

ГЛАВЭЛЕКТРОМОНТАЖ

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ
СОПРОТИВЛЕНИЯ
ЦЕПИ «ФАЗА-НУЛЬ»**

МОСКВА
Центральное бюро научно-технической информации

Главэлектромонтаж

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕПИ «ФАЗА-НУЛЬ»

Министерство монтажных и специальных строительных работ СССР
Главэлектромонтаж

Центральное бюро научно-технической информации
Москва, 1986

Даны основные расчетные формулы, рекомендации и справочные материалы для проверочных расчетов сопротивления цепи «фаза-нуль» для электроустановок до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

Рекомендации разработаны Горьковским отделом Электропроект.

Исполнитель Р.А. Лисин.

В работе принимали участие О.И. Мичурин и др.

1 Общая часть

Для обеспечения безопасности обслуживания электроустановок, повышения надежности работы устройств защиты при замыкании одной из фаз на корпус или землю. Правила устройства электроустановок (1.7.79, 7.3.139) предъявляют определенные требования к кратности тока однофазного КЗ относительно уставок защитных аппаратов.

При проектировании электроустановок напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью для определения тока однофазного КЗ необходимо рассчитать сопротивление цепи фаза-нуль.

Однако из-за многообразия методов выполнения электрических сетей напряжением до 1 кВ, различных способов зануления, широкого диапазона мощностей электроустановок и др. этот расчет для определенного объекта трудоемок, требует большого количества справочных материалов.

Цель настоящей работы – дать проектировщикам необходимые справочные материалы для расчета сопротивления цепи фаза-нуль в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью с учетом накопленного опыта проектирования, требований ПУЭ, ГОСТ, материалов исследований и новых разработок с учетом обновления справочных сведений по электрооборудованию.

В работе частично сохранены сведения по старевшим типам аппаратов, шиннопроводов и т.д., которые могут быть использованы при выполнении проекта реконструкции промпредприятий.

Пользуясь таблицами предельных длин линий к электродвигателям различных мощностей, приведенных в работе, среди большого числа электроприемников проектируемого объекта можно быстро определить электроприемники, для которых требуется проверка кратности тока однофазного КЗ по отношению к уставке защитного аппарата.

В работе приведены примеры практического расчета однофазного КЗ при различных способах зануления сетей.

«Руководящие указания» [6] рекомендует для определения тока однофазного КЗ использовать методику, основанную на методе симметричных составляющих. Эта формула позволяет с большой степенью точности определять токи КЗ при известных сопротивлениях прямой, обратной и нулевой последовательности цепи фаза-нуль. Однако использовать точную формулу для расчета токов однофазного КЗ при всем разнообразии вариантов электрических сетей невозможно, так как справочные данные о сопротивлениях прямой, обратной и нулевой последовательности имеются для

ограниченной номенклатуры кабельных изделий с алюминиевыми жилами и не охватывают всех возможных способов прокладки фазных и нулевых защитных проводников в промышленных установках.

В работе предлагается для практических расчетов применять приближенную формулу, которая приводится [2].

По данным сравнения результатов расчетов, полученным по точной и приближенной формулам, при использовании приближенной формулы погрешность не выходит за пределы погрешности исходных данных.

Использование данной работы при проектировании позволяет значительно сократить трудозатраты на выполнении расчетов цепи фаза-нуль, упрощает задачу предварительной оценки надежности защиты электроустановок от коротких замыканий.

Работа может быть использована при переводе на автоматизированное программирование с применением ЭВМ.

2 Величины тока однофазного КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата

В табл. 1 приводятся значения кратности тока однофазного КЗ по отношению к номинальному току плавких вставок предохранителей и установкам наиболее часто применяемых автоматических выключателей (на основании требований 1.1.79, 7.3.139 ПУЭ).

Обозначения, приведенные в табл.1:

$I_{0\text{ КЗ}}$ – минимальное значение тока однофазного КЗ, нормируемое ПУЭ, А;

I_n – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или номинальный ток расцепителя автомата с обратозависимой от тока характеристикой, А;

I_m – уставка на ток мгновенного срабатывания электромагнитного расцепителя, А.

Коэффициенты 1,43 и 1,27 подсчитаны путем умножения коэффициента запаса 1,1 на коэффициент, учитывающий производственный допуск (по заводским данным 1,3 и для автоматов А3110 и 1,15 для автоматов А3120, А3130, А3140). Задача проектировщика – при выборе нулевых защитных¹ проводников выполнить следующие требования:

а) полная проводимость цепи фаза-нуль должна быть такой, чтобы значение тока однофазного КЗ на аварийном участке было не менее указанного в табл. 1;

б) в любой точке цепи от нейтрали трансформатора до электроприемника полная проводимость нулевых защитных проводников должна быть не менее 50% проводимости фазных проводников (внешнее индуктивное сопротивление при расчете тока однофазного КЗ не учитывается; для стальных проводников проводимость учитывается при токах КЗ, приведенных в табл. 1).

Для автоматических выключателей с комбинированных расцепителем достаточно обеспечить нормируемое по ПУЭ значение токов однофазного КЗ для одного из расцепителей (любого).

¹ Далее нулевой защитный проводник для краткости называется нулевым проводником.

Таблица 1

Защитный аппарат	Элемент, отключающий ток КЗ	Тип аппарата		
			1.7.79	7.3.139
Плавкий предохранитель	Плавкая вставка	Все типы предохранителей	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 3 I_{\text{н}}$	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 4 I_{\text{н}}$
Автомат	Расцепитель с обратной зависимостью от тока характеристикой	АП50В АК63 АЕ2000 АЕ2000М А3100 А3700 ВА Электрон	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 3 I_{\text{н}}$	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 6 I_{\text{н}}$
		А3110	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,43 I_{\text{м}}$	
	Электромагнитный расцепитель	А3120, 3130, 3140	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,27 I_{\text{м}}$	
		АП50Б АК63 АЕ2000 АЕ2000М ВА12 ВА 16 ВА51-ВА53	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,2 I_{\text{м}}$	
		АВМ ВА51 ВА52 ВА53 АЕ2000М А3700 А4100 ВА62	$I_{0\text{ КЗ}} \geq 1,25 I_{\text{м}}$	

3 Определение величины тока однофазного тока КЗ

В настоящее время существует два метода определения тока однофазного КЗ:

1) определение тока однофазного КЗ по приближенной формуле [2]:

$$I_{\text{к}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{т}}}{3} + Z_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{к}}$ – ток однофазного КЗ, А; $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, В; $Z_{\text{т}}$ – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом; $Z_{\text{ц}}$ – полное сопротивление фазный провод-нулевой провод, Ом.

Полное сопротивление $Z_{\text{ц}}$ представляет собой геометрическую сумму активных и индуктивных сопротивлений отдельных участков цепи фаза-нуль от трансформатора до точки КЗ.

В общем случае полное сопротивление всей цепи фаза-нуль (или отдельно участка) определяется по формуле

$$Z_{\text{ц}} = \sqrt{(r_{\text{ф}} + r_{\text{н}} + r_{\text{а}})^2 + (x_{\text{ф}}'' + x_{\text{н}}'' + x')^2}, \quad (2)$$

где $r_{\text{ф}}$, $r_{\text{н}}$ – активные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом; $r_{\text{а}}$ – суммарное активное сопротивление контактов цепи фаза-нуль (зажимы на вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов, контакт в месте КЗ), Ом; $x_{\text{ф}}''$, $x_{\text{н}}''$ – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом; x' – внешнее индуктивное сопротивление цепи фаза-нуль, Ом.

Если для какого-либо участка отсутствуют значения r и x , а имеется только значение полного сопротивления участка Z , допускается для нахождения $Z_{\text{ц}}$ суммировать арифметически полное сопротивление данного участка с полным сопротивлением остальных участков, найденным по формуле (2).

Ошибка будет в сторону увеличения общего сопротивления, т.е. даст запас с точки зрения гарантированного срабатывания защитного аппарата.

2) Определение тока однофазного КЗ по формуле, приведенной в [3]:

$$I_{\text{к}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{(2 \cdot r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2 \cdot x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное напряжение ступени, в которой находится точка КЗ, В; $r_{1\Sigma}$, $r_{0\Sigma}$ – соответственного суммарное активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи до точки КЗ, Ом; $x_{1\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ – соответственного суммарное активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи до точки КЗ, Ом.

Формулы (1) и (3) основаны на методе симметричных составляющих, известном из курса теоретических основ электротехники (ТОЭ).

В [2] и [15] сделан подробный анализ составляющих формулы (1), определены пределы допустимой степени погрешности при пользовании приближенной формулой.

При анализе формулы (3) становится ясно, что она предполагает определение максимальных значений токов КЗ, которые могут быть необходимы для проверки аппаратов по однофазной коммутационной способности (см. 1.4.5.3 ПУЭ).

В данной работе решается задача определения минимальных значений токов однофазного КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью для обеспечения нормируемых коэффициентов чувствительности защиты (надежности срабатывания защиты).

Таким образом, учитывая изложенное и допуская погрешность (в среднем 10%, принимая во внимание и неточность исходных данных), в практических расчетах величины тока однофазного КЗ рекомендуется пользоваться приближенной формулой (1).

Указанная в знаменателе (1) арифметическая сумма сопротивлений дает увеличенное значение общего сопротивления цепи фаза-нуль и, соответственно, меньшее значение тока однофазного КЗ.

Отрицательная (в сторону запаса) погрешность при пользовании приближенной формулой (1), когда преобладает активная нагрузка (для зануления используется 4-я жила или алюминиевая оболочка кабеля) при схеме соединения трансформатора Y/Y_0 , может достигнуть 18-20%. Погрешность в 10-12%, также в сторону запаса, по-

лучается при использовании для зануления стальных труб электропроводки. Погрешность существенно уменьшается при схеме соединения трансформаторов Δ/Y , Y/Y .

4 Расчетные сопротивления трансформаторов

Методика расчета полного сопротивления трансформатора при однофазном замыкании вторичной обмотки на нулевой провод приводится в [2].

В табл. 2, 3, 4 приведены расчетные значения сопротивлений трансформаторов при вторичном напряжении 400/230 В. Для удобства пользования в таблицах даны значения $Z_T/3$.

Таблица 2

Расчетные сопротивления
масляных трансформаторов по ГОСТ 11920-73 и
ГОСТ 12022-76 при вторичном напряжении 400/230 В

Мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	$Z_T/3$, Ом	
		Схема соединения трансформатора	
		Y/Y_0	Δ/Y , Y/Y
25	6-10	1,036	0,302
40	6-10	0,649	0,187
69	6-10	0,412	0,12
	20-35	0,379	0,139
100	6-10	0,259	0,0754
	20-35	0,288	0,109
160	6-10	0,162	0,047
	20-35	0,159	0,068
250	6-10	0,104	0,03
	20-35	0,102	0,0433
400	6-10	0,065	0,019
	20-35	0,063	-
630	6-10	0,043	0,014
	20-35	0,04	-
1000	6-10	0,027	0,009
	20-35	0,0256	0,0107
1600	6-10	0,018	0,0056
	20-35	0,017	0,0065
2500	6-10	-	0,0036

Таблица 3

Расчетные сопротивления
трансформаторов с негорючим заполнением по
ГОСТ 16555-75 при вторичном напряжении 0,4 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	$Z_T/3$, Ом
		Схема соединения трансформатора Δ/Y_0
250	6-10	0,028
400	6-10	0,018
630	6-10	0,014
1000	6-10	0,0088
1600	6-10	0,006
2500	6-10	0,0038

Таблица 4

Расчетные сопротивления
сухих трансформаторов по ГОСТ 14074-76 при
вторичном напряжении 400/230 В

Мощность трансформатора, кВ·А	Схема соединения	$Z_T/3$, Ом
160	Δ/Y_0	0,055
180	Y/Y_0	0,150
250	Δ/Y_0	0,035
320	Y/Y_0	0,084
400	Δ/Y_0	0,022
560	Y/Y_0	0,048
630	Δ/Y_0	0,014
750	Y/Y_0	0,036
1000	Δ/Y_0	0,009
1000	Y/Y_0	0,027
1600	Δ/Y_0	0,0056

5 Расчетные сопротивления проводов и кабелей

5.1 Расчетное сопротивление проводов

Активное сопротивление проводов r , Ом, определяется выражением

$$r = c_v \cdot c_c \cdot c_{нз} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (4)$$

где $c_v = 1 + 0,004(t^\circ - 20)$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления с повышением температуры. Значение c_v для различных температур приведены в табл. 5;

$c_c = 1,02$ – коэффициент, учитывающий сопротивление многопроволочных жил проводов и кабелей вследствие скрутки. для шин и однопроволочных проводов $c_c = 1$;

$c_{нз}$ – коэффициент поверхностного эффекта при переменном токе. Для медных и алюминиевых проводов и кабелей $c_{нз} = 1$. Для медных и алюминиевых шин прямоугольного сечения значение $c_{нз}$ приводится в табл. 6. Значения $c_{нз}$ определены по величинам токов, приведенным в табл. 1.3.31 ПУЭ при частоте 50 Гц. Значения коэффициента $c_{нз}$ для пакетов шин для приближенных расчетов допустимо принимать как для одиночных шин;

ρ – удельное сопротивление при $t = 20^\circ \text{C}$:

для меди $\rho = 0,0178 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – провода и шины;

для алюминия $\rho = 0,0294 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – провода и кабели;

$\rho = 0,0325 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – шины из сплава АД31Т1;

S – сечение проводника, мм^2 ;

l – длина проводника, м.

В настоящей работе сопротивления подсчитывались при следующих температурах:

для проводов и кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией $+65^\circ \text{C}$;

для шин $+70^\circ \text{C}$;

для кабелей с бумажной изоляцией $+80^\circ \text{C}$.

Следует отметить, что температура нулевой жилы может быть меньшей, чем фазной. Подобное допущение создает некоторый запас при расчетах.

Таблица 5

Значение коэффициента c_v

	При температуре проводника, $^\circ \text{C}$					
	30	40	50	60	70	80
Медь и алюминий	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,24

Таблица 6

Значение коэффициента $c_{нэ}$ для одиночных шин прямоугольного сечения при расположении «на ребро»

Размер шин, мм	$c_{нэ}$		Размер шин, мм	$c_{нэ}$	
	алюминий	медь		алюминий	медь
25x3	1,02	1,02	80x6	1,04	1,04
	1,03	1,00	80x8	1,05	1,03
	1,00	1,00	80x10	1,08	1,1
	1,02	1,014	100x6	1,04	1,07
	1,015	1,02	100x8	1,08	1,1
	1,014	1,01	100x10	1,1	1,14
	1,023	1,04	120x8	1,15	1,17
	1,03	1,04	120x10	1,23	1,24

В табл. 7, 8 приводятся значения активных сопротивлений медных, алюминиевых и алюмомедных проводов.

Внутреннее индуктивное сопротивление X'' медных и алюминиевых проводов имеет незначительную величину и при расчетах им обычно пренебрегают.

Внешнее активное сопротивление X' проводов зависит от их сечения и взаимного расположения.

Если фазный и нулевой проводник выполнены из круглых проводов одинакового сечения и проложены параллельно, то внешнее индуктивное сопротивление цепи фаза-нуль может быть подсчитано по формуле:

$$X' = 0,29 \cdot \lg \frac{d}{r}, \quad (5)$$

где d – расстояние между проводниками, м; r – радиус проводника, м.

На рис. 1 приводится кривая зависимости индуктивного сопротивления от расстояния между открыто проложенными проводниками, позволяющая определить внешнее индуктивное сопротивление воздушных линий и проводов, проложенных открыто на изоляторах.

В табл. 9 приведены значения внешнего индуктивного сопротивления X' за пределами кривых, при $d = 10$ и 20 м.

В тех случаях, когда нулевой и фазный проводник имеют круглое сечение, теоретический расчет внешнего индуктивного сопротивления представляет сложную задачу, так как на его величину влияют многие факторы (расстояние между фазным и нулевым проводником, конфигурация, площадь сечения проводников).

Для учета внешнего сопротивления как для круглых, так и для плоских нулевых проводников, независимо от их материала, рекомендуется пользоваться кривыми рис. 1 и таблицей 9. Причем, если нулевой проводник круглый, но отличается от фазного площадью сечения, необходимо индуктивное сопротивление принимать по проводнику меньшего сечения.

При плоском нулевом проводнике сопротивление определяется по сечению фазного проводника.

При близком расположении фазного и нулевого проводника (прокладка проводов в трубах) значением X' можно пренебречь.

Таблица 7

Активные сопротивления медных и алюминиевых проводов
и кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией, Ом/км

Сечение жилы, мм ²	Алюминий	Медь
1,0	-	21,8
1,2	-	18,9
1,5	-	14,5
2	18,4	10,94
2,5	14,75	8,73
3	12,3	7,23
4	9,2	5,47
5	7,38	4,37
6	6,15	3,64
8	4,6	2,74
10	3,68	2,17
16	2,3	1,37
25	1,47	0,873
35	1,05	0,625
50	0,74	0,436
70	0,527	0,313
95	0,338	0,23
120	0,308	0,181
150	0,246	0,146
185	0,2	0,122
240	0,153	0,09

Таблица 8

Активные сопротивления алюмомедных проводов с пластмассовой изоляцией

Сечение жилы, мм ²	Сопротивление, Ом/км
1	32,5
1,5	21,7
2,5	13
4	8,13
6	5,42
10	3,25

Таблица 9

Зависимость индуктивного сопротивления
от расстояния между проводниками

Сечение жилы, мм ²	X' , Ом/км	
	$d = 10$ м	$d = 20$ м
4	1,16	1,24
6	1,12	1,21
10	1,06	1,15
16	1,03	1,12
25	1,05	1,1
35	0,975	1,06
50	0,95	1,05
70	0,94	1,02
95	0,92	1,1
120	0,9	1,0

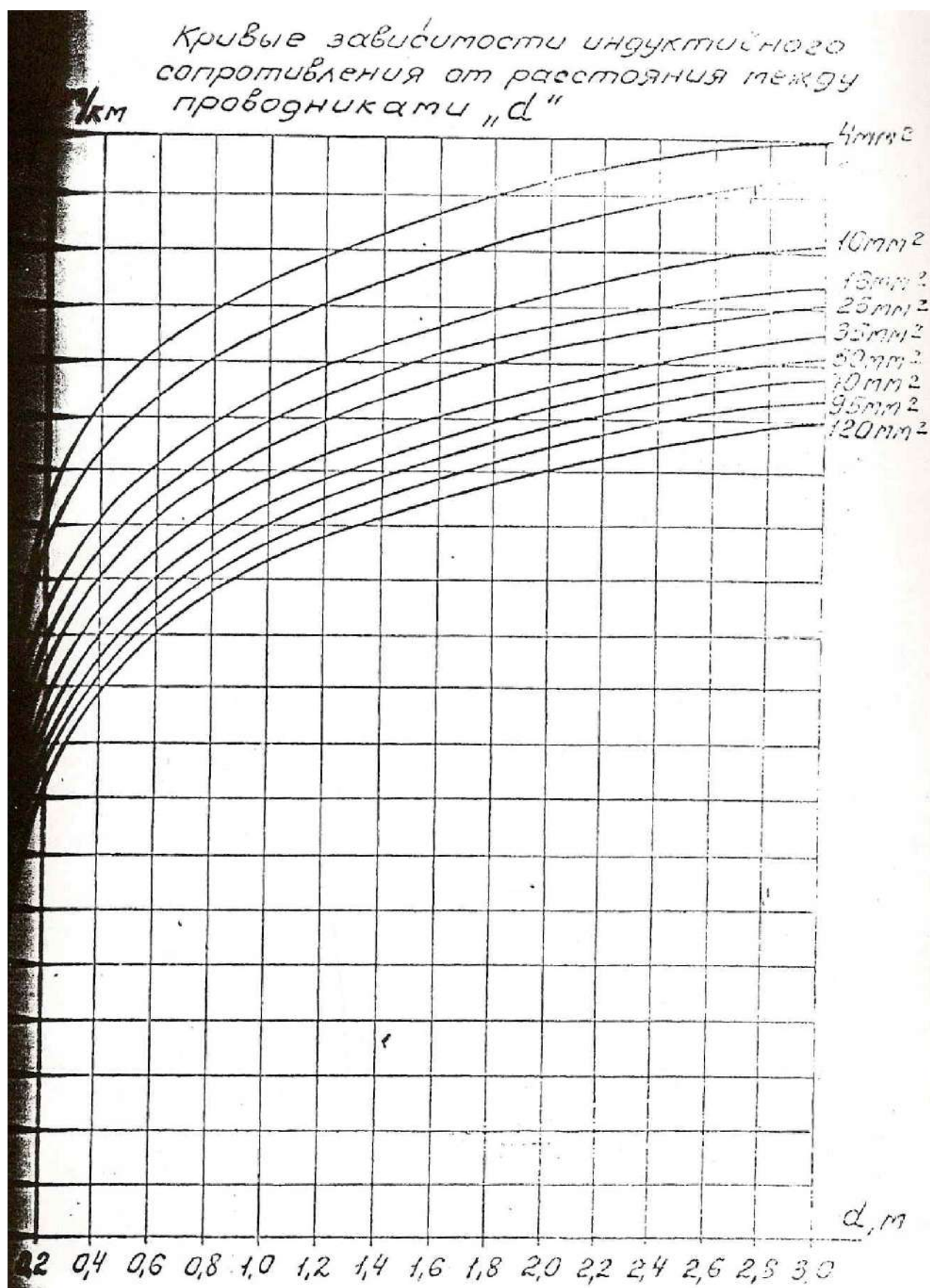


Рис. 1 Кривые зависимости индуктивного сопротивления от расстояния между проводниками «d».

5.2 Расчетное сопротивление кабелей

Активное сопротивление жил кабелей подсчитывается по формуле 4. В табл. 7 и 10 приведены значения активных сопротивлений медных и алюминиевых жил кабелей при температурах 65°C и 80°C.

Внутреннее индуктивное сопротивление жил кабелей имеет незначительную величину и при расчетах обычно не учитывается.

Внешнее индуктивное сопротивление

Если в качестве нулевого защитного проводника используется четвертая жила или металлическая оболочка кабеля, то его внешнее индуктивное сопротивление мало и при расчетах не учитывается. В этом случае учитывается только активное сопротивление.

В табл. 11 приведены значения сопротивлений цепи фаза-нуль 4-жильных кабелей в пластмассовой или резиновой оболочке с пластмассовой или резиновой изоляцией, когда в качестве нулевого проводника используется четвертая жила.

Активное сопротивление цепи является суммой активных сопротивлений фазной и нулевой жил кабеля при температуре 65°C.

В табл. 12 даны значения сопротивлений 3-жильных кабелей с использованием в качестве нулевой жилы алюминиевой оболочки.

Полное сопротивление цепи является суммой активных сопротивлений фазы при температуре 80°C и алюминиевой оболочки.

В табл. 13 приведены значения 4-жильных кабелей (в качестве нулевого проводника используется как четвертая жила, так и алюминиевая оболочка).

Активное сопротивление цепи является суммой активных сопротивлений фазной и нулевой жил кабеля.

В вышеупомянутых таблицах значения сопротивлений фазного и нулевого проводников приведены отдельно, что дает возможность определить соответствие их проводимостей требованиям 1.7.79 ПУЭ (50% проводимости нулевого проводника по отношению к фазному).

Внешнее активное сопротивление цепи не учтено из-за его незначительности.

В случаях, когда в качестве нулевого используется отдельно проложенный проводник, внешнее индуктивное сопротивление определяется по кривым рис. 2.

В табл. 15, 16, 17 приведены значения полного расчетного сопротивления цепи фаза-нуль при использовании в качестве нулевых проводников металлоконструкций (обрамление канала 800x700 мм, двутавровой балки, угловой стали) [7].

Требование 1.7.79 ПУЭ о 50% проводимости нулевого проводника удовлетворяется для всех сечений кабелей и размеров полос.

В табл. 14 приведены допустимые сочетания стальных оболочек 3-жильных кабелей, при которых проводимость стальной полосы составляет 50% проводимости фазной жилы.

Расстояние между кабелем и полосой 0,2-0,8 м.

При расчетах токов однофазного КЗ необходимо помнить следующее:

- внешнее индуктивное сопротивление X' следует учитывать, когда его величиной нельзя пренебречь;
- при проверке на 50% проводимость нулевого проводника по отношению к фазному внешнее индуктивное сопротивление допустимо не учитывать, так как задача распределения отдельно по фазному и нулевому проводникам для различных спо-

соединений их прокладки и с учетом многообразия конструктивного исполнения нулевого проводника на различных участках цепи фаза-нуль практически является неразрешимой.

Таблица 10

Активные сопротивления кабелей с бумажной изоляцией

Сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление жил, Ом/км	
	алюминий	медь
1,0	-	23,8
1,5	-	15,3
2,5	15,5	9,13
4	9,6	5,75
6	6,46	3,83
10	3,87	2,25
16	2,42	1,44
25	1,55	0,913
35	1,11	0,657
50	0,775	0,487
70	0,555	0,322
95	0,408	0,242
120	0,324	0,131
150	0,258	
185	0,210	
240	0,160	0,095

Таблица 11

Полное сопротивление цепи фаза-нуль для 4-жильных кабелей
в пластмассовой оболочке

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	Алюминий			Медь		
	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> цепи	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> цепи
4x2,5	14,75	14,75	29,5	8,73	8,73	17,46
3x4+1x2,5	9,2	14,75	23,95	5,47	8,73	14,2
4x4	9,2	9,2	18,4	5,47	5,47	10,94
3x6+1x4	6,15	9,2	15,35	3,64	5,47	9,11
4x6	6,15	6,15	12,3	3,64	3,64	7,28
3x10+1x6	3,68	6,15	9,83	2,17	3,64	5,81
4x10	3,68	3,68	7,36	2,17	2,17	4,34
3x16+1x10	2,3	3,68	5,98	1,37	2,17	3,54
4x16	2,3	2,3	4,6	1,37	1,37	2,74
3x25+1x16	1,47	2,3	3,77	0,873	1,37	2,243
4x25	1,47	1,47	2,94	0,873	0,873	1,746
4x35+1x16	1,05	2,3	3,35	0,625	1,37	1,995
4x35	1,05	1,05	2,1	0,625	0,625	1,25
3x50+1x25	0,74	1,47	2,21	0,436	0,873	1,309
4x50	0,74	0,74	1,48	0,436	0,436	0,872
3x70+1x25	0,527	1,47	1,997	0,313	0,873	1,186
3x70+1x35	0,527	1,05	1,577	0,313	0,625	0,938
4x70	0,527	0,527	1,054	0,313	0,313	0,626
3x95+1x35	0,388	1,05	1,438	0,23	0,625	0,855
3x95+1x50	0,388	0,74	1,128	0,23	0,436	0,666
4x95	0,388	0,388	0,776	0,23	0,23	0,46
3x120+1x35	0,308	1,05	1,358	0,181	0,625	0,806
3x120+1x70	0,308	0,527	0,835	0,181	0,313	0,494
4x120	0,308	0,308	0,616	0,181	0,181	0,362
3x150+1x50	0,246	0,74	0,986	0,146	0,436	0,582
4x150	0,246	0,246	0,492	0,146	0,146	0,292
3x185+1x50	0,2	0,74	0,94	0,122	0,436	0,558
4x185	0,2	0,2	0,4	0,122	0,122	0,244
4x240	0,153	0,153	0,306	0,09	0,09	0,18

Таблица 12

Полное расчетное сопротивление цепи фаза-нуль для 3-жильных кабелей при использовании алюминиевой оболочки в качестве нулевого проводника

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	Алюминий			Медь		
	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> цепи	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля	<i>Z</i> цепи
3х6	6,46	1,045	7,505	3,83	0,985	4,815
3х10	3,87	1,038	4,708	2,28	0,876	3,156
3х16	2,42	0,775	3,195	1,44	0,748	2,188
3х25	1,55	0,691	2,241	0,918	0,679	1,597
3х35	1,11	0,616	1,727	0,697	0,610	1,287
3х50	0,775	0,498	1,273	0,458	0,492	0,950
3х70	0,555	0,410	0,965	0,325	0,405	0,734
3х95	0,408	0,321	0,729	0,242	0,357	0,699
3х120	0,324	0,328	0,652	0,191	0,325	0,516
3х150	0,258	0,268	0,526	0,164	0,264	0,413
3х185	0,210	0,241	0,451	0,124	0,239	0,363
3х240	0,160	0,215	0,375	0,095	0,212	0,307

Таблица 13

Полное расчетное сопротивление цепи фаза-нуль для 4-жильных кабелей с учетом проводимости алюминиевой оболочки

Сечение жил кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км					
	Материал жилы					
	Алюминий			Медь		
	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля + оболочки	<i>Z</i> цепи	<i>r</i> фазы	<i>r</i> нуля + оболочки	<i>Z</i> цепи
3х6+1х4	6,46	0,867	7,327	3,83	0,762	4,592
3х10+1х6	3,87	0,738	4,608	2,28	0,665	2,945
3х16+1х10	2,42	0,564	2,984	1,44	0,489	1,929
3х25+1х16	1,55	0,477	2,027	0,918	0,412	1,33
3х35+1х16	1,11	0,405	1,515	0,657	0,357	1,014
3х50+1х25	0,775	0,320	1,095	0,458	0,275	0,733
3х70+1х25	0,555	0,282	0,837	0,329	0,247	0,576
3х95+1х35	0,408	0,253	0,661	0,242	0,217	0,459
3х120+1х35	0,324	0,237	0,561	0,191	0,202	0,393
3х150+1х35	0,258	0,193	0,451	0,154	0,166	0,320
3х185+1х50	0,210	0,18	0,39	0,124	0,155	0,279

Таблица 14

Сечение фазной жилы кабеля, мм ²	Ток однофазного КЗ, А							
	100	200	300	400	600	800	1500	3000
	Размер полосы, мм							
6	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-	-	-
10	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-	-
16	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	25x3	-
25	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	25x3	-
35	60x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	40x4	-
50	80x4	80x4	60x4	60x4	60x4	60x4	40x4	40x4
70	-	-	-	80x4	60x4	60x4	60x4	60x4
95	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4	80x4
120	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4	80x4
150	-	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4
185	-	-	-	-	-	80x4	80x4	80x4
240	-	-	-	-	-	-	-	80x4

Таблица 15

Полное расчетное сопротивление цепи фаза трехжильного кабеля
с алюминиевыми жилами – обрамление кабельного канала
из угловой стали 50x50x5

Сечение кабеля, мм ²	Сопротивление, Ом/км							
	Ток однофазного КЗ, А							
	100	200	300	500	600	700	1000	2500
3x6	7,46	7,37	7,26	7,11	-	-	-	-
3x10	4,87	4,78	4,67	4,52	4,49	-	-	-
3x16	3,43	3,34	3,23	3,08	3,05	3,02	2,09	-
3x25	2,57	2,48	2,37	2,22	2,19	2,16	2,13	-
3x35	2,15	2,06	1,91	1,80	1,77	1,74	1,71	1,67
3x50	1,85	1,76	1,65	1,50	1,47	1,44	1,41	1,37
3x70	1,66	1,57	1,46	1,31	1,28	1,25	1,22	1,18
3x95	1,55	1,46	1,35	1,20	1,17	1,14	1,11	1,07
3x120	1,50	1,41	1,30	1,15	1,12	1,09	1,06	1,02
3x150	1,46	1,37	1,26	1,11	1,08	1,05	1,02	0,98
3x185	1,44	1,35	1,24	1,09	1,06	1,03	1,00	0,96
3x240	1,42	1,33	1,22	1,07	1,04	1,01	0,98	0,94

Таблица 16

Полное расчетное сопротивление цепи фазная жила кабеля
с алюминиевыми жилами – металлоконструкции из спаренной угловой стали

Сечение кабеля, мм ²	Расстояние между кабелем и фермой, м	Сопротивление, Ом/км					
		Размер угловой стали, мм					
		2(75x75x8)			2(100x100x3) 2(100x100x10)		
		Ток однофазного КЗ, А					
		100	500	1000, 2500	200	500	1000, 2500
3x6	0,2	7,06	6,9	-	6,9	6,81	-
	2	7,09	6,93	-	6,93	6,84	-
3x10	0,2	4,49	4,32	-	4,32	4,23	-
	2	4,54	4,37	-	4,37	4,28	-
3x16	0,2	2,95	2,89	-	2,88	2,79	-
	2	3,04	2,97	-	2,95	2,86	-
3x25	0,2	2,2	2,03	1,92	2,02	1,93	1,84
	2	2,31	2,13	2,03	2,12	2,03	1,94
3x35	0,2	1,78	1,6	1,5	1,6	1,51	1,42
	2	1,91	1,73	1,63	1,72	1,63	1,54
3x50	0,2	1,48	1,30	1,19	1,29	1,2	1,1
	2	1,63	1,45	1,35	1,44	1,35	1,26
3x70	0,2	1,28	1,1	0,99	1,09	1,00	0,9
	2	1,45	1,27	1,17	1,26	1,17	1,08
3x95	0,2	1,15	0,97	0,87	0,95	0,87	0,78
	2	1,34	1,17	1,06	1,15	1,06	0,98
3x120	0,2	1,07	0,9	0,79	0,89	0,79	0,7
	2	1,27	1,1	1,0	1,09	1,0	0,91
3x150	0,2	1,02	0,84	0,74	0,82	0,74	0,65
	2	1,22	1,05	0,96	1,04	0,95	0,87
3x185	0,2	0,98	0,8	0,7	0,79	0,7	0,61
	2	1,19	1,02	0,92	1,01	0,92	0,84
3x240	0,2	0,93	0,76	0,66	0,75	0,65	0,57
	2	1,15	0,98	0,89	0,97	0,89	0,81

Таблица 17

Полное расчетное сопротивление цепи фаза трехжильного кабеля
с алюминиевыми жилами – двутавровая балка

Сечение кабеля, мм ²	Расстояние между кабелем и фермой, м	Сопротивление, Ом/км								
		Размер балки, мм								
		120x75x5, 120x64x4,8			450x160x8,6			600x190x11,1		
		Ток однофазного КЗ, А								
		100	200, 300	600, 800	1200, 1500	300	400, 500	1000, 3000	400	700, 3000
3x6	1	6,91	7,17	-	-	6,7	-	-	6,62	-
	5	6,93	7,20	-	-	3,76	-	-	6,64	-
3x10	1	4,34	4,61	4,48	-	4,13	4,19	-	4,04	-
	5	4,39	4,66	4,52	-	4,16	4,22	-	4,07	-
3x16	1	2,92	3,20	3,06	-	2,69	2,75	-	2,59	2,67
	5	2,98	3,26	3,12	-	2,75	2,81	-	2,64	2,72
3x25	1	2,09	2,37	2,23	-	1,85	1,91	1,87	1,74	1,82
	5	2,17	2,46	2,32	-	1,93	1,99	1,95	1,81	1,89
3x35	1	1,68	1,97	1,82	-	1,43	1,49	1,45	1,32	1,41
	5	1,79	2,07	1,93	-	1,53	1,59	1,55	1,41	1,50
3x50	1	1,39	1,68	1,53	-	1,14	1,20	1,16	1,01	1,11
	5	1,52	1,80	1,66	-	1,26	1,32	1,28	1,12	1,23
3x70	1	1,21	1,49	1,35	1,21	0,95	1,01	0,97	0,82	0,92
	5	1,35	1,62	1,49	1,35	1,09	1,15	1,11	0,95	1,06
3x95	1	1,1	1,38	1,24	1,1	0,84	0,90	0,86	0,7	0,81
	5	1,25	1,52	1,38	1,25	0,99	1,05	1,01	0,85	0,95
3x120	1	1,03	1,31	1,17	1,03	0,77	0,83	0,79	0,64	0,74
	5	1,19	1,45	1,32	1,19	0,93	1,00	0,96	0,8	0,9
3x150	1	0,98	1,26	1,12	0,98	0,72	0,79	0,75	0,58	0,69
	5	1,14	1,41	1,28	1,14	0,89	0,96	0,92	0,75	0,86
3x185	1	0,94	1,22	1,08	0,94	0,69	0,75	0,71	0,55	0,66
	5	1,11	1,37	1,24	1,11	0,86	0,93	0,89	0,73	0,83
3x240	1	0,91	1,18	1,04	0,91	0,65	0,72	0,68	0,52	0,62
	5	1,08	1,32	1,21	1,08	0,83	0,89	0,85	0,7	0,8

6 Расчетные сопротивления шинопроводов

Активное сопротивление шин подсчитывается по формуле (4). В табл. 20 представлены значения активного сопротивления плоских шин при 70°C.

Внутреннее индуктивное сопротивление шин из алюминия и меди при расчетах обычно не учитывается ввиду его небольшой величины.

Для подсчета сопротивлений открытых 4-проводных шинопроводов активное сопротивление цепи фаза – нулевая шина принимается по табл. 20, а внешнее индуктивное сопротивление подсчитывается по формуле [5]

$$X' = 0,29 \cdot \lg \frac{d}{g_0}, \quad (6)$$

где d – расстояние между шинами, м; g_0 – среднее геометрическое расстояние площади сечения фазы от самой себя для одиночной шины, м.

Для шины прямоугольного сечения со сторонами b и h , м

$$g_0 = 0,2235(b + h). \quad (7)$$

Для шины квадратного сечения со стороной $b = h$, м

$$g_0 = 0,44705 \cdot b. \quad (8)$$

Для трубчатой шины квадратного сечения

$$g_0 = 0,68 \cdot C \cdot v_n, \quad (9)$$

где v_n – наружная (внешняя) сторона квадратного сечения, м; C – коэффициент, определяемый по табл. 18.

Таблица 18

Отношение внутренней и внешней сторон трубы квадратного сечения	Значение коэффициента C
0,0	0,7788
0,1	0,7825
0,2	0,7930
0,3	0,8087
0,4	0,8286
0,5	0,8519
0,6	0,8778
0,7	0,9058
0,8	0,9358
0,9	0,9672
1,0	1,00

Таблица 19

Значения средних геометрических расстояний для наиболее часто употребляемых пакетов шин с зазорами между шинами, равными толщине шины, приведены в табл. 18

Сечение пакета, мм ²	Среднее геометрическое расстояние площади сечения пакета от самой себя, см
2(80x10)	1,53
2(100x10)	3,0
2(120x10)	3,45
3(80x10)	2,99
3(100x10)	3,50
3(120x10)	3,95

Таблица 20

Активные сопротивления плоских шин, Ом/км

Размер, мм	Алюминиевые		Медные	
	Ток			
	постоянный	переменный	постоянный	переменный
25х3	0,476	0,485	0,288	0,305
30х4	0,297	0,312	0,181	0,203
40х4	0,222	0,245	0,136	0,18
40х5	0,178	0,2	0,108	0,13
50х5	0,143	0,162	0,087	0,106
50х6	0,118	0,138	0,0725	0,0905
60х6	0,099	0,118	0,0603	0,078
60х8	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80х6	0,0742	0,0895	0,0454	0,0588
80х8	0,0558	0,069	0,034	0,0457
80х10	0,0446	0,0574	0,0271	0,0374
100х6	0,0592	0,0735	0,0362	0,0476
100х8	0,0446	0,0566	0,0271	0,0372
100х10	0,0357	0,0462	0,0194	0,0302
120х8	0,037	0,0476	0,0226	0,0314
120х10	0,0296	0,0384	0,0181	0,0253

При применении 3-проводного открытого шинопровода в качестве нулевого проводника обычно используются металлоконструкции здания или специально проложенные стальные полосы.

Точный подсчет внешнего индуктивного сопротивления в этом случае очень затруднен, особенно когда в качестве «нуля» используются металлоконструкции здания. Для приближенного определения внешнего индуктивного сопротивления рекомендуется пользоваться кривыми рисунка 1 и таблицей 9. Сопротивление определяется по максимальному сечению проводника, приведенному в кривых, независимо от сечения шины открытого шинопровода, а также конструкции и сечения нулевого проводника.

Для облегчения определения полного расчетного сопротивления цепи фаза-нуль открытых 3- и 4-проводных алюминиевых шинопроводов приведены в табл. 21, 22, 23 (на основании [7]).

Методика расчета активного и внутреннего сопротивлений нулевых проводников, выполненных из стали, приводится в разделе 7.

Значения сопротивлений для шинопроводов принимались по данным ЦПКБ треста Электромонтажконструкция, номенклатуры ГЭМ и заводов-изготовителей шинопроводов.

Таблица 21

Полное расчетное сопротивление цепи фаза-нуль открытых
4-проводных шинопроводов, выполненных алюминиевыми шинами

Размер фазных и нулевых шин, мм	Сопротивление, Ом/км	
	Расстояние между нулевой шиной и крайней фазной шиной, мм	
	200	750
30x4	0,79	0,90
30x5	0,69	0,81
40x4	0,66	0,78
40x5	0,59	0,72
50x4	0,57	0,7
50x5	0,52	0,66
60x5	0,47	0,61
60x6	0,44	0,59
80x6	0,39	0,54
80x8	0,36	0,52
100x6	0,34	0,50
100x8	0,33	0,48
100x10	0,32	0,43

Таблица 22

Полное расчетное сопротивление цепи 3-проводная открытая магистраль –
металлоконструкция из спаренной угловой стали

Сечение магистралей, мм	Расстояние между фермой и наиболее удаленной фазной шиной, м	Сопротивление, Ом/км			
		Размер фермы, мм			
		2(75x75x8)		2(100x100x8)	
		Ток однофазного КЗ, А			
		1000	1250-2500	1000	1250-2500
3(40x4)	0,2	0,72	0,69	0,63	0,80
	2	0,93	0,91	0,85	0,82
3(50x5)	0,2	0,65	0,62	0,56	0,53
	2	0,88	0,85	0,80	0,77
3(60x6)	0,2	0,6	0,57	0,51	0,49
	2	0,84	0,81	0,76	0,74
3(80x6)	0,2	0,57	0,54	0,48	0,46
	2	0,81	0,79	0,73	0,71
3(100x6)	0,2	0,55	0,52	0,46	0,45
	2	0,79	0,77	0,71	0,69
3(100x8)	0,2	0,54	0,51	0,45	0,43
	2	0,78	0,76	0,70	0,68
3(100x10)	0,2	0,53	0,50	0,44	0,42
	2	0,78	0,75	0,70	0,68

Таблица 23

Полное сопротивление цепи 3-проводная открытая магистраль – подкрановая балка из двутавровой стали

Сечение магистрали, мм	Расстояние между балкой и наиболее удаленной фазной шиной, м	Сопротивление, Ом/км			
		Размер стального профиля, мм			
		450x160x8,6		600x190x11,1	
		Ток однофазного КЗ, А			
		1000	1500-3000	1000	2000-3000
3(40x4)	1	0,71	0,68	0,66	0,63
	5	0,87	0,85	0,83	0,80
3(50x5)	1	0,64	0,62	0,60	0,57
	5	0,82	0,80	0,78	0,75
3(60x6)	1	0,61	0,58	0,57	0,54
	5	0,79	0,76	0,75	0,72
3(80x6)	1	0,58	0,55	0,54	0,51
	5	0,76	0,74	0,73	0,70
3(100x6)	1	0,56	0,53	0,52	0,49
	5	0,74	0,72	0,71	0,68
3(100x8)	1	0,55	0,53	0,51	0,48
	5	0,73	0,71	0,70	0,67
3(100x10)	1	0,54	0,52	0,50	0,48
	5	0,73	0,71	0,69	0,67

Сопротивления шинопроводов

Тип шинопровода	Ном. ток, А	Конструкция нулевого токопровода	Сопротивление фазная шина – нуль, Ом/км					
			активное r		индуктивное x		Z_ϕ	Z_Σ
			фаза r_ϕ	нуль r_0	фаза x_ϕ	нуль x_0		
ШМА59-НУЗ	2500	Два опорных алюминиевых уголка	0,032	0,07	0,084	0,046	-	0,165
ШМА59-НУЗ	4000		0,017	0,07	0,084	0,046	-	0,16
ШМА68-НУЗ	1600		0,034	0,111	0,023	0,212	-	0,276
ШМА68-НУЗ	2500		0,02	0,07	0,02	0,046	-	0,111
ШМА68-НУЗ	4000		0,013	0,07	0,015	0,046	-	0,12
ШМА16УЗ	1000	Боковые профили	0,059	-	0,009	-	0,059	0,125
ШМА16УЗ	1600		0,03	0,037	0,014	0,041	0,033	0,087
ШМА73УЗ	1600		0,031	0,041	0,017	0,081	-	0,123
ШМА73ПУЗ	1600		0,037	0,049	0,02	0,1	-	0,148
ШМА73Уз	1000		0,058	0,037	0,05	0,091	-	0,096
ШРА73УЗ ШРА73-ВУЗ	250	Нулевая шина внутри кожуха	0,21	0,12	0,21	0,207	-	0,55
ШРА73УЗ	400		0,15	0,162	0,17	0,164	-	0,49
ШРА73УЗ	600		0,1	0,162	0,13	0,164	-	0,29
ШРП УЗ	250		0,21	-	0,21	-	0,3	0,4
ШРП УЗ	400		0,15	-	0,17	-	0,23	0,35
ШРП УЗ	630		0,08	-	0,11	-	0,14	0,162
ШРМ-75УЗ	100		0,52	-	0,07	-	0,525	1,07
ШТМ-76УЗ	100		0,4	-	0,42	-	0,58	-
ШОС-73УЗ	100		0,52	-	0,07	-	0,525	1,07
ШОС-80УЗ	160		5,4	5,4	0,05	0,05	5,4	5,4
ШТА-75УЗ	250	Боковые планки с шинами	0,474	-	0,15	-	0,498	-
ШТА-75УЗ	400		0,217	-	0,17	-	0,254	-
ШТМ-73УЗ	250		0,315	-	0,18	-	0,36	-
ШТМ-72УЗ	400		0,197	-	0,12	-	0,23	-
ШТ-АУ2 ШТ-АОУ2	250	-	0,2	-	0,21	-	0,29	-

7 Расчетные сопротивления стальных проводников

Особенностью стальных проводников является относительно низкая удельная проводимость и нелинейная зависимость проводимости при переменном токе, на которую влияет плотность тока и отношение периметра к сечению. Проводимость возрастает с увеличением плотности тока (А/мм^2) и имеет относительно большие значения с увеличением отношения периметра к сечению.

Чем больше это последнее отношение, тем меньше оказывается влияние поверхностного эффекта.

Несмотря на низкую проводимость, стальные проводники используются в качестве заземляющих проводников для коротких расстояний. В основном, для целей заземления используется полосовая сталь, имеющая по сравнению с круглой большее

отношение периметра к сечению, то есть большую проводимость при том же сечении, а также стальные трубы при прокладке в них проводов.

Активное сопротивление

В настоящее время в зависимости от условий прокладки и класса помещений по взрывопожароопасности для электропроводок применяются водогазопроводные трубы по ГОСТ 3262-75 и тонкостенные сварные трубы по ГОСТ 10704-76.

Сравнивая сопротивления стальных труб при одинаковой плотности тока, можно видеть, что они имеют большое различие (см. табл. 26, 27).

Однако, при определении их сопротивления при одинаковом токе это различие незначительно и не превышает 7%.

Эта погрешность, учитывая приближенность исходных данных, лежит в пределах 10% точности, принятых в аналогичных расчетах.

После обработки имеющихся в литературе данных по сопротивлению стальных труб (как расчетных, так и экспериментальных) на рис. 2 приведены универсальные кривые для определения активного сопротивления стальных труб с одинаковыми условными проходами для всех сортов, которые применяются в настоящее время для электропроводок.

В табл. 25 приведены сопротивления электропроводок в стальных трубах. В этой таблице для определения сопротивления стальных труб использовались кривые рис. 2, а их сопротивление определялось при токе однофазного КЗ, обеспечивающим надежное срабатывание защитного аппарата (автомата с комбинированным расцепителем), установленного в начале линии. Уставка автомата принималась примерно равной допустимой нагрузке на провод данного сечения.

Если данные табл. 25 для конкретных условий не подходят (например, по сечению проводника), эта цепь должна быть пересчитана для конкретных условий по табл. 7 и рис. 2.

Могут встретиться случаи, когда по кривым рис. 2 нельзя определить сопротивление трубы при больших токах. В этом случае допустимо принимать значение по последней точке кривой. Погрешность будет невелика и допустима в такого рода расчетах.

Кривые активных сопротивлений стальных полос круглой и профильной стали (рис. 3, 4, 5) построены по данным [15].

Кривые для близких по сечению стальных полос (например, 100х6 и 100х8) являются общими, хотя их сопротивления несколько различны при одинаковой плотности тока, но почти одинаковые при одном и том же расчетном токе.

На всех кривых рис. 2-5 для стальных проводников указаны только активные сопротивления. Внутреннее индуктивное сопротивление (X'' , Ом/км) находится из соотношения

$$X'' = 0,6 \cdot R_{\omega}, \quad (10)$$

при этом

$$Z = \sqrt{X''^2 + R_{\omega}^2} = \sqrt{(0,6 \cdot R_{\omega})^2 + R_{\omega}^2} = 1,165 \cdot R_{\omega}. \quad (11)$$

В случае использования в качестве нулевых проводников строительных металлоконструкций любой конфигурации (подкрановые пути, фермы, колонны) их сопротивление определяется по кривым рис. 6 или по табл. 27. 28. 29.

Кривые на рис. 6 приведены для $t=20^{\circ}\text{C}$. При необходимости пересчета на другие температуры величина активного сопротивления (Ом/км) определяется по формуле:

$$R_{ок} = R_{он} [1 + 0,003(t^{\circ} - 20)], \quad (12)$$

где $R_{он}$ — сопротивление проводника по кривым рис. 6, Ом/км.

Аналогично пересчитывается и величина внутреннего индуктивного сопротивления X'' .

Универсальные кривые для
определения активного сопротивления
стальных труб (R_w)

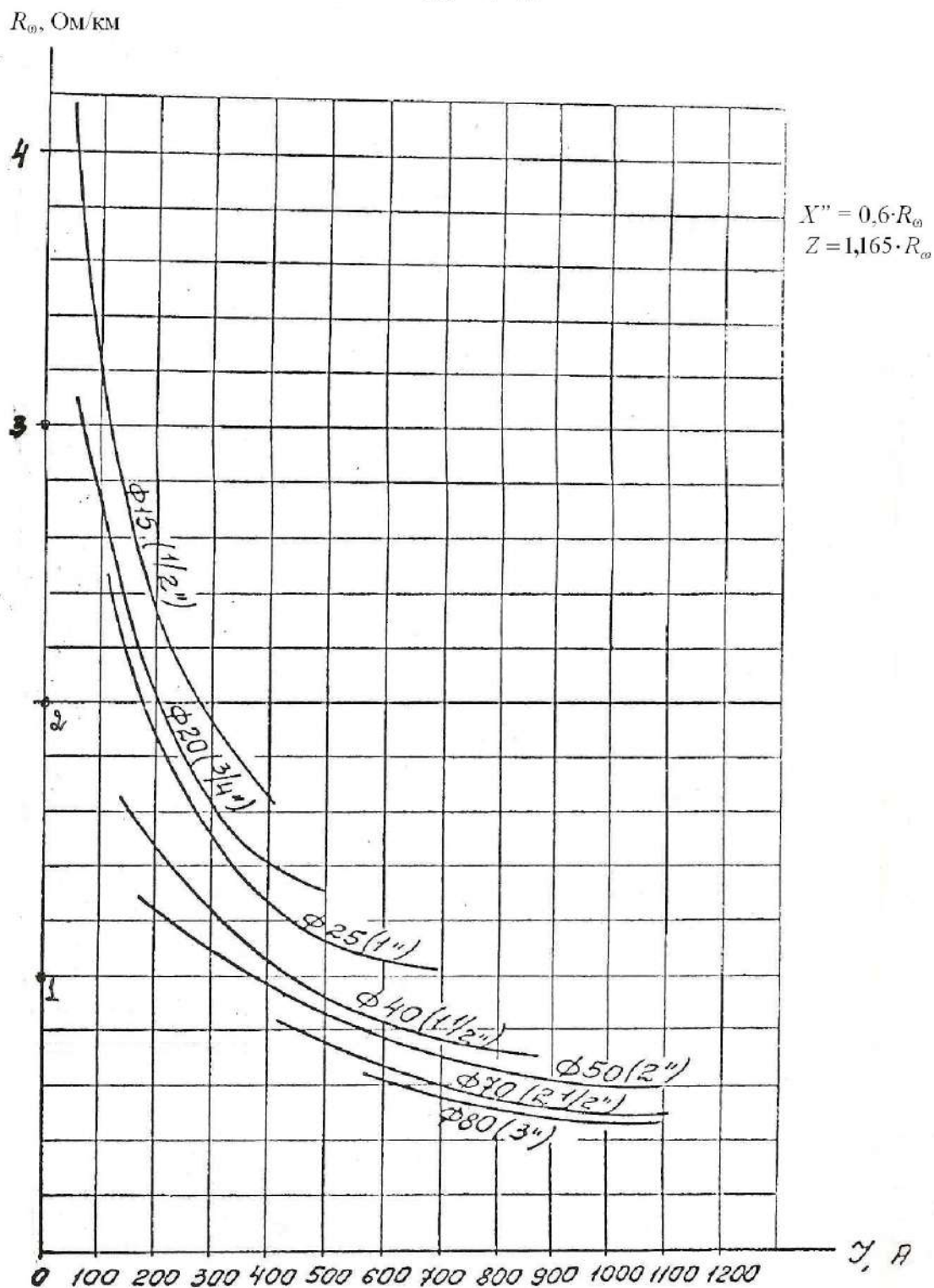


Рис. 2

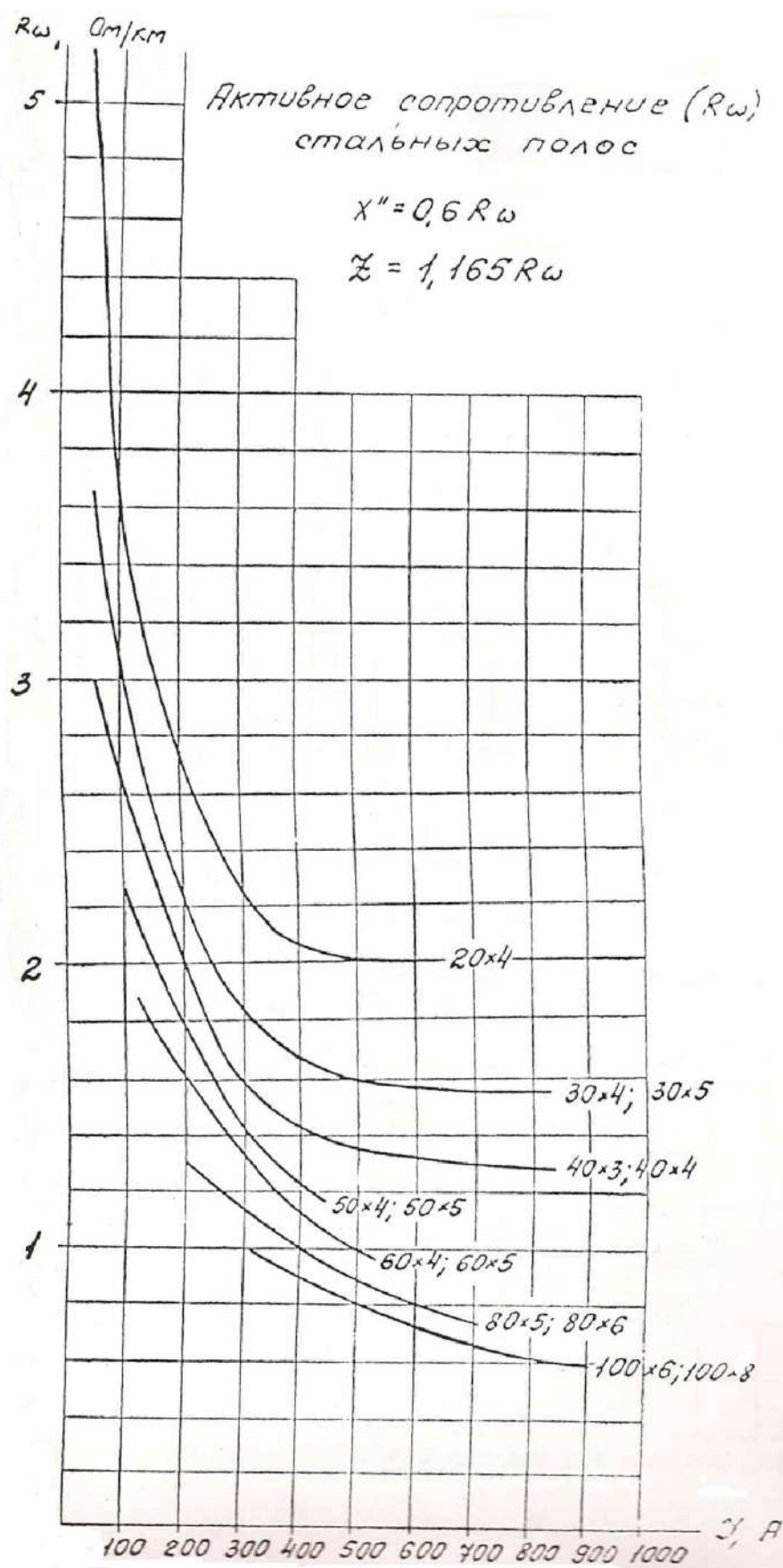


Рис. 3

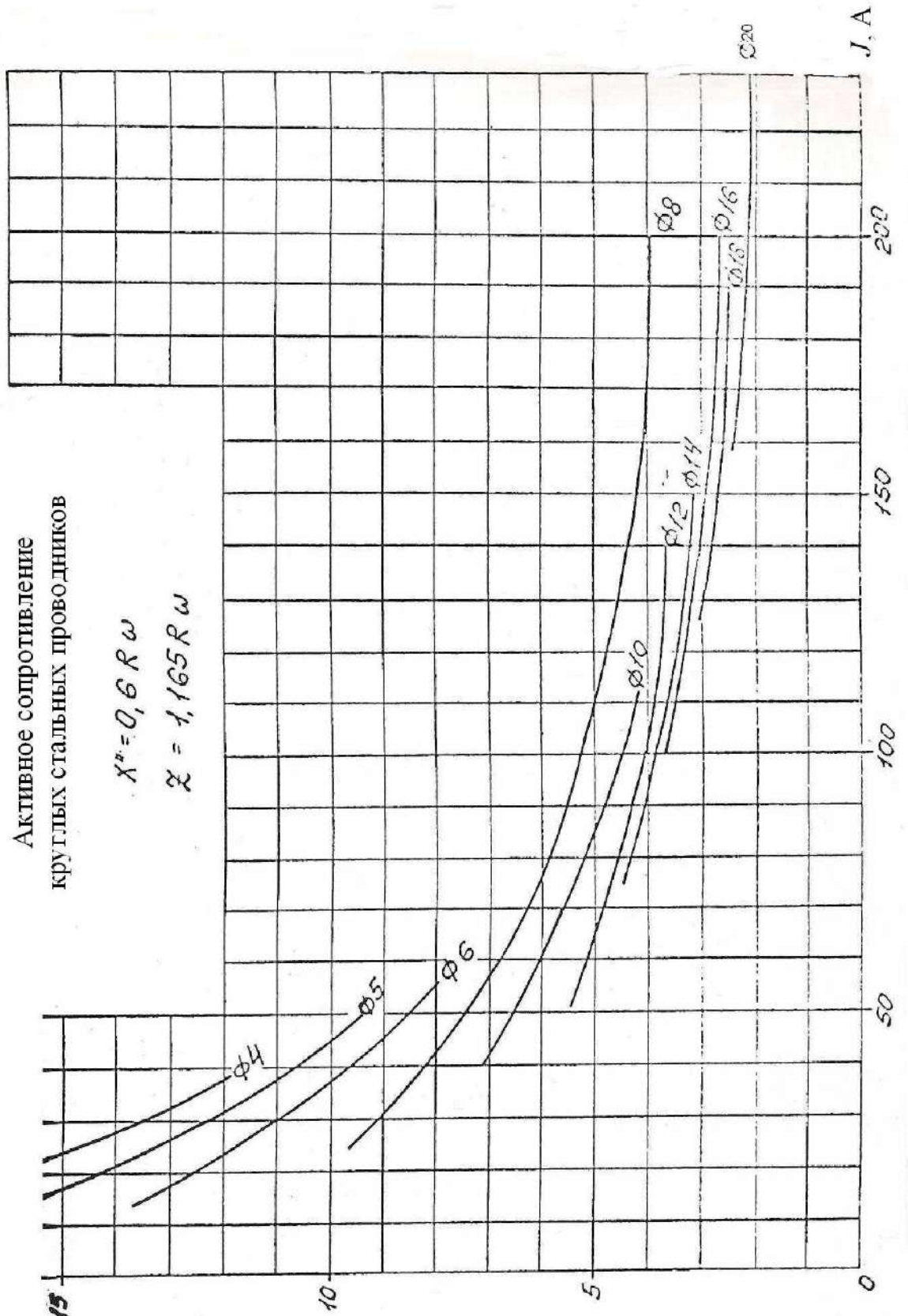


Рис. 4

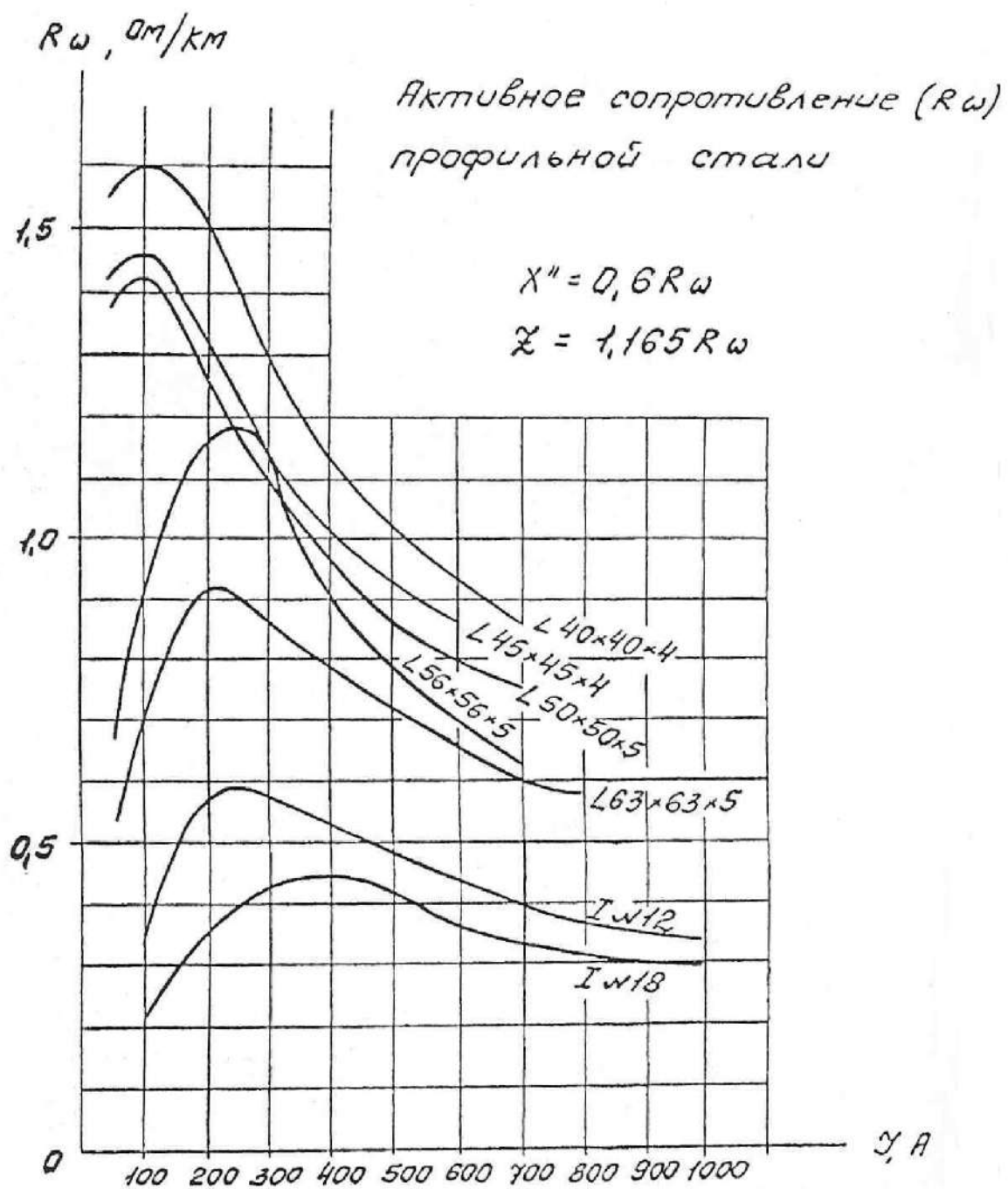
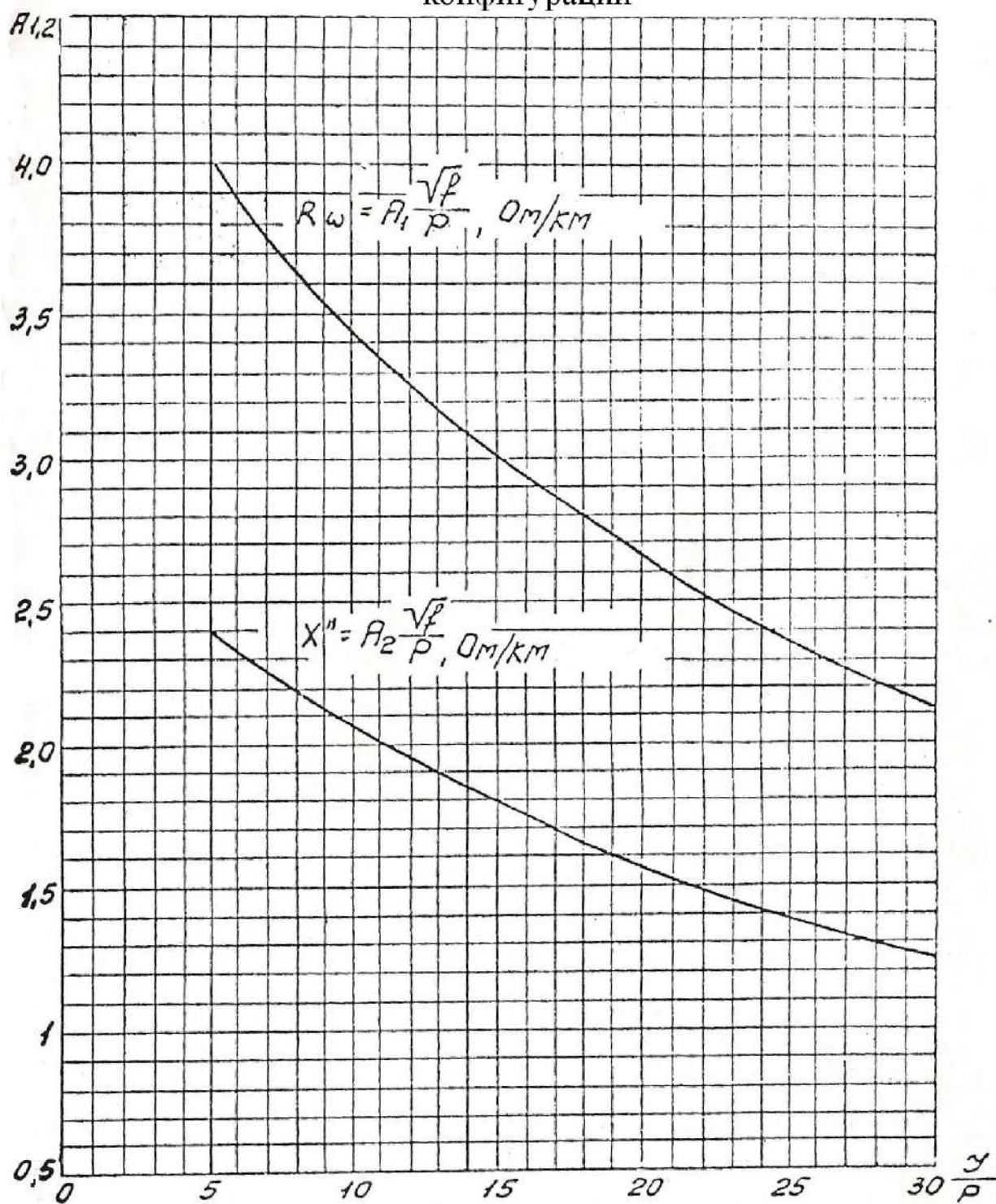


Рис. 5

Универсальные кривые для определения
активного R_{ω} и внутреннего индуктивного X''
сопротивлений стальных проводников любой
конфигурации



R_{ω} - активное сопротив-
ление, Ом/км;

X'' - внутреннее индук-
тивное сопротив-
ление, Ом/км;

ρ - периметр, см;

f - частота, Гц;

J - ток, А;

$A_{1,2}$ - условная величина

Кривые даны для $t = 20^\circ\text{C}$

Таблица 25

Расчетное сопротивление цепи
фазный алюминиевый провод – стальная труба

Три одножил- ных провода сечением, мм ²	Условный проход трубы		Сопротивление, Ом/км					Расчетный ток одно- фазного КЗ, А
	мм	дюйм	фазного провода r_{ϕ}	трубы R_{ω}	$r_{\phi} + R_{\omega}$	$X'' =$ $=0,6 \cdot$ R_{ω}	Z_{Σ}	
2,5	15	1/2	15	4,04	19,04	2,42	19,2	50
	20	3/4	15	3,1	18,1	1,86	18,25	
4	15	1/2	9,36	3,1	12,46	1,86	12,6	100
	20	3/4	9,36	2,68	12,04	1,6	12,15	
6	15	1/2	6,25	2,6	8,85	1,56	8,9	150
	20	3/4	6,25	2,3	8,55	1,38	8,64	
10	20	3/4	3,74	2,3	6,04	1,38	6,15	150
16	25	1	2,34	1,5	3,84	0,9	3,94	300
25	25	1	1,5	1,15	2,65	0,69	2,74	400
35	40	1 1/2	1,07	1,05	2,12	0,63	2,2	400
50	40	1 1/2	0,75	1,05	1,8	0,63	1,9	400
70	50	2	0,536	0,85	1,386	0,51	1,48	500
95	70	2 1/2	0,395	0,54	0,935	0,32	0,986	800
120	70	2 1/2	0,313	0,54	0,853	0,32	0,915	800
150	70	2 1/2	0,25	0,50	0,75	0,30	0,81	1000
	80	3	0,25	0,45	0,70	0,27	0,75	
180	80	3	0,203	0,45	0,653	0,27	0,7	1000

Таблица 26

Сопротивление водогазопроводных труб по ГОСТ 3562-75

Условный проход, мм ²	Площадь сечения, мм ²	Сопротивление, Ом/км								
		Плотность тока, А/мм ²								
		0,5			1,0			1,5		
		R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}
15	160	3,41	2,05	3,98	2,55	1,53	2,97	2,06	1,24	2,40
20	207	2,67	1,60	3,11	2,02	1,21	2,35	1,59	0,95	1,85
25	309	2,02	1,21	2,36	1,45	0,87	1,69	1,14	0,68	1,33
32	399	1,58	0,95	1,84	1,12	0,67	1,31	-	-	-
40	489	1,32	0,78	1,54	0,93	0,56	1,08	-	-	-
50	625	1,07	0,64	1,25	0,76	0,45	0,89	-	-	-
70	845	0,84	0,50	0,98	0,59	0,35	0,69	-	-	-
80	1120	0,67	0,40	0,78	0,48	0,29	0,56	-	-	-

Таблица 27

Соппротивление стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-76

Размер, мм	Площадь сечения, мм ²	Соппротивление, Ом/км											
		Плотность тока, А/мм ²											
		1,0			1,5			2,0			3,0		
		R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$
20x1,6	92,5	3,38	2,03	3,94	2,84	1,71	3,31	2,42	1,45	2,82	2,14	1,29	2,52
26x1,8	136,8	2,47	1,48	2,88	2,05	1,23	2,39	1,73	1,04	2,01	1,64	0,98	1,91
32x2	170,5	1,99	1,19	2,32	1,65	0,99	1,92	1,40	0,84	1,63	-	-	-
47x2	282,6	1,30	0,78	1,51	1,05	0,63	1,23	0,95	0,57	1,10	-	-	-
59x2	358	1,02	0,62	1,19	0,83	0,50	0,97	0,75	0,45	0,87	-	-	-

Таблица 28

Соппротивление стальных полос

Размер, мм	Соппротивление, Ом/км											
	Плотность тока, А/мм ²											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$	R_{ω}	X''	$Z_{ц}$
20x4	5,24	3,14	6,10	4,20	2,52	4,90	3,48	2,09	4,05	2,97	1,78	3,46
30x4	3,66	2,20	4,25	2,91	1,75	3,39	2,38	1,43	2,78	2,04	1,22	2,33
30x5	3,38	2,03	3,94	2,56	1,54	2,99	2,08	1,25	2,42	-	-	-
40x3	3,05	1,83	3,56	2,54	1,52	2,96	2,12	1,27	2,48	1,81	1,08	2,11
40x4	2,80	1,68	3,26	2,24	1,34	2,61	1,81	1,09	2,11	1,54	0,92	1,80
50x4	2,28	1,37	2,66	1,79	1,07	2,09	1,45	0,87	1,69	1,24	0,74	1,45
50x5	2,10	1,26	2,45	1,60	0,96	1,87	1,28	0,77	1,49	-	-	-
60x4	1,91	1,15	2,22	1,50	0,90	1,75	1,22	0,73	1,42	1,04	0,62	1,22
60x5	1,77	1,06	2,06	1,34	0,80	1,56	1,08	0,65	1,26	-	-	-
80x5	1,34	0,81	1,56	1,04	0,62	1,22	0,82	0,49	0,96	-	-	-
80x6	1,26	0,76	1,47	0,91	0,55	1,06	0,75	0,45	0,87	-	-	-
100x6	1,02	0,61	1,19	0,73	0,44	0,85	0,60	0,36	0,70	-	-	-
100x8	0,90	0,54	1,05	0,62	0,37	0,72	-	-	-	-	-	-

Таблица 29

Диаметр, мм	Площадь сечения, мм ²	Сопротивление, Ом/км											
		Плотность тока, А/мм ²											
		0,5			1,0			1,5			2,0		
		R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}
5	20	17,0	10,2	19,8	14,4	8,65	16,75	12,4	7,45	14,4	10,7	6,4	12,5
6	28	13,7	8,2	16,0	11,2	6,7	13,1	9,4	5,65	10,9	8,0	4,8	9,3
8	50	9,6	5,75	11,2	7,5	4,5	8,74	6,4	3,84	7,45	5,3	3,2	6,2
10	79	7,2	4,32	8,4	5,4	3,24	6,3	4,2	2,52	4,9	-	-	-
12	113	5,6	3,36	6,54	4,0	2,4	4,66	-	-	-	-	-	-
14	154	4,55	2,73	5,3	3,2	1,92	3,74	-	-	-	-	-	-
16	201	3,72	2,23	4,34	2,7	1,6	3,1	-	-	-	-	-	-
18	255	3,18	1,91	3,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	314	2,68	1,61	3,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 30

Размер, мм	Сопротивление, Ом/км														
	100 А			200 А			400 А			600 А			800 А		
	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}	R_{ω}	X''	Z_{Σ}
Угловая															
40x40x4	1,6	1,04	1,91	1,5	0,92	1,76	1,12	0,7	1,32	0,92	0,59	1,09	-	-	-
45x45x4	1,46	0,86	1,69	1,32	0,78	1,53	1,0	0,56	1,15	0,86	0,47	0,98	-	-	-
50x50x5	1,42	0,68	1,57	1,27	0,68	1,43	0,98	0,54	1,12	0,78	0,44	0,89	-	-	-
63x63x5	0,68	0,38	0,78	0,92	0,56	1,07	0,8	0,46	0,92	0,66	0,36	0,75	0,58	0,32	0,66
Двухавровая															
№ 12	0,34	0,16	0,38	0,57	0,32	0,65	0,53	0,28	0,58	0,44	0,24	0,5	0,37	0,22	0,43
№ 18	0,21	0,09	0,25	0,35	0,18	0,39	0,45	0,29	0,54	0,33	0,24	0,45	0,31	0,2	0,37

8 Активные сопротивления переходных контактов

При определении полного сопротивления цепи фаза-нуль по формуле (2) необходимо учитывать не только активное и индуктивное сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, но и активные сопротивления всех переходных контактов в этой цепи (на шинах, на вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов, сопротивление дуги в месте КЗ, а также сопротивления катушек расцепителей автоматов и первичных обмоток трансформаторов тока).

К сожалению, до настоящего времени нет единой расчетной методики учета переходных сопротивлений в сетях 0,4 кВ. Более того, ГОСТами и ТУ на выключатели, разъединители и переключатели (например ГОСТ 2327-76) значения активных сопротивлений главных контактов не нормируются и при производстве изделий не контролируются.

Для практических расчетов рекомендуется пользоваться таблицами 32-36, в которых приведены сопротивления элементов аппаратов по данным заводоизготовителей.

При отсутствии таких данных допустимо пользоваться табл. 31, где приведены усредненные сопротивления катушек расцепителей и главных контактов автоматов и рубильников по [11], [12].

Таблица 31

Сопротивления катушек расцепителей и главных контактов автоматов и рубильников, мОм

Номинальный ток, А	Катушки расцепителей автоматов		Контакты, r	
	r при 65°C	x при 65°C	Автоматы	Рубильники
50	5,5	27	1,3	-
70	2,35	1,3	1,0	-
100	1,3	0,85	0,75	0,5
140	0,74	0,55	0,65	-
200	0,36	0,28	0,6	0,4
400	0,15	0,1	0,4	0,2
600	0,12	0,084	0,25	0,15
1000	0,1	0,08	0,12	0,08
1500-2500	0,06	0,05	0,05	0,04

Для автоматов типа «Электрон» по данным завода «Контактор» сопротивление одного полюса (совместно с втычным контактом) ориентировочно можно принимать по табл. 32.

Таблица 32

Тип выключателя	Номинальный ток, А	Сопротивление полюса, мОм	
		r активное	x индуктивное
Э-06	630	0,25	0,15
Э-10	1000	0,15	0,076
Э-16	1600	0,16	0,061
Э-25	2500	0,12	0,05
Э-40	4000	0,08	0,04

Данные приведены по письму завода «Контактор» № 38/ЛКИ от 12.05.70 г.

Таблица 33

Сопротивления катушек расцепителей
автоматов АЕ2040М, мОм

Номинальный ток, А	Активное сопротивление r	Индуктивное сопротивление x
0,6	3,96	17,75
0,8	2,34	9,49
1,0	1,71	3,55
1,25	0,942	2,12
1,6	0,73	1,33
2,0	0,411	0,94
2,5	0,305	0,53
3,2	0,173	0,33
4,0	0,121	0,23
5,0	0,065	0,14
6,0	0,051	0,08
8,0	0,036	0,06
10,0	0,025	0,04
12,5	0,014	0,02
16,0	0,0085	0,018
20,0	0,007	0,017
25,0	0,005	0,01

Данные приведены по письму № 11/2-264/178 от 1.04.85 г. Черкесского завода НВА.

Таблица 34

Сопротивления расцепителей и главных контактов автоматов, мОм

Тип автомата	Тип расцепителя	Номинальный ток, А	Сопротивление полюса, мОм	
			r активное	x индуктивное
А3793, А3794	полупроводниковый	250	0,12	0,073
		400	0,12	0,077
		630	0,12	0,030
А3795, А3796	тепловой	250	0,34	0,27
		320	0,335	0,275
		400	0,25	0,235
		500	0,21	0,18
		630	0,155	0,10
ВА51-35, ВА52-37, ВА52-39	тепловой	250	0,35	0,11
		400	0,172	0,104
		630	0,099	0,078
ВА52-35, ВА53-37, ВА53-39, ВА53-41	полупроводниковый	250	0,38	0,13
		400	0,10	0,102
		630	0,068	0,12
		1000	0,077	0,115

Данный приведены по письму № 310-7 от 9.01.86 г. ВНИИ Электроаппарат, г. Харьков.

Таблица 35

Сопротивления главных контактов рубильников и переключателей

Тип аппарата	Номинальный ток, А	Активное сопротивление полюса, мОм
P11	100	0,154
П11, РПЦ11, Р21, П21, Р31	100	0,186
P16, P19	250	0,132
П12, П22, Р22, П32, РПЦ32	250	0,161
РБ, ПБ, РПБ, ППБ, РПЦ, ППЦ	400	0,037
	630	0,027
РЕ19	1000	0,035
	1600	0,03
	2500	0,014
	4000	0,007
	6300	0,006

Данные приведены по письмам № 195 от 25.12.85 г. Корневского завода и № 05/ЗК-2334 от 28.03.85 г. Тростянецкого завода «Электроприбор».

Таблица 36

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока типа ТК, мОм

Номинальный ток, А	ТК-20		ТК-40	
	<i>r</i> активное	<i>x</i> индуктивное	<i>r</i> активное	<i>x</i> индуктивное
5	260	386	660	780
10	60,5	97	165	195
15	26,8	43	73	87
20	15,1	24,2	41	49
30	6,7	10,9	18,3	22
40	3,44	7,5	10,3	12
50	2,5	3,88	6,6	7,8
75	1,1	1,74	2,94	3,5
100	0,625	0,97	1,65	1,95
150	0,275	0,426	0,73	0,86
200	0,136	0,304	0,41	0,49
300	-	-	0,18	0,22
400	-	-	0,131	0,18
600	-	-	0,059	0,082

У трансформатора ТК-20 от 300 А и выше и ТК-40 от 600 А и выше первичной обмоткой служит небольшой отрезок шины, в этом случае индуктивное и активное сопротивления весьма малы.

При подсчете сопротивления контактов необходимо учитывать сопротивление дуги в месте короткого замыкания, величина которого по разным литературным источникам принимается 0,01 Ом [19, 20].

При отсутствии достоверных данных о контактах и их переходных сопротивлениях в [3] рекомендуется при расчете токов КЗ в сетях, питаемых трансформаторами мощностью до 1600 кВ·А включительно, учитывать их суммарное сопротивление введением в расчет активного сопротивления:

- 1) для распределительных устройств на станциях и подстанциях 0,015 Ом;
- 2) для первичных цеховых распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или от главных магистралей 0,02 Ом;
- 3) для вторичных цеховых распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов 0,025 Ом;
- 4) для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов 0,03 Ом.

Однако, как показывают результаты расчетов для конкретных примеров и выводы в [16], вышеприведенные значения переходных сопротивлений контактов являются завышенными, особенно для сетей, питающихся от трансформаторов мощностью выше 1000 кВ·А.

9 Определение границ действия защиты от однофазных КЗ в сети асинхронных электродвигателей с КЗ ротором

ПУЭ, ГОСТ, ССБТ и др. нормативные документы предписывают ряд мер для повышения электро- и взрывобезопасности электроустановок напряжением до 1 кВ.

В соответствии с 7.3.140 ПУЭ требуется проверка полного сопротивления цепи фаза-нуль для всех электроприемников, расположенных во взрывоопасных зонах В-I и В-II и выборочно (но не менее 10% общего количества) для электроприемников, расположенных во взрывоопасных зонах классов В-Iа, В-Iб, В-Iг и В-IIа и имеющих наибольшее сопротивление цепи фаза-нуль.

В настоящее время в литературе отсутствуют сведения о границах действия защиты от однофазных КЗ в зависимости от мощности электродвигателя (или другого электроприемника), а приводятся лишь таблицы, линейки и т.п. для определения границ действия защиты в зависимости от сечения проводов и кабелей [14].

Табл. 37, 38 дают возможность определить границы действия защиты для всей шкалы мощностей асинхронных электродвигателей серии 4А, В, ВА02, Вр при защите линий к электродвигателям автоматическими выключателями с комбинированным расцепителем.

Табл. 39 дает возможность определить границы действия защиты для синхронных двигателей серии 4А, 4АН при защите линий к электродвигателям автоматическими выключателями с электромагнитным расцепителем.

Табл. 38 рассчитана для трансформатора мощностью 1000 кВА со схемой соединения «звезда-звезда 12».

Остальные условия аналогичны приведенным для табл. 37.

Табл. 39 рассчитана для трансформаторов мощностью 1000 кВА со схемами соединений «треугольник-звезда» и «звезда-звезда».

Кабели принимались аналогично табл. 37.

В качестве защитных аппаратов для двигателей мощностью до 55 кВт принимались автоматические выключатели АЕ 2043М, АЕ 2053М, АЕ 2063М с $I_m(I_{отс})=5I_{н.р.}; 12I_{н.р.}$.

Для двигателей свыше 55 кВт принимались автоматы АЗ700 с $I_m(I_{отс})=2500А, 4000А$. Уставки расцепителей автоматов приняты аналогично табл. 37.

Отдельной графой приведены предельные длины при защите линий автоматами АП50Б с $I_m(I_{отс})=10 I_n.p.$ При пользовании табл. 39 необходимо помнить, что установка электромагнитного расцепителя при защите линий к эл. двигателям с КЗ ротором не может быть меньше пускового тока, который обычно равен 6-7-кратному значению номинального тока двигателя.

Табл. 37, 38 наиболее применимы при проектировании производств химической и нефтехимической промышленности с взрывоопасными зонами, где наибольшее распространение получили радиальные схемы распределения Эл. энергии с сетями, имеющими по всей длине неизменное сечение и четвертую жилу кабеля в качестве нулевого проводника, но могут быть распространены и на производства машиностроения и др. отраслей промышленности.

Правила пользования таблицами

1. Определяется суммарное расстояние от источника питания 380/220 В до Эл. двигателя по трассе токопровода независимо от того, подключен ли эл. двигатель непосредственно к распределительному щиту источника питания или питается через промежуточные силовые пункты, ЩСУ, распределительные или магистральные шиннопроводы.

2. В зависимости от зоны, в которой установлен эл. двигатель, и его номинальной мощности по таблице находится критическое расстояние, в пределах которого соблюдаются требования ПУЭ в отношении кратности тока однофазного КЗ. Это расстояние сравнивается с суммарным расстоянием от источника питания до эл. двигателя.

Если длина трассы токопровода меньше или равна критическому расстоянию, то проверочный расчет тока однофазного КЗ для данного эл. двигателя производить не следует, а если больше, то необходим проверочный расчет с учетом конкретных параметров питающей сети.

3. Если проверочный расчет показал, что кратность тока однофазного КЗ недостаточна, необходимо принимать специальные меры. К этим мерам относятся:

- 1) увеличение сечения питающего кабеля;
- 2) проектирование специальной защиты от однофазных замыканий.

Таблицы рассчитаны по формуле [2], [7]:

$$l \geq \frac{1000}{Z_{\text{цу}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ф}}}{I_{\text{к.мин.}}} - \frac{Z_{\text{т}}}{3} \right), \quad (13)$$

где l – предельная длина линии, м; $Z_{\text{цу}}$ – полное удельное сопротивление цепи фаз-нуль, Ом/км; $I_{\text{к.мин.}}$ – минимальный ток однофазного КЗ, А.

Расчет таблицы 37 проводился для следующих условий:

1) источником питания является трансформатор мощностью 1600 кВА со схемой соединений «треугольник-звезда»;

2) уставки автоматов принимались по [10] в соответствии с каталожными данными электродвигателей серии 4А, В, Вр, ВА02 и техническими данными блоков БОУ5030;

3) кабели приняты 4-жильные с пластмассовой или резиновой изоляцией. Сечения кабелей соответствуют номинальному току двигателей при ПВ 100% для однократной прокладки кабелей по табл. 1.3.6, 1.3.7 ПУЭ. Согласно номенклатуре на кабельную продукцию 1985-86 гг. кабели с сечением фазной жилы 70 мм² и более име-

ют сечение нулевой жилы менее 50% сечения фазной жилы. Это дает некоторый запас при определении границ действия защиты в случае применения кабелей с жилами равного сечения:

- 4) сопротивления кабелей принимались по табл. 11;
- 5) переходное сопротивление контактов – 0,02 Ом.

Условные обозначения

$I_{окз}$ – ток однофазного замыкания на землю;

$I_{н.р.}$ – номинальный ток комбинированного расцепителя автомата;

I_m – уставка на ток мгновенного срабатывания электромагнитного расцепителя.

На рис. 7 в качестве примера приведена однолинейная схема сети 0,38 кВ. С помощью таблицы 38 по описанной выше методике можно быстро определить участки сети, для которых необходимо провести полные расчеты тока однофазного КЗ.

Из сравнения критических длин по табл. 38 с длинами линий по однолинейной схеме рис. 7 видно, что суммарная длина токоподвода к эл. двигателям 2М, 3М, 9М, 10М, 19М, 20М больше критической длины. Для этих участков сети и должны быть произведены расчеты тока однофазного замыкания на землю.

Табл. 37-39 могут быть распространены и на случаи, когда питающие трансформаторы имеют мощность более 1000 кВА с любой схемой соединения обмоток, а также когда трансформаторы мощностью 250 кВА и менее имеют схему соединения обмоток «треугольник-звезда» и «звезда-звезда».

Таблица 37

Предельные длины линий к эл. двигателям с КЗ ротором
для проверки кратности тока однофазного КЗ по отношению
к номинальному току расцепителя автомата

Номинальная мощность эл. двигателя, кВт	Критическая длина линии, м			
	алюминиевый кабель			медный ка- бель
	невзрывоопасная зона $I_{окз} = 3I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-Іб, В-Іг $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-ІІ, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-І, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$
0,37	1220	610	509	1030
075	761	380	380	643
1,1	487	243	244	411
1,5	487	243	244	411
2,2	304	152	152	257
3,0	244	122	122	206
4,0	195	97	122	206
5,5	152	76	76	128
7,5	122	61	75	103
11	120	60	93	101
15	117	58	91	98
18,5	146	73	119	123
22	146	73	119	123
30	149	74	118	125
37	237	118	106	158
45	213	106	160	177
55	258	128	141	216
75	177	87	128	147
90	246	121	177	204
110	205	102	138	172
132	220	107	148	184
160	220	107	157	248
200	256	124	172	211
250	222	105	-	-
315	242	115	-	-

Таблица 38

Предельные длины линий к эл. двигателям с КЗ ротором
для проверки кратности тока однофазного КЗ по отношению
к номинальному току расцепителя автомата

Номинальная мощность эл. двигателя, кВт	Критическая длина линии, м			
	алюминиевый кабель			медный ка- бель
	невзрывоопасная зона $I_{окз} = 3I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-Іб, В-Іг $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-ІІ, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$	взрывоопасная зона В-І, В-Іа $I_{окз} = 6I_{н.р.}$
0,37	1218	609	608	1028
0,75	760	375	380	642
1,1	487	243	243	410
1,5	487	243	243	410
2,2	304	152	152	256
3,0	243	121	122	204
4,0	194	97	122	204
5,5	151	76	75	127
7,5	121	61	74	101
11	119	60	92	99
15	115	57	88	96
18,5	144	72	116	119
22	144	72	116	119
30	146	71	112	120
37	231	112	99	149
45	207	99	150	167
55	248	118	111	200
75	167	77	113	110
90	231	106	155	179
110	192	86	117	146
132	198	86	119	147
160	198	86	126	200
200	225	93	129	158
250	179	62	-	-
315	195	68	-	-

Таблица 39

Предельные длины линий к эл. двигателям с КЗ ротором
для проверки кратности тока однофазного КЗ по отношению
к току электромагнитного расцепителя автомата

Номинальная мощность эл. двигателя, кВт	Критическая длина линии, м		
	алюминиевый кабель		
	невзрывоопасная зона		
	$I_M=12I_{н.р.}$	$I_M=5I_{н.р.}$	$I_M=10I_{н.р.}$
	$I_{окз}=1,4I_M$		
0,37	222 / 222	532 / 532	266 / 266
0,75	138 / 138	333 / 333	167 / 167
1,1	88 / 88	213 / 213	107 / 107
1,5	88 / 88	213 / 213	107 / 107
2,2	55 / 55	133 / 133	67 / 67
3,0	44 / 44	106 / 106	53 / 53
4,0	35 / 35	85 / 85	43 / 43
5,5	27 / 27	66 / 66	33 / 33
7,5	22 / 22	53 / 53	27 / 27
11	21 / 21	52 / 51	26 / 25
15	21 / 20	51 / 49	25 / 24
18,5	26 / 24	63 / 61	32 / 30
22	26 / 24	63 / 61	32 / 30
30	26 / 23	64 / 61	-
37	41 / 36	102 / 97	-
45	36 / 31	91 / 86	-
	$I_{окз}=1,25I_M$		
55	43 / 35	110 / 102	-
75	31 / 22	31 / 22	-
90	43 / 30	43 / 30	-
110	45 / 32	45 / 32	-
132	35 / 18	35 / 18	-
160	35 / 18	35 / 18	-

В числителе указаны значения предельных длин при использовании трансформатора со схемой Δ/Y_0 , в знаменателе – со схемой Y/Y_0 .

10. Примеры расчета токов однофазного КЗ

Пример 1

На схеме 1 приведена расчетная схема и форма расчета сети эл. двигателя 2М.

Трансформатор.

Расчетное сопротивление трансформатора

$$Z_T/3 = 0,027 \text{ Ом (табл. 2)}$$

Участок №2.

Кабель ААШвУ 3х95 длиной 120 м.

Удельное сопротивление фазной жилы 0,408 Ом/км (табл. 12).

Удельное сопротивление алюминиевой оболочки 0,321 Ом/км (табл. 12).

Сопротивление в расчете на 120 м:

$$r_\phi = 0,408 \cdot 0,12 = 0,049 \text{ Ом}$$

$$r_n = 0,321 \cdot 0,12 = 0,039 \text{ Ом}$$

Участок №3.

Кабель ААШвУ 3х95+1х35 длиной 150 м.

Удельное сопротивление фазной жилы – то же, что и для участка №1.

Удельное сопротивление нулевой жилы и алюминиевой оболочки 0,253 Ом/км (табл. 13).

Сопротивление в расчете на 150 м:

$$r_\phi = 0,408 \cdot 0,15 = 0,061 \text{ Ом}$$

$$r_n = 0,253 \cdot 0,15 = 0,038 \text{ Ом}$$

Переходное сопротивление контактов – 0,02 Ом.

Индуктивное сопротивление кабелей не учитывается.

Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

$I_k = 940 \text{ А}$, что меньше допустимого.

Для выполнения требований ПУЭ должно быть увеличено сечение кабеля или предусмотрена специальная защита от однофазного КЗ [17], [22].

В данном примере полная проводимость нулевого проводника удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ.

Пример 2

На схеме 2 приведена расчетная схема и форма расчета сети эл. двигателя 3М.

Трансформатор.

Расчетное сопротивление трансформатора – см. пример 1.

Участок №2. Два кабеля ААШвУ-3х95+1х35 длиной 30 м.

Удельное сопротивление фазной жилы 0,408 Ом/км (табл. 13).

Удельное сопротивление нулевой жилы 0,253 Ом/км (табл. 13).

Сопротивление в расчете на 30 м (с учетом прокладки двух кабелей в параллель).

$$r_\phi = (0,408 \cdot 0,03)/2 = 0,0061 \text{ Ом}$$

$$r_n = (0,253 \cdot 0,03)/2 = 0,0038 \text{ Ом}$$

Участок №3.

Кабель ВБВ-4х4 длиной 70 м.

Удельное сопротивление фазной и нулевой жилы 5,47 Ом/км (табл. 11).

Сопротивление в расчете на 70 м.

$$r_\phi = r_n = 5,47 \cdot 0,07 = 0,383 \text{ Ом}$$

Переходное сопротивление контактов 0,02 Ом.

Индуктивное сопротивление кабелей не учитываем. Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

$I_k = 267$ А, что больше требуемого $I_{окз} = 240$ А.

Следовательно, сеть удовлетворяет требованиям ПУЭ.

В данном примере полная проводимость нулевого проводника также удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ.

Пример 3

На схеме 3 приведена расчетная схема и форма расчета сети для эл. двигателя 9М.

Трансформатор – см. пример 1.

Участок №2 – см. пример 2.

Участок №3. Кабель АВВГ 3х25 длиной 130 м.

В качестве нулевого проводника используется обрамление кабельного канала – уголок 50х50х5.

По табл. 15 определяем полное сопротивление цепи фазная алюминиевая жила – обрамление кабельного канала в расчете на 130 м с учетом интерполяции на ток 240 А.

$$Z = 2,41 \cdot 0,13 = 0,313 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление кабелей не учитываем.

Переходное сопротивление контактов 0,02 Ом.

Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

$I_k = 594$ А, что больше требуемого $I_{окз} = 240$ А.

Следовательно, сеть удовлетворяет требованиям ПУЭ.

В данном примере полная проводимость нулевого проводника удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ (на участке 2 сопротивление нулевой жилы меньше сопротивления фазной жилы: на участке 3 требование также выполняется – см. табл. 15).

Пример 4

На схеме 4 приведена расчетная схема и форма расчета сети для эл. двигателя 10М.

Трансформатор – см. пример 1.

Участок №2 – см. пример 2.

Участок №3. Кабель АВВГ 3х25 длиной 150 м.

Удельное сопротивление фазной жилы 1,47 Ом/км (табл. 11).

$$r_{\phi} = 1,47 \cdot 0,15 = 0,22 \text{ Ом}$$

Удельное сопротивление нулевого проводника (стальной полосы) при токе 300 А - 1,6 Ом/км (рис. 3).

$$r_n = 1,6 \cdot 0,15 = 0,24 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление стальной полосы

$$X'' = 0,6 \cdot 1,6 \cdot 0,15 = 0,144 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление при расстоянии между кабелем и полосой 1 м:

$$X' = 0,725 \cdot 0,15 = 0,109 \text{ Ом (рис. 1)}$$

Переходное сопротивление контактов 0,02 Ом.

Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

$I_k = 381$ А, что больше требуемого. Следовательно, сеть удовлетворяет требованиям ПУЭ.

В данном примере полная проводимость нулевого проводника также удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ.

Пример 5

На схеме 5 приведена расчетная схема и форма расчетной сети для эл. двигателя 19М.

Трансформатор – см. пример 1.

Участок №2 см. пример 2.

Участок №3. Провод ПВ1 3(1х4)+1х2,5 длиной 70 м, в трубе 3/4”.

Удельное сопротивление фазного провода 5,47 Ом/км (табл. 7).

Удельное сопротивление нулевого провода 8,73 Ом/км (табл. 7).

Сопротивление в расчете на 70 м:

$$r_{\phi} = 5,47 \cdot 0,07 = 0,383 \text{ Ом}$$

$$r_n = 8,73 \cdot 0,07 = 0,61 \text{ Ом}$$

Удельное сопротивление трубы 3/4” при расчетном токе 240 А – 1,88 Ом/км (рис. 2).

Сопротивление в пересчете на 70 м:

$$r_n = 0,07 \cdot 1,88 = 0,132 \text{ Ом}$$

$$r_{n\Sigma} = 0,61 \cdot 0,132 / (0,61 + 0,132) = 0,109 \text{ Ом}$$

Внутреннее индуктивное сопротивление трубы:

$$X'' = 0,6 \cdot 1,88 \cdot 0,07 = 0,079 \text{ Ом}$$

Внешнее индуктивное сопротивление не учитываем.

Переходное сопротивление контактов 0,02 Ом.

Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

$I_k = 396$ А, что больше требуемого $I_{окз} = 240$ А.

Следовательно, сеть удовлетворяет требованиям ПУЭ.

В данном примере проводимость нулевого проводника удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ.

Пример 6

На схеме 6 приведена расчетная схема и форма расчета сети эл. двигателя 26М.

Трансформатор – см. пример 1.

Участок №2. Шинопровод ШМА-16 длиной 100 м.

По табл. 24 удельное сопротивление фазной шины

$$r = 0,03 \text{ Ом/км}$$

$$X'' = 0,014 \text{ Ом/км}$$

Удельное сопротивление нулевой шины (боковой профиль)

$$r_n = 0,037 \text{ Ом/км}$$

$$X''_n = 0,041 \text{ Ом/км}$$

Сопротивления в расчете на 100 м:

$$r_{\phi} = 0,03 \cdot 0,1 = 0,003 \text{ Ом}$$

$$r_n = 0,037 \cdot 0,1 = 0,0037 \text{ Ом}$$

$$X''_{\phi} = 0,014 \cdot 0,1 = 0,0014 \text{ Ом}$$

$$X''_n = 0,041 \cdot 0,1 = 0,0041 \text{ Ом}$$

Участок №3. Кабель АВВГ 3х185+1х50 длиной 10 м.

Удельное сопротивление фазной жилы 0,20 Ом/км (табл. 11).

Удельное сопротивление нулевой жилы 0,74 Ом/км (табл. 11).

Сопротивления в расчете на 10 м:

$$r_{\phi} = 0,20 \cdot 0,01 = 0,002 \text{ Ом}$$

$$r_n = 0,74 \cdot 0,01 = 0,0074 \text{ Ом}$$

Участок №4. Шинопровод ШРА-73-400 длиной 20 м (табл. 24).

Удельное сопротивление фазной шины

$$r_{\phi} = 0,15 \text{ Ом/км}$$

$$X_{\phi}^2 = 0,17 \text{ Ом/км}$$

Удельное сопротивление нулевой шины

$$r_n = 0,162 \text{ Ом/км}$$

$$X_n^2 = 0,164 \text{ Ом/км}$$

Сопротивления в расчете на 20 м:

$$r_{\phi} = 0,15 \cdot 0,02 = 0,0030 \text{ Ом}$$

$$r_n = 0,162 \cdot 0,02 = 0,0032 \text{ Ом}$$

$$X_{\phi}^2 = 0,17 \cdot 0,02 = 0,0034 \text{ Ом}$$

$$X_n^2 = 0,164 \cdot 0,02 = 0,0033 \text{ Ом}$$

Участок №5. Провод АПВ 3(1х4)+1х2,5 длиной 6 м.

Удельное сопротивление фазного провода 9,2 Ом/км (табл. 7).

Удельное сопротивление нулевого провода 14,75 ом/км (табл. 7).

Сопротивления в расчете на 6 м:

$$r_{\phi} = 9,2 \cdot 0,006 = 0,055 \text{ Ом}$$

$$r_n = 14,75 \cdot 0,006 = 0,088 \text{ Ом}$$

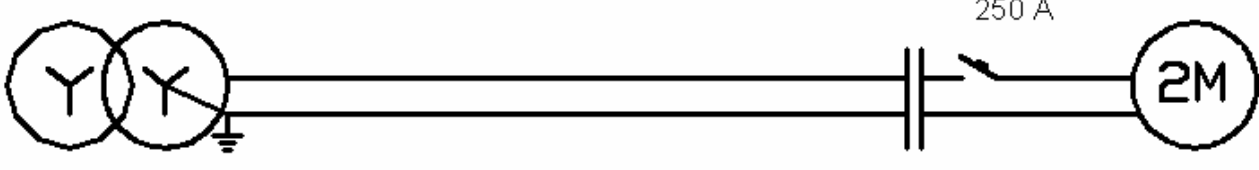
Переходное сопротивление контактов 0,02 Ом.

Далее определяются значения суммарного сопротивления цепи и тока КЗ.

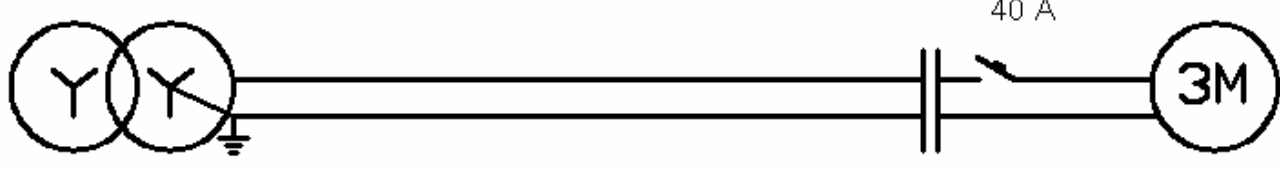
$I_k = 1014 \text{ А}$, что больше допустимого, следовательно, сеть удовлетворяет требованиям ПУЭ.

В данном примере полная проводимость нулевого проводника удовлетворяет требованиям параграфа 1.7.79 ПУЭ.

Расчет сопротивления цепи фаза-нуль

							
№ 1		№ 2		№ 3			
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая жила кабеля 95 мм ²	0,12	0,049	-		
	нуль	алюминиевая оболочка кабеля		0,039	-		
3	фаза	алюминиевая жила кабеля 95 мм ²	0,15	0,061	-		
	нуль	алюминиевая оболочка кабеля 35 мм ² + оболочка		0,038	-		
Итого				0,207	-	0,207	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_K \geq 6 \cdot I_N = 6 \cdot 250 = 1500 \text{ A}$					
Расчет действительных значений Z_Σ и I_K		$Z_\Sigma = 0,207 \text{ Ом}$ $I_K = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_\Sigma} = \frac{220}{0,027 + 0,207} = \frac{220}{0,234} = 940 \text{ A} < 1500 \text{ A}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X'') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_\phi = 0,049 + 0,061 = 0,11 \text{ Ом}$ $X''_\phi =$ $Z_\phi =$ $r_n = 0,039 + 0,038 = 0,077 \text{ Ом}$ $X''_n =$ $Z_n =$ $0,11 / 0,077 = 1,43 < 2$					

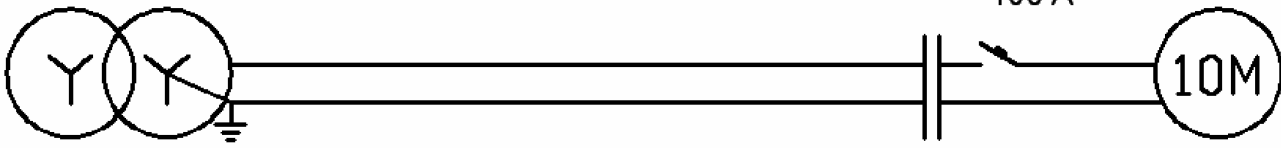
Расчет сопротивления цепи фаза-ноль

							
№ 1		№ 2			№ 3		
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_{т/3}$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая жила кабеля 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	ноль	алюминиевая жила кабеля 35 мм ² + оболочка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	медная жила кабеля 4 мм ²	0,07	0,383	-		
	ноль	медная нулевая жила 4 мм ²		0,383	-		
Итого				0,796	-	0,796	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_k \geq 6 \cdot I_n = 6 \cdot 40 = 240 \text{ А}$					
Расчет действительных значений Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} = 0,796 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\Sigma}}{3} + Z_{\Sigma}} = \frac{220}{0,027 + 0,796} = \frac{220}{0,823} = 267 \text{ А} > 240 \text{ А}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_{\phi} = 0,0061 + 0,383 = 0,389 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,0038 + 0,383 = 0,387 \text{ Ом}$ $X''_n =$ $Z_n =$ $0,387 / 0,389 = 1 < 2$					

Расчет сопротивления цепи фаза-нуль

№ 1		№ 2		№ 3			
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая жила кабеля 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	нуль	алюминиевая жила кабеля 35 мм ² + оболочка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	алюминиевая жила кабеля 25 мм ²	0,13		-	0,313	
	нуль	обрамление кабельного канала 50х50х5			-		
Итого				0,03	-	0,343	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_K \geq 3 \cdot I_H = 3 \cdot 80 = 240 \text{ А}$					
Расчет действительных значений Z_{Σ} и I_K		$Z_{\Sigma} = 0,343 \text{ Ом}$ $I_K = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}} = \frac{220}{0,027 + 0,343} = \frac{220}{0,37} = 594 \text{ А} > 240 \text{ А}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_H =$ $X''_H =$ $Z_H =$					

Расчет сопротивления цепи фаза-нуль

							
№1		№2			№3		
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая жила кабеля 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	нуль	алюминиевая жила кабеля 35 мм ² + оболочка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	алюминиевая жила кабеля 25 мм ²	0,15	0,22	-		
	нуль	стальная полоса 40х4		0,24	$\frac{0,144}{0,109}$		
Итого				0,49	0,253	0,551	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_K \geq 3 \cdot I_N = 3 \cdot 100 = 300 \text{ A}$					
Расчет действительных значений Z_Σ и I_K		$Z_\Sigma = 0,551 \text{ Ом}$ $I_K = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_\Sigma} = \frac{220}{0,027 + 0,551} = 381 \text{ A} > 300 \text{ A}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X'') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_\phi = 0,0061 + 0,22 = 0,226 \text{ Ом}$ $X''_\phi =$ $Z_\phi =$ $r_n = 0,0038 + 0,24 = 0,244 \text{ Ом}$ $X''_n = 0,144 \text{ Ом}$ $Z_n = 0,283 \text{ Ом}$ $0,283 / 0,226 = 1,25 < 2$					

Расчет сопротивления цепи фаза-ноль

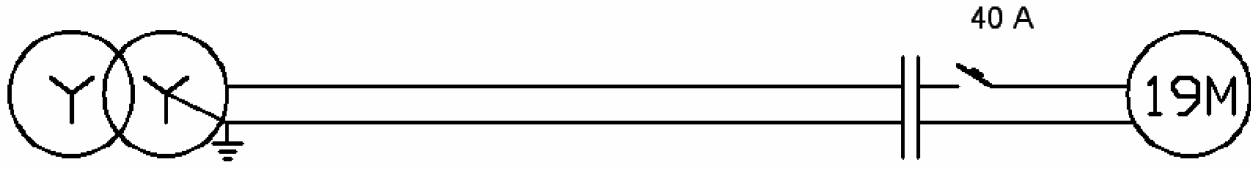
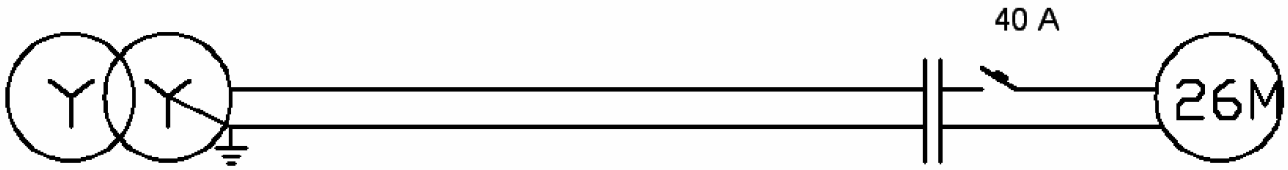
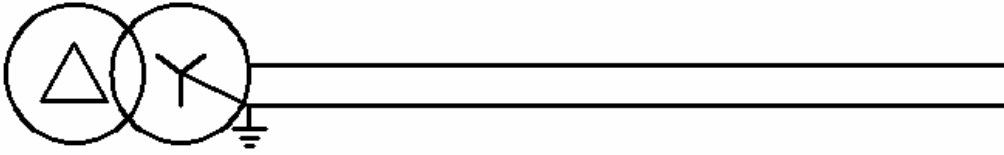
							
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая жила кабеля 2·95 мм ²	0,03	0,0061	-		
	ноль	алюминиевая жила кабеля 35 мм ² + оболочка кабеля		0,0038	-		
3	фаза	медная жила провода 4 мм ²	0,07	0,383	-		
	ноль	медная жила 2,5 мм ² + труба 3/4"		0,109	$\frac{0,079}{-}$		
Итого				0,522	0,079	0,528	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_K \geq 6 \cdot I_H = 6 \cdot 40 = 240 \text{ А}$					
Расчет действительных значений Z_Σ и I_K		$Z_\Sigma = 0,528 \text{ Ом}$ $I_K = \frac{U_\phi}{\frac{Z_T}{3} + Z_\Sigma} = \frac{220}{0,027 + 0,528} = 396 \text{ А} > 240 \text{ А}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_\phi = 0,0061 + 0,383 = 0,389 \text{ Ом}$ $X''_\phi =$ $Z_\phi =$ $r_n = 0,0038 + 0,109 = 0,113 \text{ Ом}$ $X''_n = 0,079 \text{ Ом}$ $Z_n = 0,138 \text{ Ом}$ $0,138 / 0,389 = 0,35 < 2$					

Схема 6

Расчет сопротивления цепи фаза-нуль

<div><div></div></div>							
№ 1		№ 2		№ 3			
Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_{т/3}$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1		тр-р 1000 кВА 10/0,4 кВ					0,027
		переходное сопротивление контактов		0,02	-		
2	фаза	алюминиевая шина ШМА-16	0,1	0,003	$\frac{-}{0,0014}$		
	нуль	боковой профиль		0,0037	$\frac{-}{0,0041}$		
3	фаза	алюминиевая жила кабеля 185 мм ²	0,01	0,0020	-		
	нуль	алюминиевая жила кабеля 50 мм ²		0,0074	-		
4	фаза	алюминиевая шина ШРА 73	0,02	0,003	$\frac{-}{0,0034}$		
	нуль	нулевая шина		0,0032	$\frac{-}{0,0033}$		
5	фаза	алюминиевая жила провода 4 мм ²	0,006	0,055			
	нуль	алюминиевая жила провода 2,5 мм ²		0,088			
Итого				0,185	0,0132	0,19	0,027
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_k \geq 3 \cdot I_n = 3 \cdot 40 = 120 \text{ A}$					
Расчет действительных значений $Z_{ц}$ и I_k		$Z_{ц} = 0,19 \text{ Ом}$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{т}}{3} + Z_{ц}} = \frac{220}{0,027 + 0,19} = 1014 \text{ A} > 120 \text{ A}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_{\phi} = 0,003 + 0,002 + 0,003 + 0,055 = 0,063 \text{ Ом}$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n = 0,004 + 0,0074 + 0,0032 + 0,088 = 0,092 \text{ Ом}$ $X''_n =$ $Z_n =$ $0,092 / 0,063 = 1,46 < 2$					

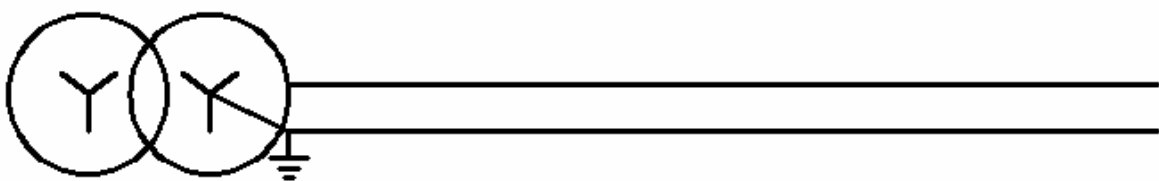
Расчет сопротивления цепи фаза-нуль (бланк)



№ 1

Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1							
2	фаза						
	нуль						
3	фаза						
	нуль						
4	фаза						
	нуль						
5	фаза						
	нуль						
Итого							
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата		$I_k \geq$					
Расчет действительных значений Z_{Σ} и I_k		$Z_{\Sigma} =$ $I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\Sigma}}$					
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода		$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n =$ $X''_n =$ $Z_n =$					

Расчет сопротивления цепи фаза-нуль (бланк)



№ 1

Номер участка, элемента		Наименование и краткая характеристика участка линии, элемента	Длина участка линии, км	Сопротивление участка линии, Ом			Сопротивление тр-ра $Z_T/3$, Ом
				r	$\frac{X''}{X'}$	Z	
1							
2	фаза						
	нуль						
3	фаза						
	нуль						
4	фаза						
	нуль						
5	фаза						
	нуль						
Итого							
Ток КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата			$I_K \geq$				
Расчет действительных значений $Z_{\text{ц}}$ и I_K			$Z_{\text{ц}} =$ $I_K = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\text{ц}}}$				
Расчет сопротивлений отдельно фазного и нулевого провода (без учета X') для определения относительной проводимости нулевого провода			$r_{\phi} =$ $X''_{\phi} =$ $Z_{\phi} =$ $r_n =$ $X''_n =$ $Z_n =$				

Литература

1. Правила устройства электроустановок, издание 6. – М.: Атомиздат, 1985 г.
2. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры безопасности. – М.: Энергия, 1971 г.
3. Инструкция по проектированию силового и осветительного электрооборудования промпредприятий. СН 357-77. – М.: Стройиздат, 1977 г.
4. Нейман Д.Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – М.: ГЭИ, 1949 г.
5. Семчинов А.М. Токопроводы промышленных предприятий. Л.: Энергоиздат, 1982 г.
6. Руководящие указания по расчету коротких замыканий и проверке аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания, 2 редакция, МЭИ, 1980 г.
7. Спеваков П.И. Проверка на автоматическое выключение линий в сетях до 1000 В. – М.: Энергия, 1971 г.
8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970 г.
9. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. М.: Энергия, 1985 г.
10. Таблица выбора пусковой и защитной аппаратуры, проводов и кабелей для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, редакция 1984 г. КрТИ-5655, Красноярское отделение ГПИ ЭП.
11. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях 0,4 – 35 кВ. – М.: ГЭИ, 1980 г.
12. Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. – Л.: Энергия, 1978 г.
13. Карпов Ф.Ф., Козлов В.Н. Справочник по расчету проводов и кабелей, издание 3. – М.: ГЭИ, 1969 г.
14. Княжев В.А. Линейка для выбора максимальных длин кабелей по условию отключения ОКЗ. Промэнергетика №4, 1983 г.
15. Исследование токов однофазного короткого замыкания в системе 380/220 В с заземленной нейтралью. Н-19-68, ВНИИ ПЭМ, 1969 г.
16. Вагин Г.Я., Ческов В.А. Об определении переходных сопротивлений при расчете токов КЗ в сетях до 1000 В. ИУ ВНИПИ ТПЭП №2, 1984 г.
17. Дацен С.А. Схемы защитного отключения электродвигателей в сетях 380/220 В с глухозаземленной нейтралью во взрывоопасных установках. Промэнергетика №5, 1967 г.
18. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования (под ред. Мовсесова Н.С.) – М.: Энергоиздат, 1981 г.
19. Кораблев В.П. Электробезопасность на химических предприятиях. – М.: Химия, 1983 г.

20. Беляев А.В., Шабад М.А. Учет переходных сопротивлений при выборе защит и аппаратуры в сетях 0,4 кВ. Электрические станции №3, 1981 .
21. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). ГОСТ 12.1.030-81. Издательство стандартов, 1982 г.
22. Сабарно Р.В. и др. Электробезопасность на промышленных предприятиях. Справочник. – К.: Техника, 1985 г.

Содержание

1. Общая часть	2
2. Величины тока однофазного КЗ по условиям срабатывания защитного аппарата	3
3. Определение величины тока однофазного КЗ	4
4. Расчетные сопротивления трансформаторов	6
5. Расчетные сопротивления проводов и кабелей	8
6. Расчетные сопротивления шинопроводов	19
7. Расчетные сопротивления стальных проводников	24
8. Активные сопротивления переходных контактов	33
9. Определение границ действия защиты от однофазных КЗ в сети асинхронных эл. двигателей с КЗ ротором	37
10. Примеры расчета токов однофазного КЗ	43
11. Литература	55