воздушной линии, то сопротивление цепи «фаза – нуль» может быть вычислено по формуле:

$$z_{пл} = |\bar{z}_{пл1} + \bar{z}_{пл2} + \bar{z}_{пл0}|/3,$$

для кабеля и проводов

$$\bar{z}_{пл1} = \bar{z}_{пл2},$$

$$z_{пл} = |2\bar{z}_{пл1} + \bar{z}_{пл0}|/3,$$

где $\bar{z}_{пл1}$ – сопротивление прямой последовательности кабельной или воздушной линии электропередачи;

$\bar{z}_{пл2}$ – сопротивление обратной последовательности кабельной или воздушной линии электропередачи;

$\bar{z}_{пл0}$ – сопротивление нулевой последовательности кабельной или воздушной линии электропередачи.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности для некоторых конструкций кабелей приведены в [11.2, прил. 2; 11.6, табл. 6, 26, 27; 11.17 табл. 9-15].

Для сравнения сопротивлений цепей «фаза – PE», «фаза – PEN» и «фаза – N» в таблице 11.3 представлены расчеты по упрощенному методу с учетом только активных сопротивлений фазного и нулевого проводников, а также по методике IEC/TR 60909-2:2008 с учетом внутренних и внешних индуктивных сопротивлений и повторных заземлений PE или PEN проводников.

Упрощенный расчет сопротивления цепи «фаза – нуль» с учетом только активных сопротивлений допустим для случая полностью изолированного от земли или заземленного только со стороны источника питания нулевого (N, PE, PEN) проводника в составе кабельного изделия или провода СИП (таблица 11.3). Следует его применять для медных жил сечением до 95 мм², для алюминиевых – до 150 мм². Погрешность результата в этих случаях менее 10 % допускаемых [10.33, п.6.2.3].

Таблица 11.3 – Расчетное сопротивление цепи «фаза – нуль» для кабелей и проводов при температуре жил 65°C

Число жил x сечение жил, мм ²	Сопротивление цепи «фаза – нуль», Ом/км				
	r_{L-PEN} , r_{L-N} ¹⁾	z_{L-PEN} , z_{L-N} ²⁾	z_{L-PENE} ³⁾	z_{L-PENS} ⁴⁾	$z_{L-PENSE}$ ⁵⁾
АББШв					
4x16	4,34	4,34	2,53	3,81	2,55
4x25	2,78	2,78	1,80	2,50	1,81
4x35	1,98	1,99	1,42	1,82	1,41
4x50	1,39	1,40	1,09	1,24	1,06
СИП-4					
4x25	2,86	2,87	1,84	–	–
4x35	2,04	2,05	1,44	–	–
4x50	1,43	1,44	1,11	–	–
<p>Примечания.</p> <p>¹⁾ r_{L-PEN}, r_{L-N} – сопротивление цепи с учетом только активных сопротивлений фазного и объединенного PEN или нулевого рабочего N проводников соответственно. Объединенный PEN проводник заземлен только со стороны источника питания.</p> <p>²⁾ z_{L-PEN}, z_{L-N} – сопротивление с учетом полных сопротивлений фазного и объединенного PEN или нулевого рабочего N проводников соответственно. Объединенный PEN проводник заземлен только со стороны источника питания.</p> <p>³⁾ z_{L-PENE} – сопротивление с учетом полных сопротивлений фазного и объединенного PEN проводников. Объединенный PEN проводник заземлен со стороны источника питания и электроприемника.</p> <p>⁴⁾ z_{L-PENS} – сопротивление с учетом полных сопротивлений фазного проводника и параллельного соединения объединенного PEN проводника с токопроводящей оболочкой (броней из стальных оцинкованных лент). Объединенный PEN проводник и оболочка заземлены только со стороны источника питания.</p> <p>⁵⁾ $z_{L-PENSE}$ – сопротивление с учетом полных сопротивлений фазного проводника и параллельного соединения объединенного PEN проводника с токопроводящей оболочкой (броней из стальных оцинкованных лент). Объединенный PEN проводник и оболочка заземлены со стороны источника питания и электроприемника.</p>					

Согласно данным в таблице 11.3 при одинаковых сечениях N и PE проводников сопротивление цепи «фаза – N» будет равно или больше сопротивления цепи «фаза – PE», значения которого значимо уменьшаются при соединении с токопроводящей оболочкой кабеля или другими металлоконструкциями в системах заземления или уравнивания потенциалов. Для этих случаев необходимо рассчитать токи однофазного КЗ не только по сопротивлению цепи «фаза – PE», но и по сопротивлению цепи «фаза – N». Так как для последнего сопротивления ток однофазного КЗ будет меньше, то его следует использовать при дальнейшей проверке аппаратов защиты по току расцепления.

Сопротивление участков кабельных и воздушных линий электропередачи, включенных в цепь «фаза – нуль», $z_{\text{ПЛи}}$, Ом:

- с учетом только активных сопротивлений

$$z_{\text{ПЛи}} = \frac{L_i [1 + \alpha(t_{\text{кзи}} - 20)]}{\gamma_{20i}} \cdot \frac{F_{\text{Ли}} + F_{\text{PEi}}}{F_{\text{Ли}} F_{\text{PEi}}}, \quad (11.13)$$

- с учетом активных, внутренних и внешних индуктивных сопротивлений

$$z_{\text{ПЛи}} = L_i z_{\text{L-PEi}} 10^{-3}, \quad (11.14)$$

где L_i – длина i -го участка с одинаковой конструкцией кабельной или воздушной линии, м;

$t_{\text{кзи}}$ – расчетная температура жил кабеля или провода на i -том участке при КЗ, °С;

α – температурный коэффициент; для меди и алюминия равен 0,004 К⁻¹;

γ_{20i} – удельная проводимость материала проводника на i -том участке при температуре 20 °С, См·м/мм²; с учетом снижения паспортного сечения жил за счет скрутки и удлинения в кабельном изделии γ_{20} для меди принимается 53 См·м/мм², для алюминия – 32 См·м/мм² [10.32, п. 12.4];

$F_{\text{Ли}}$ – площадь поперечного сечения фазного проводника на i -том участке, мм²;

F_{PEi} – площадь поперечного сечения защитного РЕ или объединенного PEN проводника на i -том участке, мм²;

$z_{\text{L-PEi}}$ – расчетное сопротивление цепи «фаза – нуль» для кабелей и проводов на i -том участке, Ом/км (МОм/м).

В формулах (11.13) и (11.14) обозначение $z_{\text{L-PEi}}$ унифицировано для всех конструкций линии защитного проводника РЕ или объединенного проводника PEN. Например, некоторые конструкции приведены в таблице 11.3.

В случаях, когда сопротивление нулевого рабочего проводника N больше сопротивления защитного проводника РЕ, расчеты величины $z_{\text{ПЛ}}$ проводятся по формулам (11.13) и (11.14) с заменой F_{PEi} и $z_{\text{L-PEi}}$ на F_{Ni} и $z_{\text{L-Ni}}$ соответственно.

Сопротивление цепи «фаза – нуль» $z_{\text{П}}$, Ом

$$z_{\text{П}} = \sum_{i=1}^n z_{\text{ПЛи}} + z_{\text{доп}}, \quad (11.15)$$

где $z_{\text{доп}}$ – другие значимые сопротивления элементов цепи, Ом; определяются при необходимости по критерию допустимой погрешности расчета тока КЗ не более 10 % [11.2, п. 1.3].

В соответствии с практическими рекомендациями Гусева Ю.П. [11.13, стр 119] при проверке защит одиночных присоединений расчетная точка КЗ должна находиться в конце кабельной или воздушной линии, на зажимах электроприемника.

При проверке защит групповых присоединений расчетная точка должна находиться за наиболее удаленным защитным аппаратом следующего уровня защиты для учета его сопротивления при КЗ в самом аппарате. Учитывая, что на вторичных сборках имеются аппараты с разными параметрами, расчетную точку следует размещать за аппаратом, имеющим наибольшее внутреннее сопротивление. Обычно, таким аппаратом является автоматический выключатель присоединения с минимальным номинальным током.

Для проверки аппарата защиты расположенного в ШНО железнодорожного парка рассчитывается ток в цепи «фаза-нуль» при точке КЗ (точка №1) за аппаратом защиты:

– в кабельном ящике жесткой поперечины наиболее удаленной от ШНО для кабельной магистральной линии;

– в ЯО жесткой поперечины наиболее удаленной от ШНО для воздушной магистральной линии.

Для случая подключения ШНО по центру парка длина участка кабельной или воздушной линии от ШНО до точки КЗ №1 L_1 , м

$$L_1 = (0,5L(G - 1) + L_B) K_L. \quad (11.16)$$

где G – количество жестких поперечин в осветительной установке железнодорожного парка;

L_B – расстояние от шкафа ШНО до промежуточной опоры или кабельного ящика при четном значении G , до опоры жесткой поперечины расположенной по центру парка при нечетном значении G , м.

Аппарат защиты расположенный в ЯО или кабельной ящике проверяется по току при КЗ в монтажной коробке наиболее удаленной от ШНО пары осветительных приборов – расчетная точка КЗ №2.

Кабельная линия, расположенная на конструкции жесткой поперечины имеет длину L_2 , м,

$$L_2 = (Nm + H_p) K_L. \quad (11.17)$$

Пример 11А

Исходные данные по заданию А:

– расстояние между ригелями с осветительными приборами L равно 100 м;

– количество путей в парке $N = 5$;

– расстояние между осями смежных путей $m = 5,5$ м;

– количество жестких поперечин $G - 10$.

Магистральная линия выполняется проводом СИП-4 с сечением жилы 35 мм^2 (см. пример 10.4 А). Расстояние от шкафа ШНО до промежуточной опоры между жесткими поперечинами №5 и №6 L_B принято 200 м (см. пример 10.4 А).

Длина участка магистральной воздушной линии электропередачи от ШНО до точки КЗ №1 определяется по формуле (11.16):

$$L_1 = (0,5 \cdot 100(10 - 1) + 200) \cdot 1,1 = 715 \text{ м.}$$

Сопротивление участка воздушной линий электропередачи, включенной в цепь «фаза – нуль» («фаза – PEN»), $z_{ПЛ1}$ определяется по формуле (11.14) с учетом z_{L-PENE} для СИП-4 4x35 (см. таблицу 11.3):

$$z_{ПЛ1} = 715 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} = 1,030 \text{ Ом.}$$

Высота монтажа осветительных приборов над подключением магистральной воздушной линии электропередачи H_p принимается равной нулю (СИП подключается в ЯО).

Групповая линия от ящика ЯО до монтажной коробки подключения последней пары осветительных приборов на жесткой поперечине выполняется кабелем ВВГ-Пнг(А)-3x1,5 (см. пример 10.4 А). Длина участка кабельной линии электропередачи, расположенной на конструкции жесткой поперечины, определяется по формуле (11.17):

$$L_2 = (5 \cdot 5,5 + 0) \cdot 1,1 = 30,3 \text{ м.}$$

В справочниках нет данных по сопротивлению цепи «фаза – нуль» для кабеля с L, N и PE жилами. Так как в рассматриваемом кабеле малое расстояние между жилами, следовательно, незначительное индуктивное сопротивление и заземление защитного проводника выполнено только со стороны ящика ЯО, то для определения сопротивления кабеля в цепи «фаза – нуль» можно применить упрощенный расчет с учетом только активных сопротивлений.

Принимаем расчетную модель с PE проводником, заземленным с одной стороны и не имеющим связи с токопроводящей конструкцией жесткой поперечины. Такая модель упрощает расчет с увеличением результата по сопротивлению цепи, что допустимо для задачи нахождения минимального однофазного тока КЗ.

Сопротивление участка кабельной линий ВВГ-Пнг(А) 3x1,5 $z_{ПЛ2}$ определяется по формуле (11.13) для температуры жил $t_{кз1}$ равной $65 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$z_{ПЛ2} = \frac{30,3 [1 + 0,004(65 - 20)]}{53} \cdot \frac{1,5 + 1,5}{1,5 \cdot 1,5} = 0,899 \text{ Ом.}$$

Сопротивление цепи «фаза – нуль» («фаза – PE») $z_{П}$ определяется по формуле (11.15):

- для точки КЗ №1 (за аппаратом защиты в ящике ЯО жесткой поперечины №1 или №10)

$$z_{П1} = 1,030 \text{ Ом,}$$

- для точки КЗ №2 (в монтажной коробке наиболее удаленной пары осветительных приборов на жесткой поперечине №1 или №10)

$$z_{П2} = 1,030 + 0,899 = 1,929 \text{ Ом.}$$

На трансформаторной подстанции по заданию установлен трансформатор ТМГ-33ХЗК2 160кВА 10/0,4кВ Y/Зн-11 (напряжение короткого замыкания u_k равно

4.5 % [10.31]), для которого полное сопротивление току однофазного КЗ определяется по формуле (11.12):

$$z_{\tau}^{(1)} = 10 \cdot 2,2 \cdot 4,5 \cdot 0,4^2 / 160 = 0,099 \text{ Ом.}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ рассчитывается по формуле (11.5):

- для точки КЗ №1

$$I_{n1}^{(1)} = \frac{230}{\frac{0,099}{3} + 1,030} = 216 \text{ А.}$$

- для точки КЗ №2

$$I_{n2}^{(1)} = \frac{230}{\frac{0,099}{3} + 1,929} = 117 \text{ А.}$$

На участке магистральной линии защитный и нулевой рабочий проводники объединены в PEN проводник, а на жесткой поперечине они разделены на два независимых проводника PE и N. При условии, что PE проводник заземлен с одной стороны и не имеет связи с токопроводящей конструкцией жесткой поперечины, можно допустить равенство сопротивлений цепей «фаза – PE» и «фаза – N». Следовательно, в расчете определен минимальный ток однофазного КЗ и пересчета по сопротивлению цепи «фаза – N» не требуется.

Исходные данные идентичны выше приведенному примеру 11А.

В настоящем примере опущено подробное описание определения сопротивлений прямой и нулевой последовательности элементов цепи КЗ, а представлены только результаты в таблице 11.4.

Активное сопротивление дуги в месте КЗ $r_{д}$, мОм, определялось по эмпирическому выражению [11.2, ф.(40)]:

$$r_{д} = 16\sqrt{l_{д}} / (I_{n0}^{(1)} \cdot 10^{-3})^{0,85},$$

где $l_{д}$ – длина дуги, см; определяется по [11.2, приложение 9].

При удалении точки замыкания от трансформаторной подстанции ток КЗ уменьшается, а сопротивление дуги увеличивается. Однако при этом значение отношения сопротивлений проводников цепи и дуги также увеличивается. Поэтому можно допустить, что сопротивление дуги в расчете можно не учитывать при сопротивлении цепи «фаза – нуль» более 400 мОм (значение определено по эмпирической зависимости [11.17, ф.(13)] при коэффициенте дугового КЗ равного 0,9).

Стоит обратить внимание при расчете однофазных токов КЗ в осветительных электросетях на учет внутренних сопротивлений автоматических выключателей (часто эта величина представлена сопротивлением их токовых катушек). С уменьшением номинального тока автоматического выключателя его внутреннее сопротивление значительно возрастает до сотен и тысяч миллиом (рисунок 11.5), что может иметь значимое влияние на результат расчета даже при больших длинах линий электропередачи.

Таблица 11.4 – Сопротивления элементов цепи КЗ

Элемент цепи	Сопротивление, Ом ¹⁾				Обоснование
	r_{1j}	x_{1j}	r_{0j}	x_{0j}	
В	–	0	–	–	не задано
Понижающего трансформатора	0,013	0,043	0,005	0,008	(11.8-11.10), табл. 11.1, [10.31]
Магистральной воздушной линии	0,731	0,061	1,421	1,015	рассчитано по [11.18]
Групповой кабельной линии	0,450	0,003	1,798	0,014	рассчитано по [11.18] ²⁾
Токовых катушек автоматических выключателей	0,014	–	0,014	–	[9.35, 41]
Контактов	0,006	–	0,006	–	[11.2]
Дуги в месте КЗ:					
- точка №1	0,063	–	0,063	–	[11.2, ф.(40)] ³⁾
- точка №2	0,076	–	0,076	–	[11.2, ф.(40)] ³⁾
ИТОГО для КЗ:					
- точка №1	0,827	0,104	1,509	1,023	
- точка №2	1,290	0,107	3,32	1,037	

Примечания.

¹⁾ r_{1j}, x_{1j} – активное и индуктивное сопротивление прямой последовательности для j -го элемента цепи;
 r_{0j}, x_{0j} – активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности для j -го элемента цепи;

²⁾ При определении сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности однофазная линия заменяется трехфазной четырехпроводной с проводниками эквивалентными по характеристикам.

³⁾ В формуле для расчета активного сопротивления дуги включено действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, поэтому расчет проводится методом последовательных приближений.

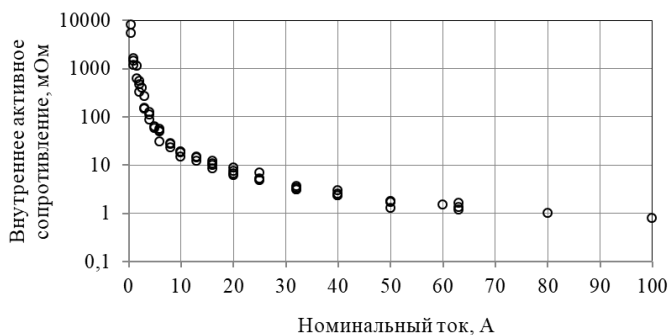


Рисунок 11.5 – Внутреннее сопротивление модульных автоматических выключателей с время-токовой характеристикой типа С

Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ определяется по формуле (11.4):

- для точки КЗ №1

$$I_{\text{н0}}^{(1)} = \frac{3 \cdot 230}{\sqrt{(2 \cdot 0,827 + 1,509)^2 + (2 \cdot 0,104 + 1,023)^2}} = 203 \text{ А,}$$

- для точки КЗ №2

$$I_{\text{н0}}^{(1)} = \frac{3 \cdot 230}{\sqrt{(2 \cdot 1,290 + 3,320)^2 + (2 \cdot 0,107 + 1,037)^2}} = 114 \text{ А,}$$

Погрешность результатов упрощенного метода (см. пример 11 А) относительно результатов расчета по ГОСТ 28249 составляет менее 10 %, поэтому для осветительной электросети железнодорожного парка более рационально применение упрощенного метода расчета по сопротивлению цепи «фаза – нуль» [11.2, п. 1.3].

В упрощенном расчете следует дополнительно учитывать сопротивление элементов цепи, которые имеют одинаковый порядок с сопротивлениями проводников линий электропередачи. Например, внутренние сопротивления автоматических выключателей с небольшим номинальным током (см. рисунок 11.5).

Пример 11В

Исходные данные по заданию В:

- расстояние между ригелями с осветительными приборами L равно 100 м;
- количество путей в парке $N - 5$;
- расстояние между осями смежных путей $m - 5,5$ м;
- количество жестких поперечин $G - 13$.

Магистральная линия выполняется кабелем АВБШв с сечением жилы 25 мм² (см. пример 10.4 В). Расстояние от шкафа ШНО до опоры жесткой поперечины №7 L_B принято 200 м (см. пример 10.4 В).

Длина участка магистральной кабельной линии электропередачи от ШНО до точки КЗ №1 определяется по формуле (11.16):

$$L_1 = (0,5 \cdot 100 (13 - 1) + 200) \cdot 1,1 = 880 \text{ м.}$$

Сопротивление участка магистральной кабельной линий электропередачи, включенной в цепь «фаза – нуль» («фаза – N», см. примечание к таблице 10.2Пр), $z_{\text{пл1}}$ определяется по формуле (11.14) с учетом z_{L-N} для АВБШв 4x25 (см. таблицу 11.3):

$$z_{\text{пл1}} = 880 \cdot 2,78 \cdot 10^{-3} = 2,446 \text{ Ом.}$$

Высота монтажа осветительных приборов над подключением магистральной кабельной линии электропередачи H_p принимается равной 12 м (расстояние от кабельного ящика до ЩО с учетом подключения).

Линия электропередачи от кабельного ящика до монтажной коробки подключения последней пары осветительных приборов на жесткой поперечине выполняется кабелем ВВГ-Пнг(А) 2x1,5 (см. пример 10.4 В). Длина участка кабельной линии, расположенной на конструкции жесткой поперечины, определяется по формуле (11.17):

$$L_2 = (5 \cdot 5,5 + 12) \cdot 1,1 = 43,5 \text{ м.}$$

В справочниках нет данных по сопротивлению цепи «фаза – нуль» для кабеля с L и N жилами. Так как в рассматриваемом кабеле малое расстояние между жилами, следовательно, незначительное индуктивное сопротивление, то для определения сопротивления кабеля в цепи «фаза – нуль» можно применить упрощенный расчет с учетом только активных сопротивлений.

Принимаем расчетную модель с N проводником. Тогда сопротивление участка кабельной линии ВВГ-Пнг(А)-2х1,5 $z_{пл2}$ определяется по формуле (11.13) для температуры жил $t_{кж}$ равной 65 °С:

$$z_{пл2} = \frac{43,5 [1 + 0,004(65 - 20)]}{53} \cdot \frac{1,5 + 1,5}{1,5 \cdot 1,5} = 1,291 \text{ Ом.}$$

Сопротивление цепи «фаза – нуль» («фаза – N») $z_{п}$ определяется по формуле (11.15):

- для точки КЗ №1 (за аппаратом защиты в кабельном ящике жесткой поперечины №1 или №13)

$$z_{п1} = 2,446 \text{ Ом,}$$

- для точки КЗ №2 (в монтажной коробке наиболее удаленной пары осветительных приборов на жесткой поперечине №1 или №13)

$$z_{п2} = 2,446 + 1,291 = 3,737 \text{ Ом.}$$

На трансформаторной подстанции по заданию установлен трансформатор ТМГ-33ХЗК2 160кВА 10/0,4кВ Y/Zn-11 (напряжение короткого замыкания u_k равно 4.5 % [10.31]), для которого полное сопротивление току однофазного КЗ определяется по формуле (11.12):

$$z_{т}^{(1)} = 10 \cdot 2,2 \cdot 4,5 \cdot 0,4^2 / 160 = 0,099 \text{ Ом.}$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ рассчитывается по формуле (11.5):

- для точки КЗ №1

$$I_{н1}^{(1)} = \frac{230}{\frac{0,099}{3} + 2,446} = 93 \text{ А.}$$

- для точки КЗ №2

$$I_{н2}^{(1)} = \frac{230}{\frac{0,099}{3} + 3,737} = 61 \text{ А.}$$

Список использованных источников

9.35 Electrical installation solutions for buildings – Technical details. MCBs. [Электронный ресурс] / ABB Group // B01_Electrical installation solutions for buildings_part B_01_MCBs_[EN]_(PDF) – URL:<https://library.abb.com/r?cid=9aac100489> (дата обращения: 07.06.2025).

10.13 ТКП 339-2022 (33240) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний [Текст] – Взамен ТКП 339-2011 (02230); введ. 20.12.2022.

10.23 СП 4.04.03-2023 Силовое и осветительное электрооборудование промышленных предприятий [Текст] – С отменой ТКП 45-4-04-296-2014 (02250); введ. 15.05.2023

10.31 Трансформаторы ТМГ33 класса энергосбережения ХЗК2 [Электронный ресурс] Минский электротехнический завод имени В. И. Козлова – URL: <https://metz.by/wp-content/uploads/2024/01/TMG33X3K2.pdf> (дата обращения : 28.12.2024).

10.32 Кнорринг, Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 1992. – 448 с.: ил.

10.33 СП 4.04.07-2025 Электрические сети внешнего электроснабжения [Текст] – Введ. 14.05.2025

11.1 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с..

11.2 ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ – Взамен ГОСТ 28249-89; введ. 01.01.1996.

11.3 Найфельд, М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности, / М. Р. Найфельд – 4-е изд., перераб и доп. – М.: "Энергия", 1971. – 312 с., ил.

11.4 IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents – Published 28.01.2016

11.5 Рекомендации по расчету сопротивления цепи "Фаза-нуль" – М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1986 – 57 с.

11.6 Указания по расчету токов однофазных коротких замыканий в сетях до 1 кВ. М788-1080 – М.: Тяжпромэлектропроект им. Ф.Б. Якубовского, 1993. – 65 с.

11.7 ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия – С Изм.1 –4. – Взамен ГОСТ 11677-75; введ. 01.07.1986.

11.8 ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия – Введ. 01.01.2008.

11.9 ГОСТ 3484.1-88 Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. – С Изм.1. – Взамен 3484-77; введ. 01.01.1990.

11.10 Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. - 576 с. – (Электроустановки промышленных предприятий / Под общ. ред. Ю. Н. Тищенко и др.)

11.11 Kasikci, I. Short Circuits in Power Systems. A Practical Guide to IEC 60909-0 / I. Kasikci – Second Edition – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2018. – 294 p.

11.12 Пястолов, А. А. Особенности несимметричных режимов работы трансформаторов со схемой звезда – звезда с нулем / А. А. Пястолов, В. А. Козюков // Промышленная энергетика. – 1968. – №4 – С. 37 –40.

11.13 Жуков, В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 192 с., ил.

11.14 Трансформаторы типа ТМГСУ и ТМГСУ11 со специальным встроенным симметрирующим устройством [Электронный ресурс]/ Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова // Режим доступа: <https://metzby.ru/library/transformatory-tipa-tmgsu-i-tmgsu11-so-specialnym-vstroennym-simmetriruyushhim-ustrojstvom/> – Дата доступа : 17.09.2025.

11.15 ГОСТ 30331.3-95(МЭК 364-4-41-92) Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от поражения электрическим током [Текст] – Введ. 01.06.1999.

11.16 ТКП 181-2023 (33240) Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Электронный ресурс]– Взамен ТКП 181-2009 (02230); введ.27.11.2023 – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W02542898p> (дата обращения : 12.11.2025).

11.17 Шиша, М. А. Влияние электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ [Электронный ресурс] / М.А. Шиша, В. М. Александров, В.Н. Рычагов // Новости электротехники. – 2011. – № 6(73) – URL: <http://news.elteh.ru/arh/2011/72/07.php> (дата обращения: 25.11.2025).

Редакция 2025-08-05

Автор Евдасёв И.С.

Замечания и предложения: eis06@mail.ru

11.18 IEC/TR 60909-2:2008 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations – Edition 2.0 – Published 13.11.2008