ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ

ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ
имени Ф.Б. ЯКУБОВСКОГО

УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ ДО 1 КВ

М788-1080

Москва 1993 г.

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ

ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ
имени Ф.Б. ЯКУБОВСКОГО

УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ТОКОВ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ ДО 1 КВ

М788-1080

Главный инженер — А. Г. Смирнов
Начальник технического отдела — А. А. Шалыгин
Ответственный исполнитель — В. Т. Шилин

Москва 1993 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 4

2. Методы расчета 4

3. Справочные данные 12

Таблицы со значениями сопротивлений:

1. Трансформаторы масляные и сухие 13
2. Трансформаторы с негорючим заполнением 16
3. Комплектные шинопроводы 16
4. Троллейные шинопроводы 17
5. Плоские шины 18
6. Провода и кабели 19
7. Трансформаторы тока 20
8. Автоматические выключатели 21
9. Автоматические выключатели (до16 А) 21
10. Рубильники и раз'единители 22
11. Контактные соединения кабелей и шинопроводов 22
12. Алюминиевая оболочка 3-жильных кабелей 23
13. Алюминиевая оболочка 4-жильных кабелей 24
14. Водогазопроводные трубы 25
15. Электросварные трубы 26
16. Стальные полосы 27
17. Стальные круглые проводники 28
18. Профильная сталь (угловая, двутавровая) 29
19. Внешнее индуктивное сопротивление проводников 30
20. Сопротивление петли фазная жила - стальная полоса 32
21. Сопротивление петли фазная жила - угловая сталь 33
22. Неизолированные провода (А, М, АС) 34
23. Сопротивление петли ВЛ со стальными однопроволочными проводами (ПСО) 35
24. Сопротивление петли ВЛ со стальными многопроволочными проводами (ПС, ПМС) 36

25. Сопротивления нулевой последовательности комплектных шинопроводов 37
26. Сопротивления нулевой последовательности 3-жильных кабелей 37
27. Сопротивления нулевой последовательности 4-жильных кабелей 38
28. Сопротивление электрической дуги 39

4. Примеры расчета
4.1. Расчет по методу симметричных составляющих 41
4.2. Расчет по сопротивлениям r, x петли фаза-нуль 47
4.3. Расчет по полному сопротивлению петли фаза - нуль $Z_п$ 61

5. Заключение 64

Литература 65

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет токов однофазных коротких замыканий (КЗ) в сетях до 1 кВ необходим для обеспечения надежной работы защиты при минимальных значениях тока КЗ в конце защищаемой линии.

В соответствии с требованиями "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ) для надежного отключения поврежденного участка сети наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать номинальный ток плавкой вставки или номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с обратнозависимой от тока характеристикой не менее, чем в 3 раза.

Для электрических сетей во взрывоопасных зонах требования к кратности тока короткого замыкания (ТКЗ) повышаются: наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать номинальный ток плавкой вставки не менее, чем в 4 раза, а номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с обратнозависимой от тока характеристикой - не менее, чем в 6 раз.

Если автоматический выключатель имеет только мгновенно действующий расцепитель (отсечку), то наименьший расчетный ток короткого замыкания должен превышать уставку отсечки не менее, чем в 1,4 раза.

Из трех видов КЗ однофазные являются наиболее сложными для расчета. Если при расчете трех- и двухфазных КЗ нужно учитывать сопротивления только в прямой цепи короткого замыкания (в фазе), то при расчете однофазных КЗ необходим учет сопротивлений и в цепи зануления (в обратной цепи). Когда для зануления используются стальные трубы, обрамления кабельных каналов и другие строительные конструкции, в решении вопроса о сопротивлении цепи короткого замыкания появляется много неопределенностей.

Кроме того, однофазные короткие замыкания относятся к несимметричным, что вносит в расчет дополнительные усложнения.

2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Расчет токов однофазных КЗ можно выполнять методом симметричных составляющих или по сопротивлению петли фаза-нуль.

Оба метода широко описаны в технической литературе.

Метод симметричных составляющих предложен для упрощения расчетов несимметричных КЗ. Сущность этого метода состоит в замене несимметричной системы токов трехфазной сети при однофазном коротком замыкании тремя симметричными системами: прямой, обратной и нулевой последовательности. Симметричные системы являются достаточно простыми для теоретического расчета. Но поскольку переход от одной несимметричной системы к трем симметричным выполняется с помощью формального приема, из методики расчета исчезает наглядность, связанная с привычным определением тока по закону Ома. При практическом использовании этого метода часто возникают затруднения из-за отсутствия справочных материалов по сопротивлениям нулевой последовательности для принятого варианта выполнения цепи зануления.

При расчете тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль используется закон Ома, но встречаются те же затруднения с исходными данными. Так что выбор метода расчета может определяться для пользователя наличием у него тех или иных справочных материалов.

Оба метода должны давать один и тот же результат и теоретически могут быть выведены один из другого. Точность расчета определяется только точностью исходных данных. Покажем это, взяв за исходный метод симметричных составляющих.

Расчет однофазного КЗ методом симметричных составляющих производят по формуле

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}\, U_л}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}, \qquad (1)$$

где I_1 – действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, кА;

$U_л$ – среднее номинальное (линейное) напряжение сети, В. При расчете следует использовать следующую шкалу значений

$U_л$: 690, 525, 400, 230 В;

$R_{1\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление фазной цепи короткого замыкания (сопротивление прямой последовательности), мОм;

$R_{0\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление цепи КЗ для тока нулевой последовательности (сопротивление нулевой последовательности), мОм;

$X_{1\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление фазной цепи короткого замыкания (сопротивление прямой последовательности), мОм;

$X_{0\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление цепи КЗ для тока нулевой последовательности (сопротивление нулевой последовательности), мОм.

Сопротивления обратной последовательности равны сопротивлениям прямой последовательности и в формуле (1) учитываются коэффициентом 2 перед $R_{1\Sigma}$ и $X_{1\Sigma}$.

Суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления фазной цепи короткого замыкания определяются по формулам:

$$R_{1\Sigma} = r_{1т} + r_{1л} + r_{тт} + r_а + r_к + r_д; \quad (2)$$

$$X_{1\Sigma} = x_{1т} + x_{1л} + x_{тт} + x_а, \quad (3)$$

где $r_{1т}$, $x_{1т}$ – сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм;

$r_{1л}$, $x_{1л}$ – сопротивления прямой последовательности линии (фазного проводника), мОм;

$r_{тт}$, $x_{тт}$ – сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм;

$r_а$, $x_а$ – сопротивления автоматических выключателей, мОм;

$r_к$ – суммарное активное сопротивление различных контактов в фазной цепи КЗ, мОм;

$r_д$ – активное сопротивление электрической дуги в месте КЗ, мОм.

Суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления цепи КЗ для тока нулевой последовательности определяются по

формулам:

$$R_{0\Sigma} = r_{0т} + r_{0л} + r_{тт} + r_а + r_к + r_д, \quad (4)$$

$$X_{0\Sigma} = x_{0т} + x_{0л} + x_{тт} + x_а, \quad (5)$$

где $r_{0т}$, $x_{0т}$ – сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора, мОм;

$r_{0л}$, $x_{0л}$ – сопротивления нулевой последовательности линии (сопротивления шинопроводов, проводов, кабелей с учетом цепи зануления), мОм;

$r_{тт}$, $x_{тт}$, $r_а$, $x_а$, $r_к$, $r_д$ – см. в формулах (2) и (3).

Сопротивление нулевой последовательности линии равно сопротивлению фазного проводника плюс утроенное сопротивление цепи зануления:

$$r_{0л} = r_{1л} + 3r_н; \quad x_{0л} = x_{1л} + 3x_н, \quad (6)$$

где $r_{1л}$, $x_{1л}$ – см. в формулах (2), (3);

$r_н$, $x_н$ – эквивалентные сопротивления цепи зануления (нуля) от точки КЗ до трансформатора с учетом всех зануляющих элементов (нулевого провода, оболочки кабеля, стальных труб и т. д.), мОм.

Значение сопротивления цепи зануления для тока нулевой последовательности поврежденной фазы увеличиваетя в 3 раза, так как в соответствии с теоретическими предпосылками метода симметричных составляющих через цепь зануления замыкаются равные по значению токи нулевой последовательности всех трех фаз.

С учетом формул (6) формулы (4) и (5) примут вид:

$$R_{0\Sigma} = r_{0т} + r_{1л} + 3r_н + r_{тт} + r_а + r_к + r_д, \quad (7)$$

$$X_{0\Sigma} = x_{0т} + x_{1л} + 3x_н + x_{тт} + x_а, \quad (8)$$

Теперь суммы активных и индуктивных сопротивлений в подкоренном выражении формулы (1) можно выразить через слагаемые в формулах (2), (3), (7) и (8):

$$2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma} = 2(r_{1т} + r_{1л} + r_{тт} + r_а + r_к + r_д) +$$
$$+ (r_{0т} + r_{1л} + 3r_н + r_{тт} + r_а + r_к + r_д) =$$
$$= 2r_{1т} + r_{0т} + 3(r_{1л} + r_н + r_{тт} + r_а + r_к + r_д), \qquad (9)$$

$$2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma} = 2(x_{1т} + x_{1л} + x_{тт} + x_а) +$$
$$+ (x_{0т} + x_{1л} + 3x_н + x_{тт} + x_а) =$$
$$= 2x_{1т} + x_{0т} + 3(x_{1л} + x_н + x_{тт} + x_а), \qquad (10)$$

Два первых слагаемых в формулах (9) и (10) являются сопротивлениями трансформатора току однофазного КЗ:

$$r_1^{(1)} = 2r_{1т} + r_{0т}, \qquad x_т^{(1)} = 2x_{1т} + x_{0т},$$
$$Z_т^{(1)} = \sqrt{(2r_{1т} + r_{0т})^2 + (2x_{1т} + x_{0т})^2}\ . \qquad (11)$$

Суммы слагаемых в скобках в формулах (9) и (10) являются соответственно активным и индуктивным сопротивлениями петли фаза-нуль. Обозначив их $r_п$ и $x_п$ (сопротивления петли), получим:

$$r_п = r_{1л} + r_н + r_{тт} + r_а + r_к + r_д,$$
$$x_п = x_{1л} + x_н + x_{тт} + x_а. \qquad (12)$$

Формулу (1) для определения тока однофазного КЗ методом симметричных составляющих с учетом формул (9), (10), (11) и (12) можно представить теперь в виде:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}\ U_л}{\sqrt{(r_т^{(1)} + 3r_п)^2 + (x_т^{(1)} + 3x_п)^2}}\ . \qquad (13)$$

В аналогичной формуле для расчета тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль в числителе стоит фазное напряжение сети. Чтобы привести формулы двух методов к сопоставимому виду, разделим и числитель, и знаменатель формулы (13) на 3. Тогда в числителе окажется фазное напряжение сети и формула (13) примет вид:

$$I_1 = \frac{U_ф}{\sqrt{(r_т^{(1)}/3 + r_п)^2 + (x_т^{(1)}/3 + x_п)^2}} . \qquad (14)$$

Фазное напряжение сети

$$U_ф = U_л/\sqrt{3}, \qquad (15)$$

где $U_л$ – см. в формуле (1).

В знаменателе формулы (14) стоит полное сопротивление петли фаза-нуль, выраженное через активные и индуктивные составляющие. Причем, в сумму составляющих (в отличие от формулы 13) входит только одна третья часть сопротивления трансформатора току однофазного КЗ. Об'ясняется это тем, что сопротивления трансформатора току однофазного КЗ даются в технической литературе для расчета методом симметричных состаляющих, где в формулах используются целые значения этих сопротивлений.

Формула (14), которая относится уже к методу определения тока однофазного КЗ по сопротивлению петли фаза-нуль, получена без каких-либо упрощений из формулы (1), и, следовательно, оба метода при одних и тех же исходных данных дают один и тот же результат.

Но на практике результаты расчетов, выполненных двумя методами, могут не совпадать, так как исходные данные берутся из разных источников. В исходных данных для расчета ТКЗ по сопротивлению петли фаза-нуль сопротивление цепи зануления связывается с физическим ее выполнением (угловая сталь, полоса, стальные трубы). В исходных данных для расчета методом симметричных составляющих сопротивления нулевой последовательности от способа выполнения цепи зануления часто не зависят. Методика определения этих сопротивлений в литературе не раскрывается.

Формула (14) – это точная формула для расчета ТКЗ по сопротивлению петли фаза-нуль, позволяющая учитывать сопротивления всех элементов цепи короткого замыкания, когда известны активные и индуктивные составляющие этих сопротивлений. В технической литературе чаще всего описывается упрощенный вариант этой форму-

лы:

$$I_1 = \frac{U_ф}{Z_т^{(1)}/3 + Z_п}, \qquad (16)$$

где I_1 – действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, кА;

$U_ф$ – фазное напряжение сети, В (см. формулу 15);

$Z_т^{(1)}$ – полное сопротивление понижающего трансформатора току однофазного КЗ, мОм (см. формулы 11);

$Z_п$ – полное сопротивление петли фаза-нуль от понижающего трансформатора до точки КЗ, мОм.

$$Z_п = Z_{пу_1} l_1 + Z_{пу_2} l_2 + \ldots , \qquad (17)$$

где $Z_{пу_1} l_1$, $Z_{пу_2} l_2$ и т. д. – удельные сопротивления петли фаза-нуль и длины каждого из последовательных участков цепи короткого замыкания.

Основное отличие формулы (16) от формулы (14) состоит в том, что в ней сопротивление цепи короткого замыкания определяется как арифметическая сумма полных (Z) сопротивлений отдельных участков цепи, тогда как в формуле (14) это сопротивление определяется через активные (r) и индуктивные (x) составляющие, т, е, путем геометрического сложения.

Сопротивления трансформаторов тока, автоматических выключателей, контактных соединений и электрической дуги в формуле (16) не учитываются, поскольку арифметическое (вместо геометрического) сложение полных сопротивлений отдельных участков линии, как правило, приводит к некоторому увеличению общего сопротивления цепи короткого замыкания и как бы компенсирует неучет сопротивлений вышеуказанных элементов.

Значения полного сопротивления трансформатора току однофазного КЗ, которые приводятся в справочной литературе, учитывают только сопротивления прямой и нулевой последовательности трансформатора (см. формулу 11). Но если от расчета требуется повышен-

ная точность, в полном сопротивлении трансформатора нужно учитывать и индуктивное сопротивление системы, к которой он подключен. Для этого индуктивное сопротивление системы (x_c) нужно включить дополнительным слагаемым в формулу (3). При этом формулы (3) и (11) примут соответственно вид:

$$X_{1\Sigma} = x_c + x_{1т} + x_{1л} + x_{тт} + x_a, \qquad (18)$$

$$r_1^{(1)} = 2r_{1т} + r_{От}, \qquad x_т^{(1)} = 2x_c + 2x_{1т} + x_{От},$$

$$Z_т^{(1)} = \sqrt{(2r_{1т} + r_{От})^2 + (2x_c + 2x_{1т} + x_{От})^2}. \qquad (19)$$

где x_c – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения, мОм.

$$x_c = \frac{U_л^2}{1000S_к}, \qquad (20)$$

где $U_л$ – см. в формуле (1);

$S_к$ – мощность короткого замыкания (трехфазного) у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

При определении минимальных значений ТКЗ для проверки чувствительности защиты рекомендуется учитывать увеличение активного сопротивления проводников в результате нагревания их током короткого замыкания. Для этого сопротивления проводников сечением до 16 мм^2 (включительно) рекомендуется приводить к температуре 145°С, сопротивления проводников сечением 25–95 мм^2 – к температуре 120°С, сопротивления проводников сечением 120–240 мм^2 – к температуре 95°С. Такие (ориентировочные) значения температуры проводников в конце КЗ получены в результате расчетов с учетом реальных время-токовых характеристик аппаратов защиты и при условии адиабатического процесса нагрева жил проводников. Государственным стандартом ГОСТ 28249-89 допускается принимать для всех сечений значение температурного коэффициента электрического сопротивления равным 1,5, что соответствует температуре 145°С. Но проводники крупных сечений до такой температуры за время КЗ

практически не нагреваются.

Температурный коэффициент для приведения сопротивления проводника при 20°С к сопротивлению при конечной температуре вычисляется по формуле

$$K_т = 1 + 0{,}004(\theta_{кон} - 20), \qquad (21)$$

где $\theta_{кон}$ – температура жилы проводника в конце КЗ, °С.

Сопротивление проводника при конечной температуре

$$r_{кон} = r_{20}K_т, \qquad (22)$$

где r_{20} – сопротивление проводника при температуре 20°С.

3. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

В таблицах 1–28 приводятся данные из технической литературы, которые могут использоваться в качестве исходных данных при расчете токов однофазных коротких замыканий.

В таблицах не всегда можно найти данные, которые точно соответствовали бы условиям конкретной задачи. В этих случаях приходится использовать данные таблиц для сходных условий, что снижает точность расчетов. Поэтому нормативные требования по кратности ТКЗ должны обеспечиваться проектировщиком с достаточным запасом.

Во взрывоопасных зонах использование металлических конструкций, стальных труб, металлических оболочек кабелей и т. п. в качестве нулевых защитных проводников допускается только как дополнительное мероприятие (см. п. 7.3.138 ПУЭ). Поэтому при расчете токов однофазных КЗ проводимость этих элементов не учитывается. В качестве нулевых защитных проводников в силовых сетях во взрывоопасных зонах должны использоваться только специально предназначенные для этой цели отдельные жилы кабеля или провода (см. пп. 7.3.134, 7.3.135 ПУЭ). Указанные ограничения упрощают расчет токов однофазных КЗ и гарантируют обеспечение расчетной кратности.

Таблица 1. Сопротивления понижающих трансформаторов с вторичным напряжением 0,4 кВ, мОм

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения	Значение сопротивлений				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		току однофазного КЗ
		$r_{1т}$	$x_{1т}$	$r_{0т}$	$x_{0т}$	$Z_т^{(1)}$
Масляные трансформаторы						
25	$Y/Y_н$	154	244	1650	1930	3110
	$Y/Z_н$	177	243	73	35,4	906
40	$Y/Y_н$	88	157	952	1269	1944
	$Y/Z_н$	100	159	44	13,4	562
63	$Y/Y_н$	52	102	504	873	1237
	$Y/Z_н$	59	105	28	12	360
100	$Y/Y_н$	31,5	65	254	582	779
	$Y/Z_н$	36,3	65,7	15,6	10,6	226
160	$Y/Y_н$	16,6	41,7	151	367	486
	$Д/Y_н$	16,6	41,7	16,6	41,7	135
250	$Y/Y_н$	9,4	27,2	96,5	235	311
	$Д/Y_н$	9,4	27,2	9,4	27,2	86,3
400	$Y/Y_н$	5,5	17,1	55,6	149	195
	$Д/Y_н$	5,9	17	5,9	17	54

Продолжение табл. 1

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения	Значение сопротивлений				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		току однофазного КЗ
		$r_{1т}$	$x_{1т}$	$r_{0т}$	$x_{0т}$	$Z_т^{(1)}$
630	Y/Y$_н$	3,1	13,6	30,2	95,8	128
	Д/Y$_н$	3,4	13,5	3,4	13,5	42
1000	Y/Y$_н$	1,7	8,6	19,6	60,6	81
	Д/Y$_н$	1,9	8,6	1,9	8,6	26,4
1600	Y/Y$_н$	1	5,4	16,3	50	63,5
	Д/Y$_н$	1,1	5,4	1,1	5,4	16,5
2500	Д/Y$_н$	0,64	3,46	0,64	3,46	10,56
Сухие трансформаторы						
160	Д/Y$_н$	16,9	52,4	16,9	52,4	165
180	Y/Y$_н$	14,8	46,6	134	326	450
250	Д/Y$_н$	9,7	33,8	9,7	33,8	105
320	Y/Y$_н$	7,7	26,4	69,4	186	253
400	Д/Y$_н$	5,4	21,3	5,4	21,3	66
560	Y/Y$_н$	3,8	15,3	34	108	145
630	Д/Y$_н$	2,9	13,7	2,9	13,7	42
750	Y/Y$_н$	2,5	11,4	25,4	80,7	108

Продолжение табл. 1

Номинальная мощность, кВ·А	Схема соединения	Значение сопротивлений				
		прямой последовательности		нулевой последовательности		току однофазного КЗ
		$r_{1т}$	$x_{1т}$	$r_{0т}$	$x_{0т}$	$Z_т^{(1)}$
1000	$Д/Y_н$	1,8	8,6	1,8	8,6	26
1000	$Y/Y_н$	2,1	8,6	19,1	60,6	81
1600	$Д/Y_н$	1	5,5	1	5,5	17

Примечания: 1. Для трансформаторов со вторичным напряжением 0,23 кВ значения сопротивлений следует уменьшить в 3 раза, а для трансформаторов со вторичным напряжением 0,69 кВ – увеличить в 3 раза.

2. Таблица выполнена по табл. 2.50 из [3], табл. 10.6-1 из [4] и табл. 1 из [5]. Из последней таблицы взяты четыре значения $Z_т^{(1)}$ для масляных трансформаторов мощностью 25, 40, 63 и 100 кВ·А при схеме соединения $Y/Z_н$. Значение сопротивлений прямой и нулевой последовательности для этих трансформаторов взяты из табл. 2.50. Значения $Z_т^{(1)}$ в табл. 2.50 для схемы соединения $Y/Z_н$ не приводятся.

Таблица 2. Сопротивление понижающих трансформаторов с негорючим заполнением по ГОСТ 16555-75 с первичным напряжением 6-10 кВ при вторичном напряжении 0,4 кВ, мОм

Номинальная мощность, кВ·А	250	400	630	1000	1600	2500
Сопротивление току однофазного КЗ $Z_т^{(1)}$	84	54	42	26,4	18	11,4

Примечание. Таблица выполнена по табл. 3 из [6].

Таблица 3. Сопротивления комплектных шинопроводов, мОм/м

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Сопротивление фазы		Сопротивление нулевого проводника		Сопротивление петли фаза-нуль
		r_1	x_1	$r_{нп}$	$x_{нп}$	$Z_{пу}$
ШМА68П	4000	0,013	0,015	0,07	0,045	0,102
	2500	0,02	0,02	0,07	0,045	0,111
ШМА4	3200	0,01	0,005	0,064	0,035	0,084
	2500	0,017	0,008	-	-	0,082
	1600	0,03	0,014	0,037	0,042	0,087
	1250	0,034	0,016	0,054	0,053	0,112
ШМА73	1600	0,031	0,022	0,095	0,076	0,16
ШЗМ16	1600	0,014	0,006	-	-	0,07

Продолжение табл. 3

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Сопротивление фазы		Сопротивление нулевого проводника		Сопротивление петли фаза-нуль
		r_1	x_1	$r_{нп}$	$x_{нп}$	$Z_{пу}$
ШРА73	630	0,1	0,13	0,162	0,164	0,394
	400	0,15	0,17	0,162	0,164	0,457
	250	0,21	0,21	0,21	0,21	0,6
ШРА4	630	0,1	0,13	–	–	–
	400	0,15	0,17	–	–	–
	250	0,21	0,21	–	–	–

Примечание. Таблица выполнена по табл. 3 из [2] и табл. 2.52 из [3].

Таблица 4. Сопротивления троллейных шинопроводов, мОм/м

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Сопротивление фазы	
		r_1	x_1
ШТМ72	400	0,197	0,12
ШТМ73	250	0,315	0,18
ШТА75	400	0,217	0,15
	250	0,474	0,15

Примечание. Таблица выполнена по табл. 2.51 из [3].

Таблица 5. Активное сопротивление (r) плоских шин переменному току при температуре 20°С, мОм/м

Размер, мм	Алюминий	Медь	Размер, мм	Алюминий	Медь
25x3	0,404	0,254	80x6	0,0746	0,049
30x4	0,26	0,169	80x8	0,0575	0,0381
40x4	0,204	0,133	80x10	0,0478	0,0312
40x5	0,167	0,108	100x6	0,0612	0,0397
50x5	0,135	0,088	100x8	0,0472	0,031
50x6	0,115	0,0754	100x10	0,0385	0,0252
60x6	0,098	0,065	120x8	0,0397	0,0262
60x8	0,0746	0,049	120x10	0,032	0,0211

Примечание. Таблица выполнена по табл. 18 из [6].

Для определения индуктивного сопротивления цепи "фазная шина – нулевая шина" открытых четырехпроводных шинопроводов в работе [6] приводится формула

$$x_{ф-н} = 0{,}29\lg \frac{d}{0{,}2235(b + h)}, \qquad (24)$$

где $x_{ф-н}$ – индуктивное сопротивление цепи "фазная шина – нулевая шина", мОм/м;

d – расстояние между шинами, мм;

b и h – размеры сторон прямоугольного сечения шины, мм.

Таблица 6. Сопротивления проводов и кабелей при температуре жилы 20°С, мОм/м

Сечение, мм^2	Активное сопротивление жилы (r)		Индуктивное сопротивление (x)	
	алюминиевой	медной	кабеля с поясной бумажной изоляцией	трех проводов в трубе, кабеля с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией
1	–	18,5	–	0,133
1,5	–	12,3	–	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,265	0,0612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,078
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Примечание. Таблица выполнена по табл. 2.53 из [3].

Таблица 7. Сопротивления первичных обмоток катушечных трансформаторов тока, мОм

Коэффициент трансформации	Класс точности			
	1		2	
	$r_{тт}$	$x_{тт}$	$r_{тт}$	$x_{тт}$
20/5	42	67	19	17
30/5	20	30	8,2	8
40/5	11	17	4,8	4,2
50/5	7	11	3	2,8
75/5	3	4,8	1,3	1,2
100/5	1,7	2,7	0,75	0,7
150/5	0,75	1,2	0,33	0,3
200/5	0,42	0,67	0,19	0,17
300/5	0,2	0,3	0,09	0,08
400/5	0,11	0,17	0,05	0,04
500/5	0,05	0,07	0,02	0,02

Примечание. Таблица выполнена по табл. 2.49 из [3].

Таблица 8. Сопротивления автоматических выключателей, мОм

Номинальный ток расцепителя, А	r_a	x_a	Номинальный ток расцепителя, А	r_a	x_a
50	7	4,5	600	0,41	0,13
70	3,5	2	1000	0,25	0,1
100	2,15	1,2	1600	0,14	0,08
140	1,3	0,7	2500	0,13	0,07
200	1,1	0,5	4000	0,1	0,05
400	0,65	0,17			

Примечания: 1. Сопротивления включают в себя сопротивления токовых катушек и переходное сопротивление подвижных контактов.

2. См. также табл. 9

3. Таблица выполнена по табл. 2.54 из [3].

Таблица 9. Сопротивление (r_a) автоматических выключателей АП50Б с расцепителями до 16 А, мОм

Номинальный ток расцепителя, А	1,6	2,5	4	6,3	10	16
Тепловой расцепитель	450	240	92	16,3	13,3	6,5
Электромагнитный расцепитель 10-кратный	210	87	35	15,8	7,7	2,8
Электромагнитный расцепитель 3,5-кратный	540	207	86	36	17	6
Тепловой + электромагнитный расцепитель 10-кратный	660	327	127	32,1	21	9,3

Примечания: 1. Точность ±(5-7)% .

2. Таблица выполнена по данным ПО "Курский электроаппарат" (письмо института "Атомэнергопроект" от 31.01.92 N 21051-2/27АП-55).

Таблица 10. Сопротивление раз'емных контактов рубильников и раз'единителей, мОм

Номинальный ток, А	100	200	400	600	1000	2000	3000
r	0,5	0,4	0,2	0,15	0,08	0,03	0,02

Примечание. Таблица выполнена по табл. 2.55 из [3].

Таблица 11. Переходное сопротивление неподвижных контактных соединений, мОм

Вид соединения	r
Кабель (алюминиевый) сечением, мм^2:	
16	0,085
25	0,064
35	0,056
50	0,043
70	0,029
95	0,027
120	0,024
150	0,021
240	0,012
Шинопроводы типа ШРА-73, ШРА-4 на номинальный ток, А:	
250	0,009
400	0,006
630	0,0037

Продолжение табл. 11

Вид соединения	r
Шинопроводы типа ШМА-73, ШМА-4 на номинальный ток, А:	
1600	0,0034
2500	0,0024
3200	0,0012
4000	0,0012

Примечание. Таблица выполнена по табл. 2.56 из [3].

Таблица 12. Активное сопротивление (r) алюминиевой оболочки 3-жильных кабелей, мОм/м

Сечение кабеля	Материал жилы		Сечение кабеля	Материал жилы	
	алюминий	медь		алюминий	медь
3x6	1,045	0,985	3x70	0,41	0,405
3x10	1,038	0,876	3x95	0,321	0,320
3x16	0,775	0,748	3x120	0,286	0,280
3x25	0,691	0,679	3x150	0,268	0,264
3x35	0,616	0,61	3x185	0,241	0,239
3x50	0,498	0,492	3x240	0,215	0,212

Примечание. Таблица выполнена по табл. 12 из [6].

Таблица 13. Активное сопротивление (r) алюминиевой оболочки 4-жильных кабелей, мОм/м

Сечение кабеля	Материал жилы		Сечение кабеля	Материал жилы	
	алюминий	медь		алюминий	медь
3x6+1x4	0,953	0,878	3x70+1x25	0,345	0,338
3x10+1x6	0,833	0,805	3x95+1x35	0,328	0,324
3x16+1x10	0,66	0,623	3x120+1x35	0,301	0,292
3x25+1x16	0,594	0,577	3x150+1x35	0,234	0,268
3x35+1x16	0,486	0,475	3x185+1x50	0,234	0,234
3x50+1x25	0,403	0,393			

Примечание. Таблица выполнена по табл. 13 из [6].

По данным из табл. 12 и 13 выведены эмпирические формулы для определения сопротивления алюминиевой оболочки кабеля для любых сечений в диапазоне от 6 до 240 мм^2 и при любых сочетаниях сечений фазной и нулевой жилы. Эти формулы имеют вид:

$$r_{об} = \frac{K}{\sqrt{S}} \text{ – для 3-жильных кабелей,} \qquad (23)$$

где S – сечение фазной жилы, мм^2;

$$r_{об} = \frac{K}{\sqrt{\sum S}} \text{ – для 4-жильных кабелей,} \qquad (24)$$

где $\sum S$ – сумма сечений трех фазных жил и нулевой, мм^2. Например, для кабеля 3x10+1x6 сумма сечений $\sum S$ = 36 мм^2.

Значения коэффициентов К даны в таблице:

Коэффициент	3-жильные кабели сечением		4-жильные кабели сечением	
	до 16 мм^2	свыше 16 мм^2	до 16 мм^2	свыше 16 мм^2
К	2,95	3,36	4,8	5,5

При определении сопротивления петли "фаза-нуль" с использованием формул (23), (24) для определения сопротивления алюминиевой оболочки кабеля ошибка, по сравнению с расчетом по табличным данным, не превышает 3% .

Формулы (23) и (24) выводились для кабелей с алюминивыми жилами. Но поскольку сопротивления оболочек кабелей с медными жилами и кабелей с алюминиевыми жилами отличаются незначительно, формулами можно пользоваться в обоих случаях.

Индуктивное сопротивление оболочки кабеля невелико и при расчетах ТКЗ может не учитываться.

Таблица 14. \Сопротивления водогазопроводных труб по ГОСТ 3262-75, мОм/м

Условный проход, мм	Площадь сечения, мм^2	Плотность тока, А/мм^2					
		0,5		1		1,5	
		г	х	г	х	г	х
ЦМ15	160	3,41	2,05	2,55	1,53	2,06	1,24
ЦМ20	207	2,67	1,6	2,02	1,21	1,59	0,95
ЦМ25	309	2,02	1,21	1,45	0,87	1,14	0,68
ЦМ32	399	1,58	0,95	1,12	0,67	-	-

Продолжение табл. 14

Условный проход, мм	Площадь сечения, мм^2	Плотность тока, А/мм^2					
		0,5		1		1,5	
		г	х	г	х	г	х
ЦМ40	489	1,32	0,78	0,93	0,56	–	–
ЦМ50	625	1,07	0,64	0,76	0,45	–	–
ЦМ70	845	0,84	0,5	0,59	0,35	–	–
ЦМ80	1120	0,67	0,4	0,48	0,29	–	–

Примечания: 1. В таблице даны значения внутреннего индуктивного сопротивления труб. Внешнее индуктивное сопротивление труб при прокладке в них проводников невелико и при расчетах ТКЗ его можно не учитывать.

2. Таблица выполнена по табл. 25 из [6].

Таблица 15. Сопротивления стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-76, мОм/м

Размер, мм	Площадь сечения, мм^2	Плотность тока, А/мм^2							
		1		1,5		2		3	
		г	х	г	х	г	х	г	х
20х1,6	92,5	3,38	2,03	2,84	1,71	2,42	1,45	2,14	1,29
26х1,8	136,8	2,47	1,48	2,05	1,23	1,73	1,04	1,64	0,98
32х2	188,4	1,99	1,19	1,65	0,99	1,4	0,84	–	–
47х2	282,6	1,3	0,78	1,05	0,63	0,95	0,57	–	–
59х2	358	1,02	0,62	0,83	0,5	0,75	0,45	–	–

Примечания: 1. См. примечание 1 к табл. 14.

2. Таблица выполнена по табл. 26 из [6].

Таблица 16. Сопротивления стальных полос, мОм/м

Размер, мм	Площадь сечения, мм^2	Плотность тока, А/мм^2							
		0,5		1		1,5		2	
		г	х	г	х	г	х	г	х
20x4	80	5,24	3,14	4,2	2,52	3,48	2,09	2,97	1,78
30x4	120	3,66	2,2	2,91	1,75	2,38	1,43	2,04	1,22
30x5	150	3,38	2,03	2,56	1,54	2,08	1,25	–	–
40x3	120	3,05	1,83	2,54	1,52	2,12	1,27	1,81	1,08
40x4	160	2,8	1,68	2,24	1,34	1,81	1,09	1,54	0,92
50x4	200	2,28	1,37	1,79	1,07	1,45	0,87	1,24	0,74
50x5	250	2,1	1,26	1,6	0,96	1,28	0,77	–	–
60x4	240	1,91	1,15	1,5	0,9	1,22	0,73	1,04	0,62
60x5	300	1,77	1,06	1,34	0,8	1,08	0,65	–	–
80x5	400	1,34	0,81	1,04	0,62	0,82	0,49	–	–
80x6	480	1,26	0,76	0,91	0,55	0,75	0,45	–	–
100x6	600	1,02	0,61	0,73	0,44	0,6	0,36	–	–
100x8	800	0,9	0,54	0,62	0,37	–	–	–	–

Примечания: 1. См. текст после табл. 18.

2. Таблица выполнена по табл. 28 из [6].

Таблица 17. Сопротивления круглых стальных проводников, мОм/м

Диаметр, мм	Площадь сечения, мм^2	Плотность тока, А/мм^2							
		0,5		1		1,5		2	
		r	x	r	x	r	x	r	x
5	20	17	10,2	14,4	8,65	12,4	7,45	10,7	6,4
6	28	13,7	8,2	11,2	6,7	9,4	5,65	8	4,8
8	50	9,6	5,75	7,5	4,5	6,4	3,84	5,3	3,2
10	79	7,2	4,32	5,4	3,24	4,2	2,52	–	–
12	113	5,6	3,36	4	2,4	–	–	–	–
14	154	4,55	2,73	3,2	1,92	–	–	–	–
16	201	3,72	2,23	2,7	1,6	–	–	–	–
18	255	3,18	1,91	–	–	–	–	–	–
20	314	2,68	1,61	–	–	–	–	–	–

Примечания: 1. См. текст после табл. 18.

2. Таблица выполнена по табл. 29 из [6].

Таблица 18. Сопротивления профильной стали, мОм/м

Размер, мм	Значение тока, А									
	100		200		400		600		800	
	r	x	r	x	r	x	r	x	r	x
Угловая										
40x40x4	1,6	1,04	1,5	0,92	1,12	0,7	0,92	0,59	–	–
45x45x4	1,46	0,86	1,32	0,78	1	0,56	0,86	0,47	–	–
50x50x5	1,42	0,68	1,27	0,68	0,98	0,54	0,78	0,44	–	–
63x63x5	0,68	0,38	0,92	0,56	0,8	0,46	0,66	0,36	0,58	0,32
Двутавровая										
N 12	0,34	0,16	0,57	0,32	0,53	0,28	0,44	0,24	0,37	0,22
N 18	0,21	0,09	0,35	0,18	0,45	0,29	0,33	0,24	0,31	0,2

Примечание. 1. Таблица выполнена по табл. 30 из [6].

В табл. 16, 17, 18 даны значения внутреннего индуктивного сопротивления стального проката. Для учета внешнего индуктивного сопротивления петли "фаза-нуль", когда зануляющие стальные проводники проложены параллельно фазному, его значение можно определять по табл. 19 или по формуле для параллельно проложенных круглых проводников одинакового сечения:

$$x = 0{,}29\lg\frac{d}{r}, \qquad (25)$$

где x – внешнее индуктивное сопротивление петли "фаза-нуль", мОм/м;

d – расстояние между проводниками, мм;

r – радиус проводников, мм.

Если проводники имеют разные сечения, то в формулу (25) следует подставлять радиус проводника меньшего сечения.

При плоском нулевом проводнике сопротивление определяется по радиусу фазного проводника.

Таблица 19. Внешнее индуктивное сопротивление (x) параллельно проложенных проводников, мОм/м

Расстояние между проводниками, м	Сечение круглого проводника, мм^2									
	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
0,2	0,65	0,63	0,58	0,55	0,52	0,49	0,47	0,45	0,43	0,41
0,4	0,77	0,72	0,66	0,63	0,6	0,58	0,55	0,53	0,51	0,5
0,6	0,81	0,77	0,7	0,68	0,65	0,63	0,6	0,58	0,56	0,55
0,8	0,85	0,8	0,75	0,72	0,69	0,67	0,64	0,62	0,6	0,59
1	0,87	0,83	0,78	0,75	0,72	0,69	0,67	0,65	0,63	0,62
1,2	0,89	0,85	0,8	0,77	0,75	0,72	0,69	0,67	0,65	0,64
1,4	0,92	0,87	0,82	0,79	0,77	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66
1,6	0,93	0,89	0,83	0,81	0,79	0,75	0,73	0,71	0,69	0,68
1,8	0,95	0,91	0,85	0,82	0,8	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69
2	0,97	0,92	0,86	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,72	0,7
2,2	0,98	0,93	0,88	0,84	0,82	0,79	0,77	0,75	0,74	0,71
2,4	0,98	0,95	0,89	0,85	0,83	0,8	0,78	0,76	0,75	0,72
2,6	0,99	0,95	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79	0,77	0,76	0,73
2,8	0,99	0,96	0,9	0,87	0,85	0,82	0,8	0,78	0,76	0,74
3	1	0,97	0,91	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,75
10	1,16	1,12	1,06	1,03	1,05	0,98	0,95	0,94	0,92	0,9
20	1,24	1,21	1,15	1,12	1,1	1,06	1,05	1,02	1,01	1

Продолжение табл. 19

Примечания: 1. Если круглые проводники имеют разное сечение, внешнее индуктивное сопротивление определяется по меньшему сечению.

2. При плоском нулевом проводнике сопротивление определяется по сечению фазного проводника.

3. Таблица выполнена по рис. 1 и табл. 9 из [6].

Таблица 20. Полное сопротивление цепи фазная жила кабеля с алюминиевыми жилами - стальная полоса при расстоянии между кабелем и полосой 0,8 м, мОм/м

Размер полосы, мм	25x3			40x4				60x4				80x4		
Ток однофазного КЗ, А	100	200, 300	1500	100	200	300, 400	2500	100	200	300	600, 3000	200	400	600, 3000
Сечение кабеля, мм**2	Zпу													
3x6	11,2	10,2	-	9,57	8,8	8,37	-	8,8	8,37	8,06	-	9,08	7,69	-
3x10	8,77	7,7	6,85	7,08	6,29	5,85	-	6,29	5,84	5,53	5,13	5,64	5,16	-
3x16	-	6,34	5,48	5,72	4,92	4,47	4,02	4,91	4,46	4,14	3,73	4,18	3,74	3,5
3x25	-	-	4,69	4,93	4,12	3,66	3,21	4,11	3,65	3,33	2,91	3,36	2,93	2,68
3x35	-	-	-	-	3,73	3,27	2,81	3,71	3,26	2,93	2,51	2,96	2,53	2,28
3x50	-	-	-	-	-	-	2,52	-	-	2,64	2,23	2,67	2,24	1,99
3x70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,04	-	2,05	1,8
3x95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,68
3x120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6
3x150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,56
3x185	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,52

Примечания: 1. Для сечений 16 - 185 мм**2 прочерками в таблице отмечены сочетания стальных полос и кабелей, при которых проводимость стальной полосы составляет менее 50% проводимости фазной жилы.

2. Таблица выполнена по табл. 17 из [5].

М788-1080

Таблица 21. Полное сопротивление цепи фазная жила кабеля с алюминиевыми жилами - угловая сталь при расстоянии между кабелем и уголком 0,8 м, мОм/м

Размер угловой стали, мм	40x40x4				50x50x5				75x75x8			100x100x8 100x100x10		
Ток однофазного КЗ, А	100	300	500	1000, 2500	100	500	700	1000, 2500	100	500	1000, 2500	200	500	1000, 2500
Сечение кабеля, мм**2	Zпу													
3x6	8,36	7,99	-	-	8,15	7,5	-	-	7,65	7,31	-	7,31	7,14	-
3x10	5,84	5,46	5,12	-	5,62	4,95	-	-	5,1	4,76	-	4,76	4,58	-
3x16	4,46	4,06	3,72	-	4,23	3,55	-	-	3,7	3,36	-	3,34	3,16	-
3x25	3,65	3,25	2,9	2,65	3,42	2,73	2,61	-	2,88	2,52	2,32	2,52	2,33	2,15
3x35	3,25	2,86	2,5	2,25	3,02	2,33	2,21	2,13	2,48	2,12	1,91	2,11	1,93	1,74
3x50	-	2,57	2,21	1,96	-	2,04	1,92	1,84	2,18	1,83	1,62	1,82	1,63	1,45
3x70	-	-	2,03	1,77	-	1,85	1,73	1,66	-	1,64	1,43	1,63	1,45	1,26
3x95	-	-	-	1,66	-	-	1,61	1,54	1,85	1,52	1,32	1,51	1,33	1,15
3x120	-	-	-	-	-	-	-	1,47	1,8	1,45	1,25	1,44	1,26	1,08
3x150	-	-	-	-	-	-	-	-	1,75	1,4	1,2	1,39	1,21	1,03
3x185	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,16	1,35	1,17	0,99
3x240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,12	1,31	1,13	0,95

Примечания: 1. Для сечений 50 - 240 мм**2 прочерками в таблице отмечены сочетания угловой стали и кабелей, при которых проводимость угловой стали составляет менее 50% проводимости фазной жилы.

2. Таблица выполнена по табл. 16 из [5].

М788-1080

Таблица 22. Активное сопротивление (r) неизолированных алюминиевых, медных и сталеалюминиевых проводов при 20°С, мОм/м

Сечение, мм^2	Алюминиевые (А)	Медные (М)	Сталеалюминиевые (АС)	Сечение, мм^2	Алюминиевые (А)	Медные (М)	Сталеалюминиевые (АС)
4	–	4,52	–	50	0,576	0,361	0,593
6	–	3,03	–	70	0,412	0,267	0,42
10	–	1,79	2,69	95	0,308	0,191	0,314
16	1,8	1,13	1,77	120	0,246	0,154	0,249
25	1,14	0,72	1,15	150	0,194	0,122	0,195
35	0,83	0,515	0,773	185	0,157	0,099	0,159

Примечание. Таблица выполнена по табл. 5 из [7].

Таблица 23. Полное сопротивление цепи фазный провод – нулевой провод воздушной линии со стальными однопроволочными проводами, мОм/м

Фазный провод	ПСО-4				ПСО-5	
Нулевой провод	ПСО-4		ПСО-5		ПСО-5	
Расстояние между фазным и нулевым проводами, м	0,4	1	0,4	1	0,4	1
Ток однофазного КЗ, А	$Z_{пу}$					
30	40,86	40,98	38,13	38,25	35,42	35,54
40	38,17	38,29	35,71	35,83	33,26	33,38
50	37,03	37,15	34,18	34,3	31,34	31,46
100	36,3	36,42	32,24	32,36	28,02	28,14
150	36,06	36,18	31,61	31,73	27,64	27,76
200	35,94	36,06	31,26	31,38	26,56	26,68
300	–	–	30,78	30,9	25,61	25,73

Примечание. Таблица выполнена по табл. 5 из [5].

Таблица 24. Полное сопротивление цепи фазный провод - нулевой провод воздушной линии со стальными многопроволочными проводами, мОм/м

Фазный провод	ПС-25 ПМС-25	ПС-35 ПМС-35		ПС-50 ПМС-50			ПС-70 ПМС-70			ПС-95 ПМС-95	
Нулевой провод	ПС-25 ПМС25	ПС-25 ПМС-25	ПС-35 ПМС-35	ПС-25 ПМС-25	ПС-35 ПМС-35	ПС-50 ПМС-50	ПС-35 ПМС-35	ПС-50 ПМС-50	ПС-70 ПМС-70	ПС-50 ПМС-50	ПС-70 ПМС-70
Ток однофазного КЗ, А	Zпу										
60	17,38	15,82	14,25	-	-	-	-	-	-	-	-
90	16,52	14,96	13,41	13,08	11,53	9,64	-	-	-	-	-
120	15,75	14,22	12,69	12,57	11,04	9,41	9,46	7,85	6,27	7,13	5,54
150	15,15	13,68	12,21	12,13	10,66	9,1	9,23	7,69	6,29	6,97	5,56
200	13,28	11,98	11,65	10,82	9,52	8,4	8,23	7,1	5,82	6,63	5,34
300	12,02	10,83	9,64	9,78	8,6	7,55	7,51	6,47	5,41	6,04	4,97
400	-	10,47	9,33	9,36	8,34	7,11	7,13	6,03	4,98	5,68	4,62
600	-	-	-	-	-	-	6,89	5,64	4,49	5,34	4,18

Примечания: 1. Значения сопротивлений даны для расстояния между фазным и нулевым проводниками 0,4 м. При расстоянии 1 м значения сопротивлений, указанные в таблице, должны быть увеличены на 0,03.

2. Таблица выполнена по табл. 6 из [5].

Таблица 25. Сопротивления нулевой последовательности комплектных шинопроводов, мОм/м

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	r_0	x_0	Тип шинопровода	Номинальный ток, А	r_0	x_0
ШМА68П	4000	0,23	0,15	ШМА73	1600	0,29	0,25
	2500	0,23	0,16				
				ШРА73	630	0,59	0,62
ШМА4	3200	0,2	0,12		400	0,64	0,67
	1600	0,14	0,13		250	0,84	0,84
	1250	0,19	0,18				

Примечание. Таблица выполнена по табл. 10.6-2 из [4].

Таблица 26. Сопротивления нулевой последовательности трехжильных алюминиевых кабелей, мОм/м

Сечение, мм^2	В непроводящей оболочке		В алюминиевой оболочке	
	r_0	x_0	r_0	x_0
3x4	11,7	2,31	10,95	0,579
3x6	8,51	2,27	7,69	0,523
3x10	5,94	2,24	5,04	0,461
3x16	4,5	2,2	3,52	0,406
3x25	3,64	2,17	2,63	0,359
3x35	3,3	2,14	2,07	0,298
3x50	2,87	2,08	1,64	0,257
3x70	2,65	2,07	1,31	0,211

Продолжение табл. 26

Сечение, мм^2	В непроводящей оболочке		В алюминиевой оболочке	
	r_0	x_0	r_0	x_0
3x95	2,5	2,05	1,06	0,174
3x120	2,42	2,03	0,92	0,157
3x150	2,36	2	0,78	0,135
3x185	–	–	0,66	0,122
3x240	–	–	0,553	0,107

Примечания: 1. Значения сопротивлений соответствуют температуре жилы 75°С.

2. Таблица выполнена по табл. 10.6-5 и 10.6-3 из [4].

Таблица 27. Сопротивления нулевой последовательности четырехжильных алюминиевых кабелей, мОм/м

Сечение, мм^2	В непроводящей оболочке		В алюминиевой оболочке	
	r_0	x_0	r_0	x_0
3x4+1x2,5	11,71	2,11	10,87	0,57
3x6+1x4	8,71	1,97	7,6	0,468
3x10+1x6	5,9	1,81	4,96	0,401
3x16+1x10	4,39	1,56	3,39	0,336
3x25+1x16	3,42	1,26	2,41	0,256
3x35+1x16	2,97	1,24	1,93	0,232
3x50+1x25	2,45	0,949	1,44	0,179
3x70+1x35	2,04	0,741	1,11	0,145

Продолжение табл. 27

Сечение, мм^2	В непроводящей оболочке		В алюминиевой оболочке	
	r_0	x_0	r_0	x_0
3x95+1x50	1,66	0,559	0,887	0,124
3x120+1x50	1,54	0,545	–	–
3x150+1x70	1,28	0,43	–	–

Примечания: 1. Значения сопротивлений соответствуют температуре жилы 75°С.

2. Таблица выполнена по табл. 10.6-8 и 10.6-6 из [4].

Таблица 28. Активное сопротивление электрической дуги при КЗ за трансформаторами разной мощности, мОм

Мощность трансформатора, кВ·А	250	400	630	1000	1600	2500
Расчетные условия КЗ	$r_д$					
У выводов трансформатора:						
– в разделке кабелей	15	10	7	5	4	3
– в шинопроводе типа ШМА	–	–	–	6	4	3
– то же, ШРА	–	18	15	10	7	5

Продолжение табл. 28

Мощность трансформатора, кВ·А	250	400	630	1000	1600	2500
Расчетные условия КЗ	$r_д$					
В конце шинопровода длиной 100–150 м:						
– типа ШМА	–	–	–	6–8	5–7	4–6
– типа ШРА	–	30–45	25–45	20–40	15–30	20–40
В кабелях:						
– длиной более 100 м сечением 25–240 мм^2	–	45–16	45–15	45–12	45–11	40–10

Примечания: 1. Сопротивление дуги увеличивается с увеличением длины линии и уменьшением сечения кабеля.

2. Таблица выполнена по табл. 2 из [2].

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

4.1. Расчет по методу симметричных составляющих.

Для определения тока однофазного КЗ методом симметричных составляющих нужно знать значения сопротивлений прямой и нулевой последовтельности цепи короткого замыкания (см. формулу 1).

В сопротивления прямой последовательности входят сопротивления прямой последовательности трансформатора, сопротивления прямой последовательности линии (сопротивления фазного проводника) и дополнительные сопротивления в фазной цепи, к которым относятся сопротивления трансформаторов тока, автоматических выключателей, неподвижных контактных соединений и сопротивление электрической дуги (см. формулы 2 и 3). Кроме того, в сопротивлениях прямой последовательности может учитываться сопротивление системы (см. формулы 18 и 20).

В сопротивления нулевой последовательности входят сопротивления нулевой последовательности трансформатора, сопротивления нулевой последовательности линии (сопротивления фазного проводника плюс эквивалентное сопротивление цепи зануления току нулевой последовательности) и те же дополнительные сопротивления в фазной цепи, которые входят в сопротивление прямой последовательности (см. формулы 4 и 5).

Рассмотрим схему электрической сети, изображенную на рис. 1, и определим токи однофазного короткого замыкания в точках К1 и К2. Исходные данные и промежуточные результаты расчета будем сводить в рабочую таблицу.

Параметры системы заданы значением мощности короткого замыкания на стороне 10 кВ: $S_к$ = 250 МВ·А.

Определим индуктивное сопротивление системы, приведенное к напряжению 0,4 кВ (см. формулу 20), и внесем этот промежуточный результат в рабочую таблицу в строку индуктивных сопротивлений прямой последовательности $X_{1\Sigma}$.

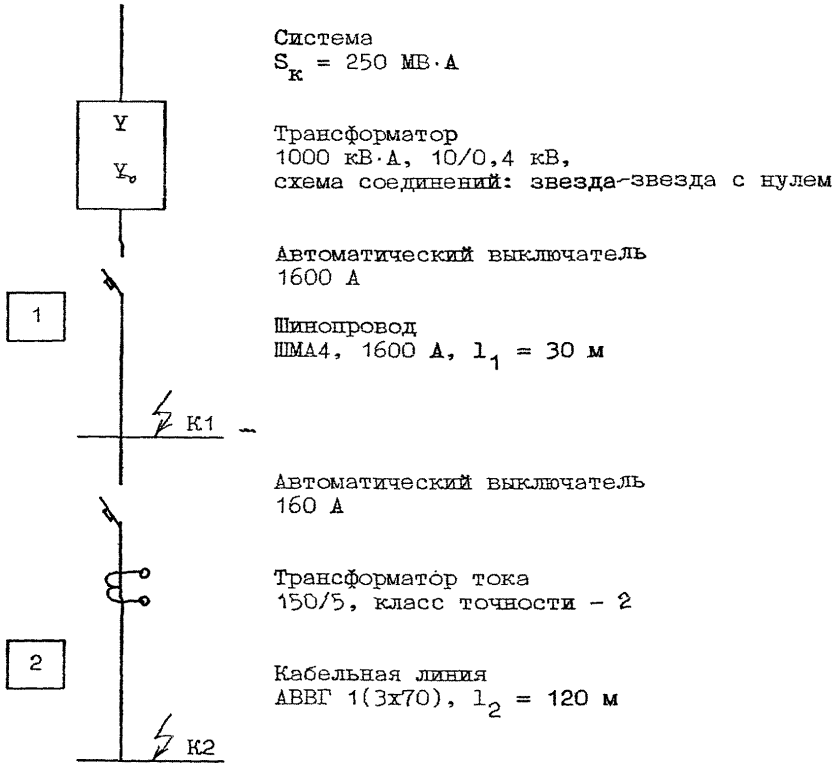


Рис. 1. Схема электрической сети к примеру 4.1.

Рабочая таблица к примеру 4.1

Участок	Последовательность	Сопротивления, мОм							Сумма сопротивлений по участкам	
		– / –	$r_{1т}$ / $r_{0т}$	$r_{1л}$ / $r_{0л}$	$r_{тт}$ / $r_{тт}$	$r_а$ / $r_а$	$r_к$ / $r_к$	$r_д$ / $r_д$		
		$x_с$ / –	$x_{1т}$ / $x_{0т}$	$x_{1л}$ / $x_{0л}$	$x_{тт}$ / $x_{тт}$	$x_а$ / $x_а$	– / –	– / –	отдельным	всем
1	$R_{1\Sigma}$ / $R_{0\Sigma}$	– / –	1,7 / 19,6	0,9 / 4,2		0,14 / 0,14	0,014 / 0,014	6 / 6	8,75 / 29,9	8,75 / 29,9
	$X_{1\Sigma}$ / $X_{0\Sigma}$	0,64 / –	8,6 / 60,6	0,42 / 3,9		0,08 / 0,08	– / –	– / –	9,74 / 64,6	9,74 / 64,6
2	$R_{1\Sigma}$ / $R_{0\Sigma}$	– / –		75,1 / 318	0,33 / 0,33	1,3 / 1,3	0,116 / 0,116	20 / 20	96,85 / 339,7	99,6 / 363,6
	$X_{1\Sigma}$ / $X_{0\Sigma}$			9,84 / 248,4	0,3 / 0,3	0,7 / 0,7	– / –	– / –	10,84 / 249,4	20,58 / 314

$$X_с = \frac{400^2}{1000 \cdot 250} = 0{,}64 \text{ мОм.}$$

Внесем в рабочую таблицу и другие данные, используя для этого таблицы раздела 3 и делая необходимые промежуточные расчеты.

Сопротивления прямой и нулевой последовательности трансформатора (см. табл. 1):

$r_{1т}$ = 1,7 мОм, $x_{1т}$ = 8,6 мОм,

$r_{0т}$ = 19,6 мОм, $x_{0т}$ = 60,6 мОм.

Сопротивления автоматического выключателя 1600 А (см. табл. 8):

$r_а$ = 0,14 мОм, $x_а$ = 0,08 мОм.

Эти сопротивления вносятся в рабочую таблицу в строки прямой и нулевой последовательности.

Сопротивления прямой и нулевой последовательности комплектного шинопровода ШМА4, 1600 А (см. табл. 3 и 25):

r_1 = 0,03 мОм/м, x_1 = 0,014 мОм/м,

r_0 = 0,14 мОм/м, x_0 = 0,13 мОм/м.

Сопротивления линии длиной 30 м, выполненной этим шинопроводом:

$r_{1л}$ = 0,03·30 = 0,9 мОм, $x_{1л}$ = 0,014·30 = 0,42 мОм,

$r_{0л}$ = 0,14·30 = 4,2 мОм, $x_{0л}$ = 0,13·30 = 3,9 мОм.

Учтем переходное сопротивление четырех неподвижных контактных соединений на шинопроводе до точки $К_1$ (см. табл. 11):

$r_к$ = 0,0034·4 = 0,014 мОм.

Сопротивление электрической дуги по табл. 28 принимаем равным 6 мОм:

$r_д$ = 6 мОм.

Сопротивления контактных соединений и электрической дуги вносим в рабочую таблицу в строки сопротивлений прямой и нулевой последовательности.

Теперь, пользуясь рабочей таблицей, легко определить суммарные сопротивления прямой и нулевой последовательности для цепи короткого замыкания в точке К1 (см. формулы 2, 18, 4, 5).

$R_{1\Sigma} = 1,7 + 0,9 + 0,14 + 0,014 + 6 = 8,75$ мОм,
$R_{0\Sigma} = 19,6 + 4,2 + 0,14 + 0,014 + 6 = 29,9$ мОм,
$X_{1\Sigma} = 0,64 + 8,6 + 0,42 + 0,08 = 9,74$ мОм,
$X_{0\Sigma} = 60,6 + 3,9 + 0,08 = 64,6$ мОм.

По формуле (1) определяем ток короткого замыкания в точке К1:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}\, U_л}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{3}\cdot 400}{\sqrt{(2\cdot 8,75 + 29,9)^2 + (2\cdot 9,74 + 64,6)^2}} = 7,178 \text{ кА}.$$

Кратность тока короткого замыкания в точке К1 к номинальному току расцепителя автоматического выключателя с обратнозависимой от тока характеристикой удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_1 = \frac{7178}{1600} = 4,5.$$

Аналогичным образом найдем значения сопротивлений прямой и нулевой последовательности на участке 2 цепи короткого замыкания и определим ток КЗ в точке К2.

Сопротивления автоматического выключателя 160 А (см. табл 8):

$r_a = 1,3$ мОм, $x_a = 0,7$ мОм.

Т. к. в табл. 8 нет расцепителя 160 А, значения сопротивлений приняты для расцепителя 140 А, т. е. для более жестких расчетных условий.

Сопротивления трансформатора тока второго класса точности с коэффициентом трансформации 150/5 (см. табл. 7):

$r_{тт} = 0,33$ мОм, $x_{тт} = 0,3$ мОм.

Сопротивления прямой последовательности кабеля сечением 70 мм^2 при 20 ^{o}С (см. табл. 6):

r_{20} = 0,447 мОм/м, x = 0,082 мОм/м.

Приведем сопротивление кабеля (в соответствии с рекомендациями в разделе 2) к температуре 120°С, пользуясь формулами (21), (22).

r_{120} = 0,447[1 + 0,004(120 − 20)] = 0,447·1,4 = 0,626 мОм/м.

Сопротивления прямой последовательности линии длиной 120 м, выполненной этим кабелем:

$r_{1л}$ = 0,626·120 = 75,1 мОм,

$x_{1л}$ = 0,082·120 = 9,84 мОм.

Значения сопротивлений нулевой последовательности линии определяем по табл. 26:

$r_{0л}$ = 2,65·120 = 318 мОм,

$x_{0л}$ = 2,07·120 = 248,4 мОм.

Учтем сопротивление четырех неподвижных контактных соединений для кабеля 70 мм^2(табл. 11):

$r_к$ = 0,029·4 = 0,116 мОм.

Сопротивление электрической дуги по табл. 28 принимаем равным 20 мОм:

$r_д$ = 20 мОм.

Теперь по рабочей таблице (см. формулы 2, 3, 4, 5) можем определить сопротивления прямой и нулевой последовтельности цепи короткого замыкания на участке 2:

$R_{1\Sigma}$ = 75,1 + 0,33 + 1,3 + 0,116 + 20 = 96,85 мОм;

$R_{0\Sigma}$ = 318 + 0,33 + 1,3 + 0,116 + 20 = 339.7 мОм;

$X_{1\Sigma}$ = 9,84 + 0,3 + 0,7 = 10,84 мОм;

$X_{0\Sigma}$ = 248,4 + 0,3 + 0,7 = 249,4 мОм.

Найдем сумму сопротивлений двух участков цепи КЗ (до точки К2). Причем в сумме сопротивлений двух участков сопротивление электрической дуги должно учитываться только один раз: в конце

последнего участка. Поэтому при сложении из суммы сопротивлений первого участка сопротивление электрической дуги (6 мОм) нужно исключить.

$R_{1\Sigma} = 8,75 - 6 + 96,85 = 99,6$ мОм;
$R_{0\Sigma} = 29,9 - 6 + 339,7 = 363,6$ мОм;
$X_{1\Sigma} = 9,74 + 10,84 = 20,58$ мОм;
$X_{0\Sigma} = 64,6 + 249,4 = 314$ мОм.

Ток короткого замыкания в точке К2 (см. формулу 1):

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}\cdot 400}{\sqrt{(2\cdot 99,6 + 363,6)^2 + (2\cdot 20,58 + 314)^2}} = 1,041 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке К2 удовлетворяет требованиям ПУЭ: $K_2 = 1041/160 = 6,5$.

4.2. Расчет по сопротивлениям r, x петли фаза-нуль

Для определения токов однофазного КЗ по активным и индуктивным сопротивлениям петли фаза-нуль (см. формулу 14) нужно знать значения сопротивлений прямой и нулевой последовательностей трансформатора (см. формулы 11), а также значения сопротивлений фазного проводника ($r_{1л}$, $x_{1л}$), значения эквивалентных сопротивлений цепи зануления ($r_н$, $x_н$) и значения дополнительных сопротивлений в фазной цепи ($r_{тт}$, $x_{тт}$, $r_а$, $x_а$, $r_к$, $r_д$), которые входят в формулы (12).

- При необходимости учитывать индуктивное сопротивление системы вместо формул (11) следует пользоваться формулами (19).

Рассмотрим схему электрической сети, изображенную на рис. 2, и определим токи однофазных КЗ в точках К1 – К6. Исходные данные и промежуточные результаты расчетов будем сводить в рабочую таблицу.

Индуктивное сопротивление системы (см. формулу 20):

$$x_c = \frac{400^2}{1000\cdot 200} = 0,8 \text{ мОм}.$$

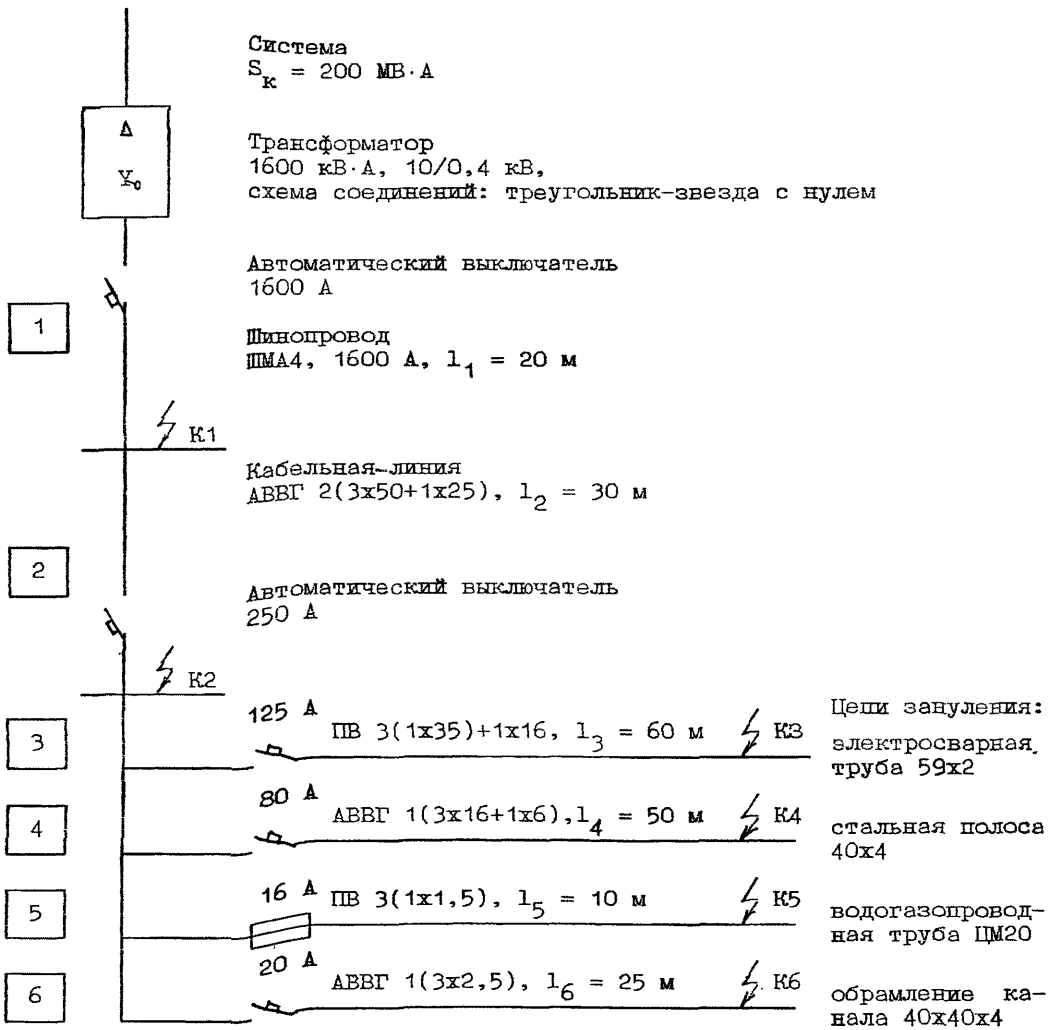


Рис. 2. Схема электрической сети к примеру 4.2.

Сопротивления трансформатора (см. табл. 1):

$r_{1т}$ = 1,1 мОм, $r_{0т}$ = 1,1 мОм,

$x_{1т}$ = 5,4 мОм, $x_{0т}$ = 5,4 мОм.

Сопротивления трансформатора току однофазного КЗ (см. формулы 19):

$r_т^{(1)} = 2 \cdot 1,1 + 1,1 = 3,3$ мОм, $r_т^{(1)}/3 = 1,1$ мОм,

$x_т^{(1)} = 2 \cdot 0,8 + 2 \cdot 5,4 + 5,4 = 17,8$ мОм, $x_т^{(1)}/3 = 5,93$ мОм.

Теперь поочередно определим сопротивления петли фаза-нуль на каждом из участков электрической сети и токи КЗ в конце каждого участка.

Рабочая таблица к примеру 4.2.

Сопротивления, мОм									Ток КЗ, кА
Трансформатор	$\frac{-}{x_c}$		$\frac{r_{1т}}{x_{1т}}$		$\frac{r_{0т}}{x_{0т}}$		$\frac{r_т^{(1)}/3}{x_т^{(1)}/3}$		
	$\frac{-}{0,8}$		$\frac{1,1}{5,4}$		$\frac{1,1}{5,4}$		$\frac{1,1}{5,93}$		
Участки сети	$\frac{r_{1л}}{x_{1л}}$	$\frac{r_н}{x_н}$	$\frac{r_{тт}}{x_{тт}}$	$\frac{r_а}{x_а}$	$\frac{r_к}{-}$	$\frac{r_д}{-}$	$\frac{r_п}{x_п}$	$\frac{\sum r_п}{\sum x_п}$	I_1
1	$\frac{0,6}{0,28}$	$\frac{0,74}{0,84}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{0,14}{0,08}$	$\frac{0,014}{-}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{6,494}{1,2}$	$\frac{6,494}{1,2}$	22,1
2	$\frac{13,12}{1,28}$	$\frac{26,25}{1,36}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{1,1}{0,5}$	$\frac{0,107}{-}$	$\frac{15}{-}$	$\frac{55,58}{3,14}$	$\frac{57,1}{4,34}$	3,89
3	$\frac{44,52}{5,28}$	$\frac{33,32}{13,3}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{2,15}{1,2}$	$\frac{0,338}{-}$	$\frac{20}{-}$	$\frac{100,3}{19,78}$	$\frac{142,4}{24,12}$	1,57
4	$\frac{146,2}{4,75}$	$\frac{74,2}{56,59}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{3,5}{2}$	$\frac{0,255}{-}$	$\frac{25}{-}$	$\frac{249,2}{63,34}$	$\frac{291,3}{67,68}$	0,763
5	$\frac{184,5}{1,26}$	$\frac{15,9}{9,5}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{25}{-}$	$\frac{225,4}{10,76}$	$\frac{267,5}{15,1}$	0,854
6	$\frac{468,8}{2,9}$	$\frac{23}{34}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{9,3}{-}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{25}{-}$	$\frac{526,1}{36,9}$	$\frac{568,2}{41,24}$	0,403
6	$\frac{468,8}{2,9}$	$\frac{37,5}{42,25}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{9,3}{-}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{25}{-}$	$\frac{540,6}{45,15}$	$\frac{582,7}{49,49}$	0,393

Участок 1.

Сопротивления автоматического выключателя (см. табл. 8):

$r_а$ = 0,14 мОм, $x_а$ = 0,08 мОм.

Сопротивления шинопровода (см. табл. 3):

r_1 = 0,03 мОм/м, $r_{нп}$ = 0,037 мОм/м,

x_1 = 0,014 мОм/м, $x_{нп}$ = 0,042 мОм/м.

Сопротивления линии длиной 20 м, выполненой этим шинопроводом:

$r_{1л}$ = 0,03·20 = 0,6 мОм, $r_н$ = 0,037·20 = 0,74 мОм,

$x_{1л}$ = 0,014·20 = 0,28 мОм, $x_н$ = 0,042·20 = 0,84 мОм.

Переходное сопротивление четырех неподвижных контактных соединений на шинопроводе (см. табл. 11):

$r_к$ = 0,0034·4 = 0,014 мОм.

Сопротивление электрической дуги по табл. 28 принимаем равным 5 мОм:

$r_д$ = 5 мОм.

Сопротивления петли фаза-нуль на первом участке (см. рабочую таблицу и формулы 12):

$r_п$ = 0,6 + 0,74 + 0,14 + 0,014 + 5 = 6,494 мОм,

$x_п$ = 0,28 + 0,84 + 0,08 = 1,2 мОм.

Ток однофазного КЗ в конце первого участка в точке К1 (см. формулу 14):

$$I_1 = \frac{U_ф}{\sqrt{(r_т^{(1)}/3 + r_п)^2 + (x_т^{(1)}/3 + x_п)^2}} =$$

$$= \frac{230}{\sqrt{(1,1 + 6,494)^2 + (5,93 + 1,2)^2}} = 22,1 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке К1 удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_1 = \frac{22\ 100}{1600} = 13{,}8.$$

Участок 2.

Сопротивления фазной жилы кабеля сечением 50 мм^2 при 20°С (см. табл. 6):

r_{20} = 0,625 мОм/м, x = 0,085 мОм/м.

Активное сопротивление фазной жилы кабеля, приведенное к температуре 120°С (см. формулы 21, 22):

r_{120} = 0,625[1 + 0,004(120 − 20)] = 0,625·1,4 = 0,875 мОм/м.

Сопротивления фазной цепи линии длиной 30 м с учетом выполнения линии двумя параллельными кабелями:

$$r_{1л} = \frac{0{,}875}{2}\,30 = 13{,}2 \text{ мОм}, \qquad x_{1л} = \frac{0{,}085}{2}\,30 = 1{,}28 \text{ мОм}.$$

Сопротивления нулевой жилы сечением 25 мм^2:

r_{20} = 1,25 мОм/м, x = 0,091 мОм/м,

r_{120} = 1,25·1,4 = 1,75 мОм/м.

Сопротивления нулевой цепи с учетом длины линии и двух параллельных кабелей:

$$r_н = \frac{1{,}75}{2}\,30 = 26{,}25 \text{ мОм}, \qquad x_н = \frac{0{,}091}{2}\,30 = 1{,}36 \text{ мОм}.$$

Переходное сопротивление двух неподвижных контактных соединений в фазе и в нуле (см. табл. 11) с учетом двух параллельных жил:

$$r_к = \frac{0{,}043}{2}\,2 + \frac{0{,}064}{2}\,2 = 0{,}107 \text{ мОм}.$$

Сопротивления автоматического выключателя (см. табл. 8):

r_a = 1,1 мОм, x_a = 0,5 мОм.

Сопротивление электрической дуги по табл. 28 принимаем равным 15 мОм:

$r_д$ = 15 мОм.

Сопротивления петли фаза-нуль на участке 2 (см. рабочую таблицу):

$r_п$ = 13,12 + 26,25 + 1,1 + 0,107 + 15 = 55, 58 мОм,

$x_п$ = 1,28 + 1,36 + 0,5 = 3,14 мОм.

Сумма сопротивлений на двух участках (без учета сопротивления дуги 5 мОм на первом участке):

$\sum r_п$ = 6,494 - 5 + 55,58 = 57,1 мОм,

$\sum x_п$ = 1,2 +3,14 = 4,34 мОм.

Ток однофазного КЗ в конце второго участка в точке К2:

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1,1 + 57,1)^2 + (5,93 + 4,34)^2}} = 3,89 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке К2 удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_2 = \frac{3890}{250} = 15,6.$$

Участок 3.

Далее расчет дается без ссылок на уже применявшиеся формулы и таблицы исходных данных.

Сопротивления автоматического выключателя:

r_a = 2,15 мОм, x_a = 1,2 мОм.

Сопротивления фазного провода сечением 35 мм^2:

r_{20} = 0,53 мОм/м, x = 0,088 мОм/м,

r_{120} = 0,53·1,4 = 0,742 мОм/м.

Сопротивления фазной цепи линии длиной 60 м:

$r_{1л}$ = 0,742·60 = 44,52 мОм, $x_{1л}$ = 0,088·60 = 5,28 мОм.

Переходное сопротивление трех неподвижных контактных соединений в фазе и двух в нуле:

$r_к$ = 0,056·3 + 0,085·2 = 0,338 мОм.

Сопротивления нулевого провода сечением 16 мм^2 длиной 60 м:

r_{20} = 1,16 мОм/м, x = 0,095 мОм/м,

r_{145} = 1,16·1,5 = 1,74 мОм/м,

$r_{нп}$ = 1,74·60 = 104,4 мОм, $x_{нп}$ = 0,095·60 = 5,7 мОм,

$Z^2_{нп} = r^2_{нп} + x^2_{нп} = 104{,}4^2 + 5{,}7^2 = 10\ 932$ мОм^2.

Сопротивления стальной электросварной трубы длиной 60 м, используемой для зануления параллельно с нулевым проводом (см. табл. 15):

r = 0,75 мОм/м, x = 0,45 мОм/м,

$r_{тр}$ = 0,75·60 = 45 мОм, $x_{тр}$ = 0,45·60 = 27 мОм,

$Z^2_{тр} = r^2_{тр} + x^2_{тр} = 45^2 + 27^2 = 2754$ мОм^2.

Проводимость разветвленного участка: нулевой провод– стальная труба.

Активная проводимость:

$$g = \frac{r_{нп}}{Z^2_{нп}} + \frac{r_{тр}}{Z^2_{тр}} = \frac{104{,}4}{10932} + \frac{45}{2754} = 0{,}02589 \text{ кСм}.$$

Индуктивная проводимость:

$$b = \frac{x_{нп}}{Z^2_{нп}} + \frac{x_{тр}}{Z^2_{тр}} = \frac{5{,}7}{10932} + \frac{27}{2754} = 0{,}01033 \text{ кСм}.$$

Полная проводимость (в квадрате):

$y^2 = g^2 + b^2 = 0{,}02589^2 + 0{,}01033^2 = 0{,}0007769$ кСм^2.

Эквивалентное сопротивление разветвленного участка цепи зануления:

$$r_н = \frac{g}{y^2} = \frac{0{,}02589}{0{,}0007769} = 33{,}32 \text{ мОм},$$

$$x_н = \frac{b}{y^2} = \frac{0{,}01033}{0{,}0007769} = 13{,}3 \text{ мОм}.$$

Сопротивление электрической дуги:

$r_д = 20$ мОм.

Сопротивление петли фаза-нуль на участке 3 (см. рабочую таблицу):

$r_п = 44{,}52 + 33{,}32 + 2{,}15 + 0{,}338 + 20 = 100{,}3$ мОм,

$x_п = 5{,}28 + 13{,}3 + 1{,}2 = 19{,}78$ мОм.

Сумма сопротивлений на трех участках (без учета сопротивления дуги на предпоследнем участке):

$\sum r_п = 57{,}1 - 15 + 100{,}3 = 142{,}4$ мОм,

$\sum x_п = 4{,}34 + 19{,}78 = 24{,}12$ мОм.

Ток однофазного КЗ в конце третьего участка в точке КЗ:

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1{,}1 + 142{,}4)^2 + (5{,}93 + 24{,}12)^2}} = 1{,}57 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке КЗ удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_3 = \frac{1570}{125} = 12{,}6.$$

Участок 4

Сопротивления автоматического выключателя:

r_a = 3,5 мОм, x_a = 2 мОм.

Сопротивления фазной жилы кабеля сечением 16 мм^2 при 20°С:

r_{20} = 1,95 мОм/м, x = 0,095 мОм/м.

Активное сопротивления фазной жилы кабеля, приведенное к температуре 145°С:

r_{145} = 1,95·1,5 = 2,925 мОм/м.

Сопротивление фазной цепи линии длиной 50 м:

$r_{1л}$ = 2,925·50 = 146,2 мОм,

$x_{1л}$ = 0,095·50 = 4,75 мОм.

Переходное сопротивление трех неподвижных контактных соединений в фазе (см. табл. 11):

$r_к$ = 0,085·3 = 0,255 мОм.

В табл. 11 значения переходного сопротивления неподвижных контактных соединений для кабелей сечением менее 16 мм^2 не указаны. Поэтому сопротивление этих соединений в нулевой жиле сечением 6 мм^2 учитывать не будем, принимая также во внимание, что это практически не повлияет на результаты расчетов из-за малого значения этого сопротивления.

Сопротивление нулевой жилы сечением 6 мм^2 длиной 50 м:

r_{20} = 5,21 мОм/м, x = 0,1 мОм/м,

r_{145} = 5,21·1,5 = 7,82 мОм/м,

$r_{нп}$ = 7,82·50 = 391 мОм, $x_{нп}$ = 0,1·50 = 5 мОм,

$z^2_{нп}$ = 391^2 + 5^2 = 152906 мОм^2.

Сопротивления стальной полосы 40х4, используемой для зануления параллельно с нулевым проводом (см. табл. 16):

r = 1,54 мОм/м, x = 0,92 мОм/м.

Внешнее индуктивное сопротивление при расстоянии между фазной жилой и стальной полосой 1 м определим по табл. 19 и отнесем это сопротивление к стальной полосе.

$x' = 0,75$ мОм/м.

Сопротивления стальной полосы длиной 50 м:

$r_{пол} = 1,54 \cdot 50 = 77$ мОм, $x_{пол} = (0,92 + 0,75) \cdot 50 = 83,5$ мОм,

$Z^2_{пол} = 77^2 + 83,5^2 = 12901$ мОм^2.

Проводимость разветвленного участка: нулевая жила кабеля – стальная полоса.

Активная проводимость:

$$g = \frac{r_{нп}}{Z^2_{нп}} + \frac{r_{пол}}{Z^2_{пол}} = \frac{391}{152906} + \frac{77}{12901} = 0,008526 \text{ кСм.}$$

Индуктивная проводимость:

$$b = \frac{x_{нп}}{Z^2_{нп}} + \frac{x_{пол}}{Z^2_{пол}} = \frac{5}{152906} + \frac{83,5}{12901} = 0,006505 \text{ кСм.}$$

Квадрат полной проводимости:

$y^2 = g^2 + b^2 = 0,008526^2 + 0,006505^2 = 0,0001149$ кСм^2.

Эквивалентное сопротивление разветвленного участка цепи зануления:

$$r_н = \frac{g}{y^2} = \frac{0,008526}{0,0001149} = 74,2 \text{ мОм,}$$

$$x_н = \frac{b}{y^2} = \frac{0,006502}{0,0001149} = 56,59 \text{ мОм.}$$

Сопротивление электрической дуги:

$r_д = 25$ мОм.

Сопротивление петли фаза-нуль на участке 4:

$r_п$ = 146,2 + 74,2 + 3,5 + 0,255 + 25 = 249,2 мОм,

$x_п$ = 4,75 + 56,59 + 2 = 63,34 мОм.

Сумма сопротивлений на последовательных участках электрической цепи (1, 2, 4) без учета сопротивления дуги 15 мОм на предпоследнем участке:

$\sum r_п$ = 57,1 − 15 + 249,2 = 291,3 мОм,

$\sum x_п$ = 4,34 + 63,34 = 67,68 мОм.

Ток однофазного КЗ в конце четвертого участка в точке К4:

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1,1 + 291,3)^2 + (5,93 + 67,68)^2}} = 0,763 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке К4 удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_4 = \frac{763}{80} = 9,5.$$

Участок 5.

Сопротивления фазного провода сечением 1,5 мм^2 длиной 10 м:

r_{20} = 12,3 мОм/м, x = 0,126 мОм/м,

r_{145} = 12,3·1,5 = 18,45 мОм/м,

$r_{1л}$ = 18,45·10 = 184,5 мОм, $x_{1л}$ = 0,126·10 = 1,26 мОм.

Сопротивлениями контактных соединений $r_к$, поскольку их нет в табл. 11 и их значения невелики, пренебрегаем.

Сопротивления водогазопроводной трубы ЦМ20 длиной 10 м, используемой для зануления (см. табл. 14):

r = 1,59 мОм/м, x = 0,95 мОм/м,

$r_н$ = 1,59·10 = 15,9 мОм, $x_н$ = 0,95·10 = 9,5 мОм.

Сопротивление электрической дуги:

$r_д$ = 25 мОм.

Сопротивление петли фаза-нуль на участке 5:

$r_п$ = 184,5 + 15,9 + 25 = 225,4 мОм,

$x_п$ = 1,26 + 9,5 = 10,76 мОм.

Сумма сопротивлений на последовательных участках электрической цепи (1, 2, 5) без учета сопротивления дуги на предпоследнем участке:

$\sum r_п$ = 57,1 − 15 + 225,4 = 267,5 мОм,

$\sum x_п$ = 4,34 + 10,76 = 15,1 мОм.

Ток однофазного КЗ в конце пятого участка :

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1,1 + 267,5)^2 + (5,93 + 15,1)^2}} = 0,854 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ :

$$K_5 = \frac{854}{16} = 53.$$

<u>Участок 6.</u>

Сопротивление автоматического выключателя с расцепителем на 20 А принимаем по табл. 9 для расцепителя 16 А, поскольку расцепителя на 20 А в табл. 8 и 9 нет.

$r_а$ = 9,3 мОм.

Сопротивление фазной жилы кабеля:

r_{20} = 12,5 мОм/м, x = 0,116 мОм/м,

r_{145} = 12,5·1,5 = 18,75 мОм/м,

$r_{1л}$ = 18,75·25 = 468,8 мОм, $x_{1л}$ = 0,116·25 = 2,9 мОм.

Сопротивления обрамления кабельного канала из профильной стали 40х40х4 (см. табл. 18) принимаем для тока короткого замыкания 600 А:

$r = 0,92$ мОм/м, $x = 0,59$ мОм/м.

Внешнее индуктивное сопротивление при расстоянии между фазной жилой и обрамлением кабельного канала 0,4 м определяем по табл. 19. Сечения 2,5 мм^2 в таблице нет, поэтому принимаем значение сопротивления для сечения круглого проводника (фазной жилы) 4 мм^2:

$x' = 0,77$ мОм/м.

Сопротивления обрамления кабельного канала при длине линии 25 м:

$r_н = 0,92 \cdot 25 = 23$ мОм, $x_н = (0,59 + 0,77)\ 25 = 34$ мОм.

Сопротивление электрической дуги:

$r_д = 25$ мОм.

Сопротивления петли фаза-нуль на участке 6:

$r_п = 468,8 + 23 + 9,3 + 25 = 526,1$ мОм,

$x_п = 2,9 + 34 = 36,9$ мОм.

Сумма сопротивлений последовательных участков:

$\sum r_п = 57,1 - 15 + 526,1 = 568,2$ мОм,

$\sum x_п = 4,34 + 36,9 = 41,24$ мОм.

Ток однофазного КЗ:

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1,1 + 568,2)^2 + (5,93 + 41,24)^2}} = 0,403 \text{ кА}.$$

Ток короткого замыкания получился меньше 600 А. Следовательно, принятые нами по табл. 18 значения сопротивлений профильной стали оказались не соответствующими значению тока КЗ. Поэтому нужно принять значения сопротивлений профильной стали для меньше-

го тока и повторить расчет. Возьмем значения этих сопротивлений для тока 200 А:

$r = 1{,}5$ мОм/м, $x = 0{,}92$ мОм/м,

$r_н = 1{,}5 \cdot 25 = 37{,}5$ мОм, $x_н = (0{,}92 + 0{,}77)25 = 42{,}25$ мОм.

Результаты расчета с новыми значениями сопротивлений профильной стали приводятся в рабочей таблице во второй строке для участка 6.

Новые значения тока однофазного КЗ:

$$I_1 = \frac{230}{\sqrt{(1{,}1 + 582{,}7)^2 + (5{,}93 + 49{,}49)^2}} = 0{,}392 \text{ кА}.$$

Ток короткого замыкания получился больше 200 А, и нового пересчета можно не делать, т. к. кратность расчетного тока удовлетворяет требованиям ПУЭ, а новый пересчет привел бы только к некоторому ее увеличению.

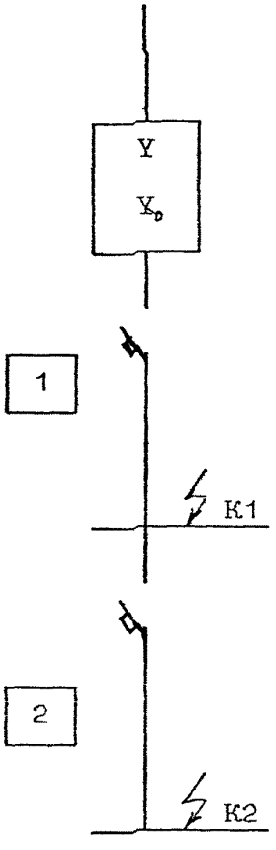
$$K_б = \frac{392}{20} = 19{,}6.$$

4.3. Расчет по полному сопротивлению петли фаза-нуль $Z_п$

Для определения тока однофазного КЗ этим методом нужно знать значение полного сопротивления понижающего трансформатора току однофазного КЗ ($Z_т^{(1)}$) и значения полного сопротивления петли фаза-нуль ($Z_п$) на всех последовательных участках цепи короткого замыкания (см. формулу 16).

В настоящей работе приводятся четыре таблицы с удельными сопротивлениями петли фаза-нуль ($Z_{пу}$) для некоторых вариантов выполнения цепи зануления. Более полный набор таких таблиц имеется в литературе [5].

Рассмотрим схему электрической сети на рис. 3 и определим ток однофазного КЗ в точках К1 и К2.



Трансформатор
100 кВ·А, 10/0,4 кВ,
схема соединений: звезда–звезда с нулем

Автоматический выключатель
150 А

Кабельная линия
АВВГ 1(3х70), l_1 = 20 м
Цепь зануления:
обрамление кабельного канала 50х50х5

Автоматический выключатель
50 А

Кабельная линия
АВВГ 1(3х10), l_2 = 100 м
Цепь зануления:
стальная полоса 40х4

Рис. 3. Схема электрической сети к примеру 4.3.

Сопротивление трансформатора току однофазного КЗ (см. табл. 1):

$Z_{т}^{(1)} = 779$ мОм.

Сопротивление петли фаза-нуль на участке 1 при токе короткого замыкания 700 А (см. табл. 21):

$Z_{пу1} = 1,73$ мОм/м,

$Z_{п1} = Z_{пу1} l_1 = 1,73 \cdot 20 = 34,6$ мОм.

Ток однофазного короткого замыкания в точке К1:

$$I_1 = \frac{U_ф}{Z_т^{(1)}/3 + Z_{п1}} = \frac{230}{779/3 + 34,6} = 0,782 \text{ кА}.$$

Это больше того значения, для которого мы принимали сопротивление петли фаза-нуль по табл. 21, поэтому нового расчета делать не нужно.

Кратность тока КЗ удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K_1 = \frac{782}{150} = 5,2.$$

Сопротивление петли фаза-нуль на участке 2 при токе короткого замыкания 200 А (см. табл. 20):

$Z_{пу2} = 6,29$ мОм/м,

$Z_{п2} = Z_{пу2} l_2 = 6,29 \cdot 100 = 629$ мОм.

Ток однофазного короткого замыкания в точке К2:

$$I_1 = \frac{U_ф}{Z_т^{(1)}/3 + Z_{п1} + Z_{п2}} = \frac{230}{779/3 + 34,6 + 629} = 0,249 \text{ кА}.$$

Кратность тока КЗ в точке К2 удовлетворяет требованиям ПУЭ:

$$K2 = \frac{249}{50} = 4,98.$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помещенный в настоящей работе справочный материал собран компактно из нескольких источников и позволяет производить расчеты токов однофазных КЗ в электрических сетях до 1 кВ для большинства встречающихся в практике случаев без обращения к другой технической литературе. Если же помещенный здесь материал окажется для пользователя недостаточным, ссылки на литературу дают ему возможность обратиться к первоисточнику.

В примерах расчета для наиболее характерных случаев показано, как пользоваться справочным материалом. Когда не удается найти справочные данные, точно отражающие все особенности конкретной схемы, приходится использовать данные для условий, наиболее близких к расчетным. Точность расчетов при этом снижается, поэтому требования нормативных документов к значению токов однофазных КЗ должны выполняться с достаточным запасом.

Описание нескольких методик дает возможность использовать для расчета тот справочный материал, который имеется в наличии или тот, которому пользователь отдает предпочтение.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1986 .

2. ГОСТ 28249-89. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. - М.: Издательство стандартов, 1989.

3. Справочник по проектированию электроснабжения. Под редакцией Ю. Г. Барыбина, Л. Е. Федорова, М. Г. Зименкова, А. Г. Смирнова. - М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. Заземление и зануление электроустановок промышленных предприятий. Технические решения. Шифр В578.2. - Волгоградское отделение ВНИПИ ТПЭП, 1991.

5. Спеваков П. И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В. - М.: Энергия, 1971.

6. Рекомендации по расчету сопротивления цепи фаза-нуль. (Разработаны Горьковским отделением ГПИ Электропроект, Лисин Р. А.) - М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1988.

7. Беляев А. В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. - Л.: Энергоатомиздат, 1988.