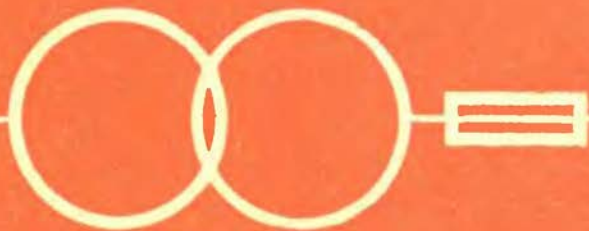


Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

М.А.ГОЛУБЕВ

**МЕТОДЫ
РАСЧЕТА
ТОКОВ
КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
СЕТЯХ**



·ЭНЕРГИЯ·

ЛИТЕРАТУРА

1. СССР. Государственные стандарты. Кабели, провода и шнуры электрические, Издательство стандартов, 1963.
2. Гессен В. Ю., Аварийные режимы и защита от них в сельскохозяйственных сетях, Сельхозгиз, 1961.
3. Ульянов С. А., Короткие замыкания в электрических системах, Госэнергоиздат, 1952.
4. Баптинданов Л. Н. и Тарасов В. И., Электрооборудование электрических станций и подстанций, т. I, Госэнергоиздат, 1960.
5. Электротехнический справочник, под редакцией М. Г. Чиликина и др., Госэнергоиздат, 1962.
6. Правила устройства электроустановок, Госэнергоиздат, 1957.
7. Правила устройства электроустановок, изд-во «Энергия», 1965.
8. Справочник по релейной защите, под редакцией М. А. Берковича, Госэнергоиздат, 1963.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общие сведения	3
2. Виды повреждений в сетях 6—35 кВ	5
3. Расчет тока короткого замыкания при питании от мощной системы	6
4. Порядок расчета	8
5. Определение сопротивлений элементов сети	8
6. Определение полного сопротивления участка сети	15
7. Распределение тока короткого замыкания по параллельно включенным элементам сети	18
8. Расчет токов к. з. при наличии трансформаторов	21
9. Распределение токов при двухфазном к. з. за трансформатором, соединенным по схеме звезда — треугольник	25
10. Расчет токов короткого замыкания в сетях напряжением ниже 1000 в	26
11. Распределение токов при однофазном к. з. за трансформатором, соединенным по схеме звезда — звезда с заземленным нулем	31
12. Расчет напряжений при коротких замыканиях	32
13. Выбор расчетных режимов и порядок вычислений токов короткого замыкания	33
14. Влияние нагрузки на величину тока короткого замыкания	41
15. Приложения	47

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 237

М. Л. ГОЛУБЕВ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967

6П2.13
Г 62
УДК 621.3.064.1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Большаков Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

Голубев М. Л.

Г 62 Методы расчета токов короткого замыкания
в распределительных сетях. М., Энергия, 1967.
56 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 237.)

В книге рассматриваются практические методы расчетов токов короткого замыкания, необходимых для выбора уставок релейной защиты в распределительных сетях 6—35 кВ и сетях напряжением ниже 1000 в, питающихся от мощной энергосистемы, и приводятся справочные материалы, необходимые для выполнения таких расчетов.

3-3-9
100-67

6П2.13

Голубев Михаил Львович

**Методы расчета токов короткого замыкания
в распределительных сетях**

Редактор *В. А. Семенов*

Художественный редактор *Д. И. Чернышев*

Технический редактор *Т. Г. Усачева* Корректор *Е. Х. Горбунова*

Сдано в набор 19/IV 1967 г. Подписано к печати 14/VIII 1967 г. Т-07081
Формат 84×108^{1/2}/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,94 Уч.-изд. л. 3,25
Тираж 20 000 экз. Цена 11 коп. Зак. 195

Издательство „Энергия“. Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей брошюры — дать справочные данные и методику расчета токов короткого замыкания для расчета уставок релейной защиты в распределительных сетях 6—35 кВ, питающихся от мощных энергосистем, а также в сетях напряжением ниже 1000 в.

Расчеты токов к. з. рассмотрены только для случая, когда распределительная сеть имеет одностороннее питание от шин системы большой мощности. При расчетах не учитывается подпитка места к. з. токами от синхронных и асинхронных двигателей нагрузки.

При расчетах приходится определять главным образом сопротивление линий. Величины сопротивлений линий, как правило, определяются в омах. Поэтому для уменьшения количества математических вычислений в дальнейшем все расчеты ведутся в именованных величинах.

Для распределительных сетей активное сопротивление линий велико, часто больше индуктивного, поэтому во всех расчетах определяется полное сопротивление линий и трансформаторов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Как известно, короткое замыкание сопровождается увеличением тока на участке сети между местом к. з. и генераторами, питающими сеть, и снижением напряжения. Изменения токов и напряжений не могут происходить мгновенно, поскольку элементы сети имеют индуктивность, задерживающую увеличение тока и снижение напряжения. Наличие на генераторах регуляторов напряжения и устройств форсировки возбуждения, которые при снижении напряжения, вызванном коротким замыканием, увеличивают возбуждение генераторов,

способствует увеличению тока к. з. и остаточного напряжения. В результате величина и форма кривой тока короткого замыкания изменяются по сложным законам, точный учет которых затрудняет расчеты.

В случае, когда короткое замыкание происходит на линии, подключенной к шинам мощной энергосистемы, расчет и анализ процессов, происходящих при повреждении, значительно упрощаются. Форма кривой тока короткого замыкания i_k для этого случая показана на

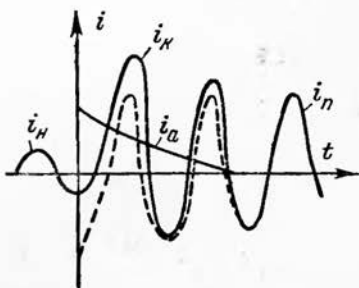


Рис. 1. Форма кривой тока короткого замыкания.

рис. 1. Такую форму имеет ток в цепи, состоящей из активного r и индуктивного x сопротивлений, при подключении к ней источника синусоидального напряжения постоянной величины. Этот ток можно представить состоящим из двух составляющих. Одна из них i_a , которая называется апериодической составляющей, появляется в момент возникновения короткого замыкания

и затухает до нуля. Время ее затухания определяется соотношением величин активного и индуктивного сопротивлений короткозамкнутой сети. Чем больше активное сопротивление, тем быстрее уменьшается величина апериодической составляющей. Поскольку в распределительных сетях активное сопротивление велико, апериодическая составляющая затухает настолько быстро (за сотые доли секунды), что в практических расчетах токов короткого замыкания для выбора уставок релейной защиты не учитывается.

Вторая составляющая — периодическая i_n представляет собой синусоидальный ток с неизменной амплитудой. Величина его действующего значения при трехфазном к. з. определяется согласно закону Ома по следующему выражению:

$$I^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3}z_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где $I^{(3)}$ — действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании, а.

- U — междуфазное напряжение источника питания, *в*;
 z_{Σ} — суммарное сопротивление цепи короткого замыкания, *ом/фазу*.

2. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЕТЯХ 6—35 кВ

Распределительные сети 6—35 кВ обычно работают с изолированной нейтралью. В таких сетях могут возникать междуфазные короткие замыкания: трехфазные, двухфазные и двойные замыкания на землю. Кроме того, в сетях 6—35 кВ могут возникать однофазные замыкания на землю. Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью, отключение которого релейной защитой требуется только по соображениям техники безопасности в сетях, питающих торфоразработки, строительные площадки и т. п., в дальнейшем не рассматривается.

Под двойным замыканием на землю понимается одновременное замыкание на землю одной фазы в одном месте сети и другой фазы в другом месте сети. Из-за сложности вычислений токов короткого замыкания этот вид повреждения при расчетах релейной защиты в распределительных сетях, как правило, не рассматривается.

Для расчетов релейной защиты необходимо знать величины токов трехфазного и двухфазного к. з.

Для упрощения расчетов принято рассчитывать токи трехфазного к. з. $I^{(3)}$, а ток двухфазного к. з. $I^{(2)}$ определять по выражению

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}. \quad (2)$$

Расчет ведется для случая так называемого металлического короткого замыкания, когда фазы соединяются непосредственно, без переходного сопротивления. В действительности короткие замыкания часто бывают не металлическими, а через переходное сопротивление, например через упавшее дерево, через землю при обрыве проводов, через электрическую дугу, возникающую от схлестывания проводов, и т. д.

Поскольку величину переходного сопротивления в этих случаях определить практически невозможно, оно обычно не учитывается, а возможное уменьшение тока короткого замыкания из-за переходного сопротив-

ления компенсируется введением коэффициента запаса при расчете уставок защиты.

Иногда при расчетах учитывают сопротивление электрической дуги в месте к. з.

Сопротивление дуги определяется по выражению (3), полученному на основании опытов:

$$r_d \approx \frac{1000l_d}{I_d}, \quad (3)$$

где l_d — длина дуги, м;

I_d — ток в дуге, а;

r_d — активное сопротивление дуги, ом.

Сопротивление дуги считается чисто активным.

3. РАСЧЕТ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ МОЩНОЙ СИСТЕМЫ

На схеме, показанной на рис. 2, суммарное сопротивление цепи короткого замыкания состоит из эквивалентного сопротивления системы z_c и сопротивления от шин до точки к. з. $z(x, r)$.

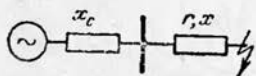


Рис. 2. Расчетная схема для определения тока трехфазного к. з. при питании от системы бесконечной мощности.

Эквивалентное сопротивление системы до шин, питающих распределительную сеть, можно определить по выражению

$$z_c = \frac{U}{\sqrt{3}I^{(3)}}, \text{ ом/фазу}, \quad (4)$$

где $I^{(3)}$ — действующее значение периодической составляющей тока, проходящего при трехфазном к. з. на шинах рассматриваемой подстанции.

Иногда вместо величины $I^{(3)}$ задается мощность трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции системы $S^{(3)}$. Эта условная величина определяется по выражению

$$S^{(3)} = \sqrt{3}UI^{(3)}. \quad (5)$$

Сопротивление системы до шин питающей подстанции определяется по выражению

$$z_c = \frac{U^2}{S^{(3)}}, \text{ ом/фазу}, \quad (6)$$

где U — междуфазное напряжение системы, $kв$;

$S^{(3)}$ — мощность трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции, $Mва$.

Поскольку активное сопротивление системы мало, им можно пренебрегать и считать сопротивление системы чисто индуктивным. Поэтому в дальнейшем везде принимается $r_c = 0$; $z_c \approx x_c$.

Зная величины активного r и индуктивного x сопротивлений участка сети от шин питающей подстанции до места короткого замыкания, можно по выражению (7) определить ток трехполюсного к. з. в любой точке распределительной сети (рис. 2):

$$I^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(x_c + x)^2 + r^2}}. \quad (7)$$

Обычно при расчетах токов к. з. активное сопротивление не учитывается, если суммарное индуктивное сопротивление превышает его более чем в 3 раза. Поскольку в распределительных сетях это условие, как правило, не выполняется, расчеты токов к. з. производятся с учетом активного сопротивления.

Во многих случаях при повреждениях в сетях 6—35 $kв$ напряжение на шинах питающей подстанции практически не изменяется. При этом можно считать, что сопротивление системы равно нулю и расчетное выражение для определения тока к. з. примет следующий вид:

$$I^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{x^2 + r^2}}. \quad (7a)$$

В подобном случае говорят, что рассматриваемая сеть подключена к системе бесконечной мощности.

Для практических расчетов важно определить, можно ли для данной конкретной точки сети считать питающую ее систему системой бесконечной мощности и пользоваться выражением (7a). Когда известна суммарная мощность генераторов системы S_c , можно применить простое правило: для данной точки сети питающую ее систему любой мощности можно принять за систему неограниченной мощности, если выполняется условие (8) или (9) [Л. 4]:

$$x_c \frac{S_c}{U^2} \leq 3; \quad (8)$$

$$\frac{S_c}{S^{(3)}} \leq 3, \quad (9)$$

- где U — междуфазное напряжение системы, *кв*;
 $S^{(3)}$ — мощность трехфазного к. з. на шинах подстанции, *Мва*;
 S_c — мощность системы, *Мва*;
 x_c — сопротивление системы, *ом/фазу*.

4. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Расчет токов короткого замыкания ведется в следующей последовательности:

а) Составляется полная схема рассматриваемого участка сети с указанием длин линий, материала и сечения проводов, данных трансформаторов и реакторов.

б) Для каждого элемента — линия, трансформатор, реактор — определяются его активное и индуктивное сопротивления.

в) Определяется сопротивление системы до шин, питающих рассматриваемую сеть. Проверяется возможность считать питающую систему системой бесконечной мощности.

г) Определяется ступень напряжения, на которой установлено наибольшее количество защит. Эта ступень напряжения принимается за расчетную. Все сопротивления приводятся к выбранному расчетному напряжению, и по этим данным составляется расчетная схема замещения.

д) Намечаются точки короткого замыкания и расчетные режимы, исходя из требований релейной защиты.

е) Определяются суммарное активное и индуктивное сопротивления участка сети между шинами питающей подстанции и местом короткого замыкания.

ж) Определяется ток в месте короткого замыкания по выражению (7) или (7а).

з) Определяются действительные токи, проходящие через устройства релейной защиты.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ

Сопротивление трансформаторов определяется по выражению

$$z_T = \frac{10u_T U^2}{S_T}, \quad (10)$$

где z_T — полное сопротивление трансформатора;

U — номинальное линейное напряжение трансформатора той стороны, к которой приводится его сопротивление, *кв*;

S_T — номинальная мощность, *кв*а;

u_k — напряжение короткого замыкания, %.

Все эти данные указываются в заводском паспорте трансформатора, укрепленном на его кожухе.

Большинство трансформаторов имеет ответвления для регулирования напряжения. Величина U в выражении (10) равна номинальному напряжению, соответствующему основному ответвлению обмотки.

Полное сопротивление трансформаторов z_T обычно можно принять приблизительно равным его индуктивному сопротивлению x_T , так как активное сопротивление r_T значительно меньше индуктивного. При расчетах в сети 0,4 *кв* и ниже необходимо учитывать и активное сопротивление трансформатора. Для определения r_T необходимо знать величину потерь в меди при номинальном токе трансформатора ΔP_M , которая приводится в каталогах и заводской документации на трансформаторы.

Активное сопротивление трансформатора определяется по следующему выражению:

$$r_T = \frac{\Delta P_M U_H^2}{S_T^2}. \quad (11)$$

В этом выражении потери в меди ΔP_M выражены в ваттах, номинальное напряжение трансформатора U_H — в киловольтах, номинальная мощность S_T — в киловольт-амперах.

Зная полное z_T и активное r_T сопротивления трансформатора, можно определить его индуктивное сопротивление x_T по выражению

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}. \quad (12)$$

Пример 1. Определить сопротивления трехфазного трансформатора, выполненного по ГОСТ 401-41, серия ТМ, мощность 20 *кв*а; $u_k=5,5\%$; $\Delta P_M=0,6$ *квт*; номинальное напряжение $6,3 \pm 5\%$ / 0,4 *кв*.

Решение. По выражению (10) $z_T = \frac{10 \cdot 5,5 \cdot 6,3^2}{20} = 109$ *ом*,
если отнести его к стороне 6,3 *кв*, или $z_T = \frac{10 \cdot 5,5 \cdot 0,4^2}{20} = 0,44$ *ом*,
если отнести его к стороне 0,4 *кв*.

$$\text{По выражению (11) } r_T = \frac{600 \cdot 6,3^2}{20^2} = 58,5 \text{ ом, или } r_T = \frac{600 \cdot 0,4^2}{20^2} = 0,24 \text{ ом.}$$

$$\text{По выражению (12) } x_T = \sqrt{109^2 - 58,5^2} = 92 \text{ ом, или } x_T = \sqrt{0,44^2 - 0,24^2} = 0,37 \text{ ом.}$$

Сопротивление реактора определяется по выражению

$$x_p = \frac{10 u_k U}{\sqrt{3} I_n}, \quad (13)$$

где (заводские данные) U_n — номинальное напряжение реактора, кв.

I_n — номинальный ток реактора, а;

u_k — напряжение короткого замыкания, %.

Активное сопротивление реакторов мало и в расчетах не учитывается: $z_p = x_p$.

Иногда в заводских данных указывается индуктивность реактора L мГн. Сопротивление реактора в этом случае определяется по выражению

$$x_p = \omega L = 314 L, \text{ ом.} \quad (14)$$

Пример 2. Определить сопротивление реактора по данным:

$$U = 6,0 \text{ кв; } I_n = 600 \text{ а; } u_k = 6\%.$$

Решение. По выражению (13)

$$x_p = \frac{10 \cdot 6 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 600} = 0,346 \text{ ом.}$$

Если вместо u_k задано $L = 0,11$ мГн, то по выражению (14)

$$x_p = 314 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,346 \text{ ом.}$$

Активное сопротивление воздушных линий с медными, алюминиевыми и сталеалюминиевыми проводами определяется по ГОСТ на соответствующие провода (см. приложения П-1—П-3). Определить активное сопротивление по удельному сопротивлению и номинальному сечению провода не следует, так как это может вызвать значительные ошибки по следующим причинам:

а) Номинальное сечение провода обычно отличается от действительного; например, медный провод с номинальным сечением 70 мм^2 имеет действительное сечение $68,3 \text{ мм}^2$, сталеалюминиевый провод АС-35 вместо 35 мм^2

имеет действительное сечение алюминиевой части 36,9 мм².

б) Действительная длина отдельных жил, из которых свивается провод, за счет скрутки больше длины самого провода.

в) Удельные сопротивления материалов проводов, выпущенных в разное время, по разным техническим условиям и разным ГОСТ различны.

Активное сопротивление стальных проводов в значительной степени зависит от величины проходящего по ним тока, диаметра проволок, из которых свит провод, и химического состава стали. Математически определить его невозможно. Поэтому расчет производится следующим образом: задаются предполагаемой величиной тока короткого замыкания, проходящего по данному участку линии с стальными проводами. Для этой величины тока по опытным данным, приведенным в ГОСТ 8053-56 на провода марки ПСО, ГОСТ 5800-51 на провода марок ПС и ПМС, или по другим справочным материалам определяют активное сопротивление провода (см. приложения П-11, П-13 и П-14).

Полученное значение сопротивления подставляют в расчетное выражение и определяют расчетный ток короткого замыкания. Полученная величина тока к. з. сравнивается с величиной тока, принятого для определения сопротивления провода, и если отклонения незначительны (обычно в пределах 5—10%), то расчет на этом заканчивается. Если же предполагаемая величина тока выбрана неудачно и расчетное значение тока к. з. значительно отличается от нее, то расчет повторяется для других значений предполагаемого тока до тех пор, пока не будет получена необходимая точность.

В распределительных сетях главным образом применяют кабели с изоляцией из пропитанной бумаги, в свинцовой оболочке, марок СБ (медные) и АСБ (алюминиевые). Удельное сопротивление жилы кабеля r_y , отнесенное к 1 мм² номинального (не фактического) сечения, 1 км длины и температуре +20° С, должно быть не более 18,4 ом для медных и 31 ом для алюминиевых кабелей (ГОСТ 340-59). По этим данным и определяют активное сопротивление жилы кабеля по выражению

$$r_k = \frac{l}{s} r_y, \text{ ом}, \quad (15)$$

где l — длина кабеля, км;
 s — номинальное сечение, мм².

Можно пользоваться и данными ГОСТ 340-59 (см. приложение П-9).

Индуктивное сопротивление кабелей зависит от их конструкции, сечения жил и конструктивных размеров изоляции. Поскольку расчет его сложен, индуктивное сопротивление кабелей принимается по справочным таблицам (см. приложение П-10).

Индуктивное сопротивление одной фазы трехфазной воздушной линии на 1 км длины можно определить по следующему выражению:

$$x_{д} = \omega \left(4,6 \frac{D_{ср}}{r} + 0,5\mu \right) \cdot 10^{-4}, \text{ ом/км.} \quad (16)$$

В этом выражении: ω — угловая частота, равная 314 при 50 гц;

$D_{ср}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами, мм, определяемое по выражению

$$D_{ср} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}, \quad (17)$$

где D_{12} , D_{23} , D_{31} — расстояния между проводами 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1, соответственно определяемые по чертежам опор;

r — расчетный радиус провода, определяемый по специальным таблицам ГОСТ на провода (см. приложения П-1—П-5);

μ — относительная магнитная проницаемость материала провода.

Если в выражение (16) подставить $\omega = 314$ и $\mu = 1$ для проводов из цветного металла, то оно примет вид расчетного выражения

$$x_{д} = 0,144 \lg \frac{2D_{ср}}{d} + 0,016, \text{ ом/км,} \quad (18)$$

где d — расчетный диаметр провода, мм.

Пример 3. Определить индуктивное сопротивление воздушной линии 35 кв, выполненной сталеалюминиевым проводом АС-70. Опоры П-образные с расстоянием между проводами 2,8 м (рис. 3).

Решение. По ГОСТ 839-59 (см. приложение П-3) для провода АС-70 определяем расчетный диаметр: $d = 11,4$ мм.

Среднее геометрическое расстояние по выражению (17)

$$\begin{aligned} D_{ср} &= \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} = \sqrt[3]{DD2D} = \\ &= 1,26D = 1,26 \cdot 2800 = 3500 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление по выражению (18)

$$x_{\text{л}} = 0,144 \lg \frac{2 \cdot 3 \cdot 500}{11,4} + 0,016 = 0,417 \text{ ом/км.}$$

Пример 4. Определить индуктивное сопротивление воздушной линии 10 кв, выполненной проводом А-25. Расположение проводов дано на рис. 4.

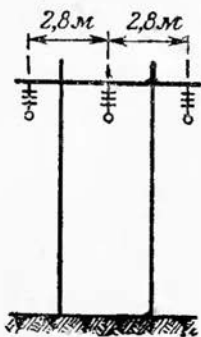


Рис. 3. Чертеж опоры к примеру 3.

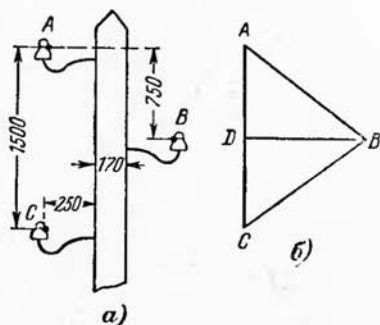


Рис. 4. К расчету индуктивного сопротивления линии (пример 4). а — чертеж опоры; б — определение среднего геометрического расстояния между проводами.

Решение. Из рис. 4 видно, что величина DB равна сумме диаметра стойки опоры и двойной длины крюков, или $DB = 250 + 250 + 170 = 670$ мм.

$$\text{Величина } AD = DC = \frac{1}{2} AC = 750 \text{ мм.}$$

Из прямоугольного треугольника ADB определяется

$$AB = \sqrt{AD^2 + DB^2} = \sqrt{750^2 + 670^2} = 1000 \text{ мм.}$$

$$\text{Среднее геометрическое расстояние равно } D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{AB \cdot BC \cdot CA} = \sqrt[3]{1000 \cdot 1000 \cdot 1500} = 1150 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр d для провода А-25 по ГОСТ (см. приложение П-2) равен 6,4 мм.

$$x_{\text{л}} = 0,144 \lg \frac{2 \cdot 1150}{6,4} + 0,016 = 0,387 \text{ ом/км.}$$

С целью упрощения вычислительной работы для разных величин $D_{\text{ср}}$ и различных марок проводов составлены справочные таблицы и кривые для определения сопротивлений линий, помещенные в приложениях П-16—П-18.

Для стальных проводов величина μ не равна единице и зависит от величины тока, проходящего по проводу.

Выражение (16) для стальных проводов преобразовывается в следующее:

$$x_{\text{л}} = \omega \cdot 4,6 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r} \cdot 10^{-4} + \omega \cdot 0,5 \mu \cdot 10^{-4}. \quad (19)$$

Первый член правой части этого уравнения представляет внешнее индуктивное сопротивление, зависящее от расстояния между проводами и расчетного радиуса провода, и соответствует индуктивному сопротивлению линий с проводами из цветного металла такой же конструкции. Второй член представляет внутреннее индуктивное сопротивление стального провода, зависящее от величины тока, проходящего по проводу.

Для определения внутреннего индуктивного сопротивления линий со стальными проводами пользуются опытными данными, так же как и для определения активных сопротивлений (см. приложения П-12, П-15).

Пример 5. Определить ток короткого замыкания в конце воздушной линии 11 кв, выполненной проводом ПС-35, длиной 10 км. Ток трехфазного короткого замыкания на шинах питающей подстанции 11 кв 1000 а.

Решение. Сопротивление системы по выражению (4)

$$x_c \approx z_c = \frac{U}{\sqrt{3} I^{(3)}} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 6,35 \text{ ом.}$$

Задаемся током короткого замыкания в конце линии 120 а. По кривым приложения П-11 определяем для провода ПС-35 и тока 120 а активное сопротивление провода 4,9 ом/км.

По кривым приложения П-12 определяем для тока 120 а внутреннее индуктивное сопротивление линии 1,38 ом/км, а по кривым приложения П-19 — внешнее индуктивное сопротивление 0,355 ом/км. Среднее геометрическое расстояние принято 1150 мм по примеру 3.

Ток трехфазного короткого замыкания в конце линии по выражению (7)

$$I^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3} \sqrt{[6,35 + 10(1,38 + 0,355)]^2 + (10 \cdot 4,9)^2}} = 117 \text{ а,}$$

Расхождение с принятой предварительно величиной тока 120 а незначительно, и расчет на этом заканчивается.

Чтобы оценить влияние сопротивления стальных проводов на величину тока короткого замыкания, повторим тот же расчет для линии, выполненной проводом А-35.

Активное сопротивление провода А-35 по приложению П-2 равно 0,92 ом/км; индуктивное сопротивление линии по приложению П-17 0,352 ом/км.

Ток трехфазного короткого замыкания

$$I^{(3)} = \frac{11\,000}{\sqrt{3} \sqrt{(6,35 + 10 \cdot 0,352)^2 + (10 \cdot 0,96)^2}} = 460 \text{ а}$$

вместо 117 а для стальных проводов.

Из этого примера видно как сильно уменьшается ток короткого замыкания в линиях со стальными проводами. Поэтому при всех расчетах релейной защиты следует очень внимательно проверять величину токов короткого замыкания для всех участков линий со стальными проводами.

В старых распределительных сетях могут встречаться провода, выпускавшиеся по приказу ВСНХ № 597 от 5/IV 1929 г., до введения ГОСТ на провода. По этому приказу марки алюминиевых и сталеалюминиевых проводов обозначались не по фактическому сечению провода, а по эквивалентному сечению медного провода, имеющего такое же сопротивление. Фактическое же сечение было значительно больше эквивалентного. Для этих проводов удельное сопротивление меди принималось равным $17,84 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$, а алюминия $29 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$. Данные этих проводов приведены в приложениях П-6—П-8.

В дальнейшем был введен ОСТ 5363 на алюминиевые и сталеалюминиевые провода. Данные проводов по этим ОСТ очень близки к современным; марки алюминиевых проводов были приняты по округленному действительному сечению; марки сталеалюминиевых проводов состоят из сечений алюминиевой и стальной частей. Например, марка АС-35/4 обозначала сталеалюминиевый провод с сечением алюминия 35 мм^2 и сечением стального сердечника 4 мм^2 .

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УЧАСТКА СЕТИ

Полное сопротивление z какого-либо участка сети является геометрической суммой активного r и индуктивного x сопротивлений и определяется как $z = \sqrt{x^2 + r^2}$. Поэтому при определении полного сопротивления цепи до места к. з. необходимо отдельно определить суммарное активное сопротивление r_{Σ} , отдельно суммарное индуктивное сопротивление x_{Σ} , затем найти их геометрическую

сумму как $z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2}$. Если же определить $z = \sqrt{x^2 + r^2}$ для каждого элемента сети и затем найти их арифметическую сумму, то величина полного сопротивления будет преувеличенной, а значение тока короткого замыкания — уменьшенным.

Численно одинаковые результаты могут быть получены только в одном частном случае, когда отношение r/x для всех участков сети одинаково. В действительных же сетях это отношение всегда различно для разных участков. Так, полное сопротивление системы и сопротивление крупных трансформаторов практически равны их индуктивному сопротивлению.

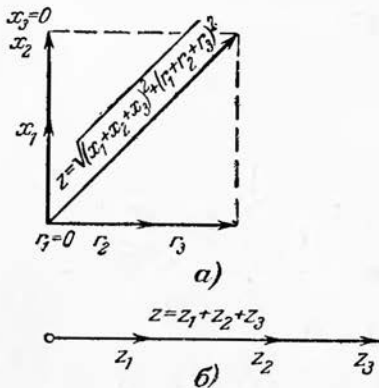


Рис. 5. Графическое определение сопротивлений к примеру 6.

а — правильно; б — неправильно.

Отношение r/x для линий с проводами, имеющими небольшое сечение (А-25, А-16), равно примерно 2—3, а для стальных проводов r/x во много раз больше.

Пример 6. Определить полное сопротивление схемы, состоящей из трех последовательно включенных сопротивлений. Для первого сопротивления $x_1=5$ ом, $r_1=0$; для второго $x_2=5$ ом, $r_2=5$ ом; для третьего $x_3=0$, $r_3=5$ ом.

Правильное решение:

$$z = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} = \sqrt{(5 + 5 + 0)^2 + (0 + 5 + 5)^2} = 14,2 \text{ ом.}$$

Неправильное решение:

$$z_1 = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5; \quad z_2 = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,5; \quad z_3 = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5;$$

полное сопротивление $z = z_1 + z_2 + z_3 = 5 + 7,5 + 5 = 17,05$ ом вместо 14,2 ом.

Наглядным пояснением к этому примеру служит рис. 5, на котором графически произведено определение сопротивлений по обоим способам.

До сих пор речь шла об определении суммарного полного сопротивления для цепи, состоящей из нескольких сопротивлений, включенных последовательно. В сетях часто встречается параллельное включение двух или нескольких сопротивлений. Эквивалентное сопротивление такой схемы определяется по следующему выражению:

$$z_{\text{э}} = \frac{\sqrt{x_1^2 + r_1^2} \sqrt{x_2^2 + r_2^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}; \quad (20)$$

в частном случае, когда $x_1 = x_2 = x$ и $r_1 = r_2 = r$,

$$z_{\text{э}} = \frac{z_1}{2} = \frac{z_2}{2} = \frac{\sqrt{x^2 + r^2}}{2}. \quad (21)$$

Пример 7. Определить полное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений:

$$r_1 = 5 \text{ ом}; \quad x_1 = 0 \text{ и } r_2 = 0; \quad x_2 = 5 \text{ ом}.$$

Решение:

$$z_1 = \sqrt{x_1^2 + r_1^2} = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5 \text{ ом};$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + r_2^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5 \text{ ом};$$

$$z_{\text{э}} = \frac{5 \cdot 5}{\sqrt{(5+0)^2 + (0+5)^2}} = 3,52 \text{ ом}.$$

Эквивалентные активные и реактивные сопротивления цепи, состоящей из двух параллельно включенных сопротивлений, определяются согласно следующим выражениям:

$$r_{\text{э}} = \frac{r_2(r_1^2 + x_1^2) + r_1(r_2^2 + x_2^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}; \quad (22)$$

$$r_{\text{э}} = \frac{r_2 z_1^2 + r_1 z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}; \quad (22a)$$

$$x_{\text{э}} = \frac{x_2(r_1^2 + x_1^2) + x_1(r_2^2 + x_2^2)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}; \quad (23)$$

$$x_{\text{э}} = \frac{x_2 z_1^2 + x_1 z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}. \quad (23a)$$

7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫМ ЭЛЕМЕНТАМ СЕТИ

В ряде случаев необходимо определить ток к. з., проходящий по каждому из параллельно включенных элементов сети: линиям и трансформаторам.

В общем случае сопротивление элементов различны и различно отношение r/x для каждого из них.

Если известен полный ток I , проходящий по эквивалентному сопротивлению z_3 , состоящему из двух параллельно включенных элементов с сопротивлениями x_1 , r_1 , z_1 и x_2 , r_2 , z_2 , причем $\frac{r_1}{x_1} \neq \frac{r_2}{x_2}$, то токи, проходящие по каждому элементу, определяются по следующим выражениям:

$$I_1 = I \frac{\sqrt{x_2^2 + r_2^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}; \quad (24)$$

$$I_2 = I \frac{\sqrt{x_1^2 + r_1^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}. \quad (25)$$

Пример 8. Определить токи, проходящие через сопротивления из примера 7, если полный ток I равен 100 а.

Решение:

$$I_1 = I_2 = 100 = \frac{\sqrt{0^2 + 5^2}}{\sqrt{(0+5)^2 + (5+0)^2}} = 70,5 \text{ а.}$$

Токи I_1 и I_2 в данном примере сдвинуты между собой по фазе на 90° ; полный ток является их геометрической суммой и равен:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{70,5^2 + 70,5^2} = 100 \text{ а (рис 6).}$$

Если отношение r/x для всех параллельно включенных сопротивлений одинаково, то выражения (24) и (25) упрощаются

$$I_1 = I \frac{z_2}{z_1 + z_2}; \quad (24a)$$

$$I_2 = I \frac{z_1}{z_1 + z_2}. \quad (25a)$$

Если требуется определить ток, проходящий по параллельно включенным линиям разной длины l_1 и l_2 , но

одинаковой конструкции, имеющим одинаковые величины удельных сопротивлений, т. е. величины r_y, x_y, z_y на 1 км линии, то выражения (24) и (25) можно переписать так:

$$I_1 = I \frac{l_2 z_y}{(l_1 + l_2) z_y} \quad \text{и} \quad I_2 = I \frac{l_1 z_y}{(l_1 + l_2) z_y}.$$

Так как удельное сопротивление обеих линий одинаково, то величина z_y в этих выражениях сокращается и они принимают вид:

$$I_1 = I \frac{l_2}{l_1 + l_2}; \quad (24б)$$

$$I_2 = I \frac{l_1}{l_1 + l_2}. \quad (25б)$$

Рассмотрим, как будут распределяться токи по параллельным линиям при перемещении места короткого замыкания на одной из них.

Обычно параллельные линии имеют одинаковую длину l и одинаковые сопротивления $r_{л}, x_{л}, z_{л}$. Схема замещения при одностороннем питании дана на рис. 7. Примем длину линий $l=1$. Если короткое замыкание произойдет на расстоянии d от шин подстанции A , то сопротивления параллельно включенных участков линий от шин подстанции A до места короткого замыкания будут равны $dz_{л}$ и $(2l-d)z_{л}$. Величина d берется в долях единицы. Эквивалентное сопротивление двух участков линий будет равно:

$$z_{э} = \frac{dz_{л}(2-d)z_{л}}{dz_{л} + (2-d)z_{л}} = z_{л} \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = z_{л} \cdot k. \quad (26)$$

Аналогично для активного и индуктивного сопротивлений:

$$r_{э} = r_{л} \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = r_{л} k; \quad x_{э} = x_{л} \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = x_{л} k. \quad (26а)$$

Для упрощения вычислений величина $d - \frac{d^2}{2}$ обозна-

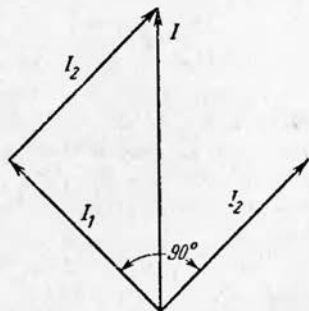


Рис. 6. Векторная диаграмма токов к примеру 8.

чается k . Подставив величину d в выражение $k = d - \frac{d^2}{2}$, определим численные значения k , приведенные ниже:

d	0	0,25	0,5	0,75	1
k	0	0,219	0,375	0,468	0,5
k_1	1	0,875	0,75	0,625	0,5
k_2	0	0,125	0,25	0,375	0,5

Ток короткого замыкания в любой точке линии будет равен:

$$I^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(x_c + kx_n)^2 + (r_c + kr_n)^2}} \quad (27)$$

Задаваясь значениями d , определяем величину k . Подставляя величины x_c , x_n , r_c , r_n в выражение (27), можно определить полный ток в месте короткого замыкания для любого значения d .

Токи I_1 и I_2 , протекающие к месту к. з. от шин подстанций A и B , определяются по известным выражениям:

$$I_1 = I \frac{z_2}{z_1 + z_2}; \quad I_2 = I \frac{z_1}{z_1 + z_2}.$$

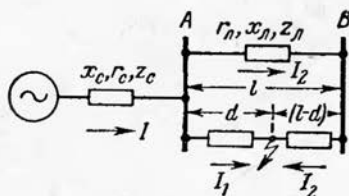


Рис. 7. К расчету распределения токов в параллельных линиях.

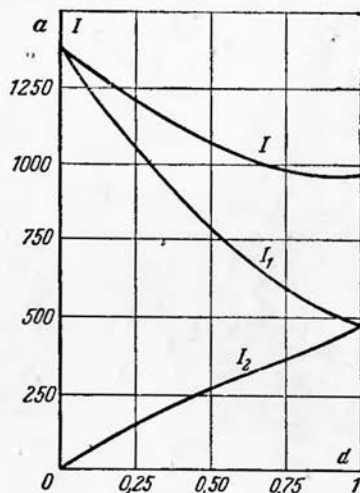


Рис. 8. Кривые распределения токов при коротком замыкании на параллельных линиях.

Так как величины z_1 и z_2 в этих выражениях пропорциональны d и $2-d$, то отношения $\frac{z_2}{z_1 + z_2}$ и $\frac{z_1}{z_1 + z_2}$ можно заменить отношениями $k_1 = \frac{2-d}{2} = 1 - \frac{d}{2}$ и $k_2 = \frac{d}{2}$.

Подставив в эти выражения величину d для разных точек к. з., найдем коэффициенты k_1 и k_2 , приведенные

выше. Пользуясь этими коэффициентами, для любого значения d можно определить токи:

$$I_1 = k_1 \cdot I \text{ и } I_2 = k_2 \cdot I. \quad (28)$$

По этим данным можно построить кривые распределения токов по линиям в зависимости от величины d . Эти кривые обычно используются для расчета защит параллельных линий.

Пример 9. Построить кривые токов короткого замыкания, проходящих по линиям, для схемы на рис. 7. Сопротивление $x_c = 4,6 \text{ ом}$; $r_c = 0,285 \text{ ом}$; $x_{л1} = 1,9 \text{ ом}$; $r_{л1} = 6,4 \text{ ом}$. Расчетное напряжение 11 кВ.

Определяем величины k , подставляем значения k $x_{л1}$ и $k r_{л1}$ в выражение (27). Для каждого значения d определяем величину полного тока $I^{(3)}$. Затем по коэффициентам k_1 и k_2 по выражению (28) определяются токи I_1 и I_2 . Результаты расчета заносятся в таблицу, а по ним строятся кривые на рис. 8.

d	0	0,25	0,5	0,75	1
I	1 380	1 210	1 060	985	965
I_1	1 380	1 060	795	615	482
I_2	0	150	265	370	482

8. РАСЧЕТ ТОКОВ К. З. ПРИ НАЛИЧИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В распределительных сетях точка короткого замыкания связана с генераторами системы, как правило, через трансформаторы. При выполнении расчетов токов к. з. удобно электромагнитную связь заменить электрической. Для этого трансформатор в расчетной схеме представляется схемой замещения.

Намагничивающим током трансформаторов пренебрегают, поэтому в схеме замещения ветвь намагничивания исключается и сопротивление этой ветви принимается равным бесконечности. Но для того, чтобы пользоваться схемой замещения трансформатора, необходимо все сопротивления, включенные последовательно с его первичной и вторичной обмотками, привести к одному напряжению (первичной или вторичной обмотки). Смысл приведения лучше всего поясняется примером.

На рис. 9,а изображен однофазный генератор, работающий через идеальный трансформатор на сопротивление. Трансформатор идеальный — сопротивление его равно нулю и потерь мощности в нем нет, поэтому мощности, проходящие через его первичную и вторичную обмотки, одинаковы.

Зная напряжения обмоток трансформатора U_1 и U_2 и токи, проходящие по его обмоткам I_1 и I_2 соответственно, можно по закону Ома определить сопротивления $z_1 = U_1/I_1$ и $z_2 = U_2/I_2$ и мощности $S_1 = U_1^2/z_1$ и $S_2 = U_2^2/z_2$.

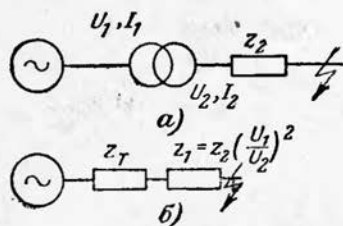


Рис. 9. Схемы к приведению сопротивлений с одним трансформатором.

Но так как мощности одинаковы: $S_1 = S_2$, то

$$\frac{U_1^2}{z_1} = \frac{U_2^2}{z_2},$$

откуда

$$z_1 = z_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (29)$$

В этом и заключается физический смысл приведения: любое сопротивление, включенное через трансформатор, можно измерять двояко: или на той стороне трансформатора, где оно действительно включено (z_2), или через трансформатор со стороны другой его обмотки (z_1).

При замене действительного трансформатора его схемой замещения необходимо сохранить неизменными величины тока и напряжения одной из его обмоток. Для этого и производится приведение сопротивлений по выражению (29).

У действительных трансформаторов в отличие от идеального сопротивление не равно нулю; в схему замещения оно включается последовательно с сопротивлениями участков сети, включенных до или после трансформатора (рис. 9, б).

Если в сети имеется несколько последовательно включенных трансформаторов, то приведение сопротивлений производится при переходе через каждый трансформатор. Так, если требуется привести сопротивление z в схеме на рис. 10, а к напряжению генератора, то приведение выполняется следующим образом.

а) Сопротивление z приводится к напряжению U_5 :

$$z_5 = z \left(\frac{U_5}{U_6} \right)^2.$$

б) Приведенное к напряжению U_5 сопротивление z_5 приводится к напряжению U_3 :

$$z_3 = z_5 \left(\frac{U_3}{U_4} \right)^2 = z \left(\frac{U_5}{U_6} \right)^2 \left(\frac{U_3}{U_4} \right)^2.$$

в) Приведенное к напряжению U_3 сопротивление z_3 приводится к напряжению U_1 :

$$z_1 = z_3 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = z \left(\frac{U_5}{U_6} \cdot \frac{U_3}{U_4} \cdot \frac{U_1}{U_2} \right)^2.$$

Из этого выражения видно, что промежуточных вычислений величин z_3 и z_5 выполнять не нужно и приведение можно выполнять сразу по выражению

$$z_1 = z \left(\frac{U_5}{U_6} \cdot \frac{U_3}{U_4} \cdot \frac{U_1}{U_2} \right)^2. \quad (30)$$

Схема замещения принимает вид, как на рис. 10,б.

Существует два способа приведения: точное и приближенное. При точном приведении в качестве величин напряжений $U_1 \dots U_6$ принимаются действительные междупазные напряжения холостого хода каждого трансформатора.

Для приближенного приведения используются так называемые средние номинальные напряжения ступеней: 0,4; 0,525; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 20,0; 37; 115; 154; 230; 330;

500 кВ. Условно считается, что номинальные напряжения всех элементов, включенных на какой-либо ступени напряжения, равны среднему номинальному напряжению этой ступени. Так, если действительный трансформатор имеет напряжения холостого хода 104/6,6 кВ и включен на ступени напряжения 115 кВ, то считается, что он имеет напряжения, равные средним номинальным: 115/6,3 кВ.

При расчете по средним номинальным напряжениям вычисления упрощаются; в выражении (30) величины $U_3 = U_2$, $U_5 = U_4$; они сокращаются, и расчетное выражение принимает более простой вид:

$$z_1 = z \left(\frac{U_1}{U_6} \right)^2. \quad (31)$$

Таким способом обычно пользуются для приближенного вычисления токов к. з. в основном при проектировании, когда неизвестны действительные величины на-

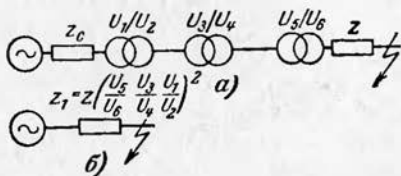


Рис. 10. Схемы к приведению сопротивлений в сети с несколькими трансформаторами.

пряжений трансформаторов. При расчетах токов к. з. в работающих сетях этот метод может вызвать недопустимые ошибки, из-за того что действительные напряжения трансформаторов распределительных сетей отличаются от средних. Так, например, в сетях 35 кв часто встречаются трансформаторы с номинальным напряжением холостого хода от $31,5 \pm 5\%$ до $38,5 \pm 5\%$. Вызвано это тем, что трансформаторы выпускались в разное время, по разным ГОСТ и с отступлением от ГОСТ. Часто встречаются трансформаторы, выпущенные до введения ГОСТ, и трансформаторы иностранных фирм. Токи короткого замыкания в распределительных сетях обычно невелики, чувствительность релейной защиты невелика и ошибки в вычислении тока, особенно преувеличение его, могут привести к неправильному выбору уставок защиты. Поэтому при расчетах токов к. з. в распределительных сетях, как правило, следует пользоваться действительными величинами напряжений трансформаторов.

Все трансформаторы имеют ответвления для регулирования напряжения, обычно в пределах $\pm 5-10\%$; все чаще применяются трансформаторы с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой в широких пределах. Учесть точно действительное положение ответвлений всех трансформаторов практически невозможно, поэтому при расчетах условно принимается, что на всех трансформаторах положение переключателей ответвлений соответствует основному номинальному напряжению. Так, если имеется трансформатор с напряжением $31,5 \pm 5\%$, то считается, что он всегда включен на ответвление 31,5 кв.

Пример 10. В схеме на рис. 10,а привести сопротивление z к напряжению генератора. Номинальные напряжения трансформаторов: $U_1/U_2=10,5/35$ кв; $U_3/U_4=31,5/6,6$ кв; $U_5/U_6=6/0,4$ кв.

Решение. По выражению (30) сопротивление z , приведенное к напряжению 10,5 кв, будет равно:

$$z_1 = z \left(\frac{U_5}{U_6} \cdot \frac{U_3}{U_4} \cdot \frac{U_1}{U_2} \right)^2 = z \left(\frac{6}{0,4} \cdot \frac{31,5}{6,6} \cdot \frac{10,5}{35} \right)^2 = 460z.$$

Если вместо действительных напряжений трансформаторов принять средние номинальные напряжения 0,4; 10,5 и 37 кв, то по выражению (31)

$$z_1 = z \left(\frac{U_1}{U_6} \right)^2 = z \left(\frac{10,5}{0,4} \right)^2 = 690z.$$

Ошибка в определении тока короткого замыкания в этом случае будет очень велика.

При выполнении расчетов можно пользоваться простым правилом: при приведении сопротивления к большему напряжению величина сопротивления увеличивается; при приведении к меньшему напряжению величина сопротивления уменьшается.

Поскольку устройства релейной защиты установлены в сетях на разных ступенях напряжения, необходимо производить пересчет тока к з. с учетом действительного коэффициента трансформации согласно выражению

$$I_2 = I_1 \frac{U_1}{U_2}. \quad (32)$$

9. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ПРИ ДВУХФАЗНОМ К. З. ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ, СОЕДИНЕННЫМ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА — ТРЕУГОЛЬНИК

Рассматривая поведение релейной защиты, установленной на стороне высшего напряжения трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Y/Δ , необходимо учитывать, что при двухфазном к. з. на стороне низшего напряжения в фазах обмоток, соединенных в звезду, будут проходить разные по величине токи (рис. 11):

$$I_{Y_{\max}}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{\Delta}^{(2)} \frac{U_{\Delta}}{U_Y}; \quad (33)$$

$$I_{Y_{\min}}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\Delta}^{(2)} \frac{U_{\Delta}}{U_Y}. \quad (34)$$

Аналогично при питании со стороны обмотки, соединенной в треугольник, и двухфазном коротком замыкании на стороне обмотки, соединенной в звезду,

$$I_{\Delta_{\max}}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_Y^{(2)} \frac{U_Y}{U_{\Delta}}; \quad (35)$$

$$I_{\Delta_{\min}}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_Y^{(2)} \frac{U_Y}{U_{\Delta}}. \quad (36)$$

В этих выражениях $I_{\Delta}^{(2)}$ и $I_Y^{(2)}$ — токи, проходящие в месте короткого замыкания на сто-

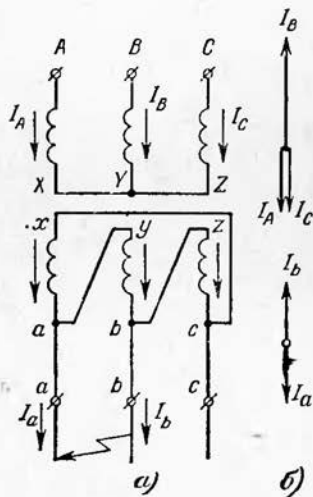


Рис. 11. Двухфазное короткое замыкание за трансформатором, соединенным по схеме Y/Δ .

а — распределение токов; б — векторная диаграмма токов.

ронах треугольника и звезды, отнесенные к напряжению той обмотки, на которой происходит короткое замыкание; U_Y и U_{Δ} — номинальные междуфазные напряжения обмоток, соединенных в звезду и треугольник; $I_{Y\text{ макс}}^{(2)}$, $I_{Y\text{ мин}}^{(2)}$ и $I_{\Delta\text{ макс}}^{(2)}$, $I_{\Delta\text{ мин}}^{(2)}$ — максимальные и минимальные величины токов в фазах со стороны звезды и треугольника.

Ток при двухфазном к. з. за трансформатором может быть определен в соответствии с выражением (2) как

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}.$$

10. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1 000 в

Особенностью расчета токов к. з. в сетях напряжением ниже 1 000 в является необходимость учета сопротивлений шин, трансформаторов тока, рубильников, автоматов и прочей аппаратуры. Вызвано это тем, что суммарные величины сопротивлений цепи короткого замыкания в таких сетях очень малы и соизмеримы с сопротивлениями аппаратуры. Если не учитывать сопротивления аппаратуры, то токи могут быть сильно преувеличены. Необходимо также учитывать активные сопротивления трансформаторов, питающих место к. з. Сопротивления системы до вводов трансформатора обычно можно не учитывать, т. е. считать, что трансформатор питается от системы бесконечной мощности.

Пример 11. Схема сети 0,4 кв трансформатора 560 ква из примера 10 дана на рис. 12. Определить ток трехфазного короткого замыкания в конце кабельной линии K_1 и в конце воздушной линии K_2 .

Трансформатор соединен с шинами 0,4 кв алюминиевыми шинами сечением 50×5 мм, расположенными в одной плоскости, с расстоянием между шинами 240 мм. Общая длина шин от трансформатора до автоматов отходящей линии 15 м.

На стороне 0,4 кв трансформатора установлен рубильник на 1 000 а, на отходящих линиях — автоматы на номинальный ток 200 а и трансформаторы тока ТКФ-3 с коэффициентом трансформации 200/5.

Кабельная линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами 3×70 мм²; длина ее 200 м. Воздушная линия длиной 200 м выполнена проводом А-70; нулевой провод А-35. Выход со щита 0,4 кв выполнен алюминиевым кабелем сечением $3 \times 70 + 1 \times 35$ мм² и длиной 20 м.

Решение. Среднее геометрическое расстояние между шинами $D_{\text{ср}} = 1,26 \cdot 240 = 300$ мм. По приложению П-22 активное сопротивление

ление 1 м шин 50×5 мм равно 0,142 мом/м; индуктивное при $D_{ср} = 300$ мм равно 0,2 мом/м. Сопротивления всей ошиновки равны: $r_{ш} = 0,142 \cdot 15 = 2,12$ мом и $x_{ш} = 0,2 \cdot 15 = 3,0$ мом.

Сопротивление контактов рубильника на 1000 а по приложению П-24 равно $r_p = 0,08$ мом.

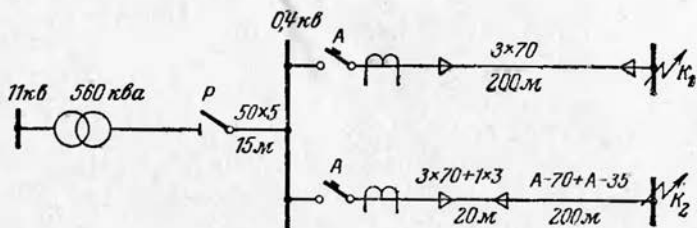


Рис. 12. Схема к примеру 11.

Сопротивления обмоток распределителей и контактов автоматов на 200 а по приложению П-24 равны:

$$x_a = 0,28 \text{ мом}; \quad r_a = 0,36 + 0,6 = 0,96 \text{ мом.}$$

Сопротивления трансформаторов тока по приложению П-23 равны: $r_{тТ} = 0,19$ мом, $x_{тТ} = 0,17$ мом.

Сопротивления трансформатора 560 ква, отнесенные к 0,4 кв, по приложению П-25 равны: $r_T = 4,79$ мом; $x_T = 15,0$ мом.

Сопротивления кабеля 3×70 мм² по приложениям П-9 и П-10 равны: $r = 0,443$ ом/км; $x = 0,08$ ом/км (индуктивное сопротивление кабеля до 1000 в мало отличается от индуктивного сопротивления кабеля 6 кв). Сопротивления всего кабеля равны: $r_k = 0,443 \cdot 0,2 = 0,0886$ ом = 88,6 мом; $x_k = 0,08 \cdot 0,2 = 0,016$ ом = 16 мом.

Суммарное сопротивление до места короткого замыкания K_1 равно:

$$r_{\Sigma} = r_T + r_{ш} + r_p + r_a + r_{тТ} + r_k = \\ = 4,79 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 88,6 = 95,74 \text{ мом};$$

$$x_{\Sigma} = x_T + x_{ш} + x_a + x_{тТ} + x_k = \\ = 15 + 3 + 0,28 + 0,17 + 16 = 34,45 \text{ мом.}$$

Ток

$$I^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \sqrt{95,74^2 + 34,45^2}} = 2250 \text{ а.}$$

Для воздушной линии активное сопротивление по приложению П-2 равно 0,46 ом/км; индуктивное сопротивление можно определить, как указано выше, по чертежам опор.

Принимаем $x \approx 0,3$ ом/км.

Сопротивления всей линии равны: $r_{л} = 0,46 \cdot 0,2 = 92$ мом; $x_{л} = 0,3 \cdot 0,2 = 60$ мом. Сопротивления кабеля равны: $r_k = 0,443 \cdot 0,02 = 8,86$ мом; $x_k = 0,08 \cdot 0,02 = 1,6$ мом. Остальные сопротивления такие

же, как и для кабельной линии. Ток при коротком замыкании в точке K_2 равен:

$$I^{(2)} = \frac{400 \times}{\sqrt{3} \sqrt{(4,79 + 2,12 + 0,08 + 0,96 + 0,19 + 8,86 + 92)^2 + \dots}} \times 1000 \leftarrow \dots = 1800 \text{ а.}$$

$$\leftarrow \dots \frac{\times 1000}{+(15 + 3 + 0,28 + 0,17 + 1,6 + 60)^2} = 1800 \text{ а.}$$

Поскольку сети напряжением 0,4 кв работают с заземленной нейтралью, в них, кроме междуфазных, могут возникать также однофазные к. з. на землю.

Для вычисления тока однофазного короткого замыкания в сетях 0,4 кв с заземленной нейтралью согласно [Л. 6, 7] рекомендуется пользоваться приближенным выражением

$$I^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{z_{\Pi} + \frac{1}{3} z_{\tau}^{(1)}}, \quad (37)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение сети, равное $\frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,23 \text{ кв}$;

z_{Π} — сопротивление короткозамкнутой петли проводов фаза—нуль;

$$z_{\Pi} = \sqrt{r_{\Pi}^2 + x_{\Pi}^2};$$

активное сопротивление r_{Π} берется по справочным таблицам; индуктивное x_{Π} можно определить по формулам на основании чертежей опор; рекомендуется принимать [Л. 6, 7] удельное сопротивление $x_{\Pi} = 0,6 \text{ ом/км}$ для петли проводов из цветных металлов любого сечения:

$\frac{1}{3} z_{\tau}^{(1)}$ — треть полного сопротивления трехфазного трех-

стержневого трансформатора с обмотками, соединенными по схеме Y/Y_0 , при однофазном коротком замыкании на стороне низшего напряжения.

Эта величина определяется на основании данных приложения П-21.

Величины $\frac{1}{3} z_{\tau}^{(1)}$, приведенные в приложении П-21,

относятся только к трансформаторам, выполненным по ГОСТ 401-41, в основном к трансформаторам старой серии ТМ. Пользоваться этими данными для трансформаторов других типов нельзя.

Следует особо отметить, что пользоваться вместо величины $\frac{1}{3} z_{\tau}^{(1)}$ величиной z_{τ} , определенной по выражению (10), недопустимо.

Пример 12. Определить ток однофазного короткого замыкания в конце воздушной линии примера 11 (точка K_2 на рис. 12).

Решение. Сопротивление трансформатора 560 *кВА* $z_{\tau}^{(1)}/3$ по приложению П-21 равно 0,052 *ом*.

Активное сопротивление петли фаза—нуль длиной 200 *м*, состоящей из 200 *м* провода А-70 и 200 *м* провода А-35, равно по приложению П-2 $r_{\Pi} = 0,46 \cdot 0,2 + 0,92 \cdot 0,2 = 0,276$ *ом*. Индуктивное сопротивление петли $x_{\Pi} = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$ *ом*.

Полное сопротивление проводов

$$z_{\Pi} = \sqrt{0,276^2 + 0,12^2} = 0,3 \text{ см.}$$

$$I^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3}(0,3 + 0,052)} = 655 \text{ а.}$$

Если линии выполнены стальными проводами, то сопротивление стальных проводов в расчете принимается для тока, равного трехкратному номинальному току плавкой вставки предохранителя или трехкратному номинальному току расцепителя автомата, имеющего обратно зависимую от тока характеристику. Если же автомат имеет только электромагнитный мгновенный расцепитель, то сопротивление стальных проводов определяется для тока, равного 1,4 тока срабатывания автомата до 100 *а* и 1,25 для других автоматов. Так поступают, если неизвестен разброс автоматов по току срабатывания. Если же разброс известен, то сопротивления стальных проводов принимаются для тока, равного току срабатывания автомата, умноженному на 1,1 и на коэффициент, учитывающий разброс автомата.

Пример 13. Автомат дает разброс по току срабатывания $\pm 30\%$. Для какого тока следует определять сопротивления стальных проводов?

Решение. Сопротивления стальных проводов следует определять для тока, равного току срабатывания автомата, умноженному на 1,1, т. е. $1,3 \cdot 1,1 = 1,43$.

Пример 14. Определить ток однофазного короткого замыкания в конце линии длиной 200 *м*, выполненной проводом ПС-50 в фазе и ПС-25 в нуле.

Линия защищена предохранителем с плавкой вставкой на 30 *а* и питается от трансформатора мощностью 50 *кВА*.

Решение. По приложению П-21 $z_{\tau}^{(1)}/3 = 0,51$ *ом*. Внешнее индуктивное сопротивление петли фаза—нуль по [Л. 6, 7] принимается 0,6 *ом/км*.

Активное сопротивление проводов для тока $3 \cdot 30 = 90$ а по приложению П-11 равно для ПС-50 $3,7$ ом/км и для ПС-25 $6,4$ ом/км. Внутреннее индуктивное сопротивление по приложению П-12 для ПС-50 равно $1,15$ ом/км и для ПС-25 $1,72$ ом/км.

Сопротивление предохранителя в расчете не учитывается, так как оно мало:

$$z_n = \sqrt{(3,7 \cdot 0,2 + 6,4 \cdot 0,2)^2 + (0,6 \cdot 0,2 + 1,15 \cdot 0,2 + 1,72 \cdot 0,2)^2} = 2,12 \text{ ом};$$

$$I^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3}(2,12 + 0,51)} = 88 \text{ а.}$$

Требования ПУЭ в этом случае не выполняются, так как $I^{(1)}$ меньше утроенного номинального тока плавкой вставки предохранителя (90 а).

Необходимо отметить, что в выражении (37) полные сопротивления проводов и трансформатора складываются арифметически, а не геометрически; это несколько преувеличивает суммарное сопротивление и уменьшает ток короткого замыкания, что идет в запас надежности работы защиты. С учетом этого можно считать, что в примере 14 требования ПУЭ выполнены.

Пример 15. Определить ток короткого замыкания в примере 14, если линия защищена автоматом с мгновенным электромагнитным расцепителем, имеющим ток срабатывания 30 а.

Решение. Согласно ПУЭ сопротивления стальных проводов следует определять для тока, равного $1,4$ тока срабатывания автомата, или $1,4 \cdot 30 = 42$ а. По приложению П-11 активное сопротивление стальных проводов для тока 42 а $3,45$ ом/км для ПС-50 и 7 ом/км для ПС-25. Внутреннее индуктивное сопротивление по приложению П-12 равно $0,89$ ом/км для ПС-50 и $2,1$ ом/км для ПС-25.

$$I^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(3,45 \cdot 0,2 + 7 \cdot 0,2)^2 + (0,6 \cdot 0,2 + 0,84 \cdot 0,2 + 2,1 \cdot 0,2)^2 + 0,51}} = 84 \text{ а.}$$

Требования ПУЭ выполнены: ток $I^{(1)}$ больше $1,4$ тока срабатывания автомата (42 а).

Следует отметить, что в данном случае определяется ток короткого замыкания между фазой и заземленным нулем, а не между фазой и землей. Разница заключается в том, что ток в этом случае проходит только по проводам фазы и нуля. Если же фазный провод коснется земли, а не нулевого провода, то ток к. з. будет проходить от фазы по земле, через повторные заземления нулевого провода, заземление нуля у самого трансфор-

матора и по нулевому проводу. В цепи короткого замыкания появятся дополнительные сопротивления самой земли и переходные сопротивления заземлителей, а сопротивление линии увеличится. Расчет в этом случае сложен и не рассматривается.

11. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ К. З. ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ, СОЕДИНЕННЫМ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА — ЗВЕЗДА С ЗАЗЕМЛЕННЫМ НУЛЕМ

Рассматривая поведение релейной защиты при однофазных к. з. за трансформатором Y/Y_0 , следует учитывать, что токи на стороне высшего напряжения будут



Рис. 13. Однополюсное короткое замыкание за трансформатором, соединенным по схеме Y/Y_0 . а — распределение токов; б — векторная диаграмма токов.

проходить во всех трех фазах (рис. 13). Величины токов равны:

$$I_{Y_{\max}}^{(1)} = \frac{2}{3} I_{Y_0}^{(1)} \frac{U_{Y_0}}{U_Y}; \quad (38)$$

$$I_{Y_{\min}}^{(1)} = \frac{1}{3} I_{Y_0}^{(1)} \frac{U_{Y_0}}{U_Y}, \quad (39)$$

где $I_{Y_0}^{(1)}$ — полный ток короткого замыкания фаза—нуль на стороне 0,4 кВ;

$I_{Y_{\max}}^{(1)}$ и $I_{Y_{\min}}^{(1)}$ — соответственно максимальный и минимальный токи со стороны питания;

U_{Y_0} и U_Y — номинальные междуфазные напряжения трансформатора.

Величину тока $I_{Y0}^{(1)}$ можно определить по выражению (37), приняв в нем $z_{II} = 0$. Сопротивление сети до трансформатора в этом выражении не учитывается.

Пример 16. Определить токи на стороне 11 кВ при однофазном коротком замыкании на шинах 0,4 кВ при мощности трансформатора 560 кВА и напряжении 11/0,4 кВ.

Решение. По приложению П-21 полное сопротивление $z_T^{(1)}$

$$\frac{z_T^{(1)}}{3} = 0,052 \text{ ом, отнесенных к напряжению } 0,4 \text{ кВ.}$$

Ток

$$I_Y^{(1)} = \frac{U_\Phi}{\frac{1}{3} z_T^{(1)}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,052} = 4460 \text{ а.}$$

На стороне 11 кВ токи будут равны:
в поврежденной фазе

$$I_{Y_{\text{макс}}}^{(1)} = \frac{2}{3} \cdot 4460 \cdot \frac{0,4}{11} = 108 \text{ а,}$$

в неповрежденных фазах

$$I_{Y_{\text{мин}}}^{(1)} = \frac{1}{3} \cdot 4460 \cdot \frac{0,4}{11} = 54 \text{ а.}$$

12. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Для сети с односторонним питанием междуфазные напряжения при трехфазном коротком замыкании равны:

$$U^{(3)} = \sqrt{3} I^{(3)} z, \quad (40)$$

где $I^{(3)}$ — ток трехфазного короткого замыкания;

z — сопротивление от точки к. з. до места установки реле, ом/фазу.

При двухфазном коротком замыкании выражение принимает вид:

$$U^{(2)} = 2I^{(2)}z. \quad (41)$$

В этом выражении $U^{(2)}$ — междуфазное напряжение между поврежденными фазами. Напряжения между здоровой и поврежденной фазами всегда будут больше $U^{(2)}$ и никогда не снижаются ниже 0,866 нормального напряжения.

Подставив в выражение (41) $I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}$, определим, что

$$U^{(2)} = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)} z = \sqrt{3} I^{(3)} z = U^{(3)}. \quad (42)$$

Поэтому достаточно все расчеты остаточных напряжений вести для трехфазного к. з., если не требуется определять напряжения между здоровой и поврежденными фазами при двухфазном коротком замыкании.

Пример 17. Определить остаточное напряжение на шинах подстанции А (рис. 14) при трехфазном к. з. за реактором подстанции Б. Ток короткого замыкания равен 6 000 а; данные реактора даны в примере 2; $U_n = 6,0$ кв; $I_n = 600$ а; $u_n = 6\%$.

По примеру 2 сопротивление реактора $x_p = 0,346$ ом.

Решение. Напряжение на шинах подстанции Б равно $U^{(3)} = \sqrt{3} I^{(3)} z = \sqrt{3} \cdot 6 000 \times 0,346 = 3,6$ кв.

Пренебрегая падением напряжения от тока нагрузки в линии между подстанциями А и Б, можно считать, что и на подстанции А напряжение равно 3,6 кв.

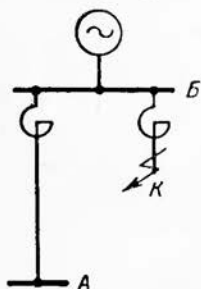


Рис. 14. Схема к примеру 17.

13. ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ РЕЖИМОВ И ПОРЯДОК ВЫЧИСЛЕНИЙ ТОКОВ КОРТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Обычно при выборе уставок релейной защиты необходимо рассчитать токи, проходящие через реле защиты в трех режимах: нормальном, минимальном и максимальном. Под нормальным режимом обычно понимается режим, соответствующий нормальной схеме работы сети, в котором сеть работает длительно. Максимальным режимом для каждой защиты будет такой режим, когда через данную защиту проходит максимально возможный ток короткого замыкания. Минимальным режимом считается такой режим, когда через данную защиту проходит минимально возможный ток короткого замыкания. Эти режимы, как правило, создаются изменением схемы сети: включением и отключением линий и трансформаторов для ремонтов, уменьшения потерь в сети, регулирования напряжения и перераспределения потоков мощности и т. п. Кроме того, необходимо учитывать и аварийные режимы, создающиеся при повреждениях линий

и трансформаторов. Точные рекомендации по выбору расчетных режимов дать трудно, так как схемы сетей и режимы чрезвычайно разнообразны и должны выбираться для каждого конкретного случая на основе изучения данной сети и условий ее эксплуатации.

Обычно одна и та же величина тока короткого замыкания используется для расчета нескольких защит. Сам процесс вычисления токов короткого замыкания требует довольно много времени. Поэтому необходимо процесс вычислений организовать таким образом, чтобы он требовал минимальной затраты времени, обеспечивал минимальную возможность ошибок, возможность легкого и быстрого отыскания допущенной ошибки и исключал вычисление токов, не нужных для расчета защит.

Для соблюдения этих условий необходимо:

а) определить виды коротких замыканий, необходимые для расчета всех защит, установленных на рассматриваемом участке сети;

б) определить условия выбора токов срабатывания, проверки чувствительности, согласования характеристик и прочие требования для каждой защиты; на основании этого наметить места коротких замыканий и режимы, в которых рассчитываются токи; каждая точка короткого замыкания обозначается порядковым номером; режимы также следует обозначать порядковыми номерами;

в) составить расчетную схему сети и привести все сопротивления элементов сети к выбранному расчетному напряжению; на расчетной схеме нанести выбранные места коротких замыканий;

г) тщательно изучить расчетные режимы и объединить одинаковые режимы для разных точек короткого замыкания в одну группу;

д) вычислить токи короткого замыкания для каждого режима, последовательно перенося точку к. з., начиная от источника питания до самой удаленной точки короткого замыкания.

Для ускорения расчетов и уменьшения ошибок рекомендуется все расчеты записывать по определенной форме, желательнее в виде таблиц.

Пример 18. Составить расчетные условия, выбрать точки короткого замыкания и режимы для расчета защит участка сети, изображенного на рис. 15.

Решение. Намечаем типы защит, устанавливаемых на каждом элементе подстанций *В* и *Г*, и заносим их в табл. 1. В эту же

таблицу заносит расчетные условия для каждой защиты, места коротких замыканий и режимы.

Ток короткого замыкания, которые необходимо вычислить для расчета всех защит, объединены в табл. 2.

Всего требуется произвести 16 расчетов.

На основании табл. 1 и 2 вычисляются необходимые величины и заполняется табл. 3. При этом с помощью табл. 3 для вычисления сопротивлений до каждой точки к. з. используется величина сопротивления, вычисленная для предыдущей точки, и к ней добавляются сопротивления элементов, лежащих между этими двумя

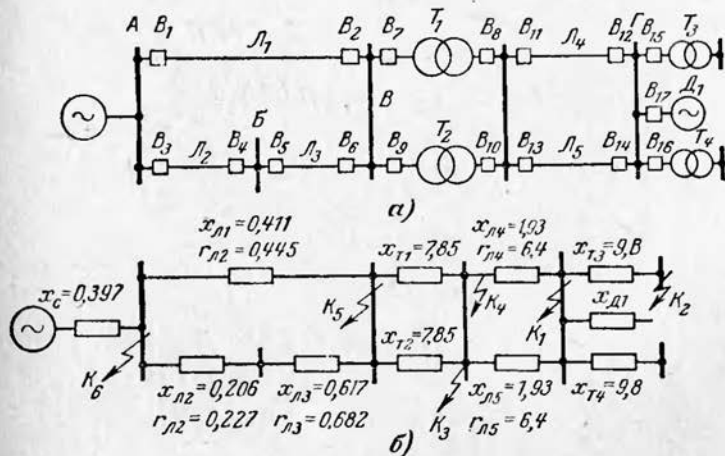


Рис. 15. Схемы к примеру 18.

а — схема сети; б — расчетная схема замещения.

точками. Такой способ значительно облегчает процесс вычислений. Эти вычисления производятся для каждого режима. Начальная точка к. з. берется как можно ближе к источнику питания; все последующие точки к. з. отодвигаются от источника питания в сеть.

В качестве расчетного вида принимается трехфазное к. з. и вычисляется ток $I^{(3)}$.

Для определения тока при двухфазном к. з. используется известное выражение

$$I^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}$$

Исключением являются два случая:

1) в сетях 0,4 кВ с заземленной нейтралью расчетным случаем является замыкание между фазой и нулевой точкой;

2) при коротких замыканиях за трансформатором, соединенным по схеме Y/Δ , расчетным случаем является двухфазное к. з.

Исходные данные для заполнения таблиц:

линии Л₁, Л₂, Л₃ выполнены на П-образных опорах (см. рис. 3) проводом А-70 и имеют длину 10, 5 и 15 км соответственно;

трансформаторы Т₁ и Т₂ мощностью по 1 000 кВА;

$u_k = 6,5\%$; номинальные напряжения $35 \pm 5\% / 11$ кВ;

№ п/п.	Защищаемый элемент	Тип защиты	Условия для выбора тока срабатывания			Условия для проверки чувствительности защиты как основной			Условия для согласования с нижестоящей защитой			Условия для проверки чувствительности защиты как резервной		
			Условия	№ точки к. з.	№ режима	Условия	№ точки к. з.	№ режима	Условия	№ точки к. з.	№ режима	Условия	№ точки к. з.	№ режима
1	Двигатель D_1	Отсечка	Отстройка от пускового тока	—	—	$K^{(2)}$ на шинах подстанции в режимах Г: а) нормальном б) минимальном при отключении L_1, L_2, L_4	1 1	I II	—	—	—	—	—	—
2	Трансформаторы T_3 и T_4	Отсечка	Отстройка от тока трехфазного к. з. на шинах 0,4 кв подстанции Г	2	1	Как и для защиты двигателя D_1	1 1	I II	—	—	—	—	—	—
		Максимальная токовая	Отстройка от тока нагрузки с учетом тока самозапуска двигателей или по чувствительности	—	—	$K^{(2)}$ на шинах 0,4 кв подстанции Г в режимах: а) нормальном б) минимальном, как для защиты двигателя D_1	2 2	I II	$K^{(2)}$ на шинах 0,4 кв подстанции в режимах: а) нормальном б) минимальном, как для защиты двигателя D_1	2 2	I II	—	—	—
3	Линии L_4 и L_5 со стороны подстанции В	Отсечка	Отстройка от тока трехфазного к. з. на шинах 10 кв подстанции Г при работе одной линии L_4 или L_5	1	III	$K^{(2)}$ на шинах 10 кв подстанции В в режимах: а) нормальном б) минимальном отключены L_4 и T_1	3 3	I IV	—	—	—	—	—	—

	Максимальная токовая	Отстройка от нагрузки с учетом токов самозапуска двигателей и отстройки от токов срабатывания защит D_1, T_3, T_4	—	—	$K^{(2)}$ на шинах 10 кв подстанции Г в режимах: а) нормальном б) минимальном при отключении L_1 и T_1	1 1	I IV	$K^{(3)}$ на шинах подстанции Г при работе одной из линий L_4 или L_5	1	III	$K^{(2)}$ на шинах 0,4 кв подстанции в режиме: отключены L_1, T_1	2	IV
4	Линии L_4 и L_5 со стороны подстанции Г	Направленная максимальная токовая или поперечная дифференциальная	Отстройка от токов нагрузки, как защита со стороны подстанции В, или по чувствительности	—	—	$K^{(2)}$ в конце линии L_4 или L_5 , отключенной от подстанции, В, при отключенных L_1 и T_1	4	IV	—	—	—	—	—
5	Трансформаторы T_1 и T_2	Отсечка	Отстройка от тока трехфазного к. з. на шинах 10 кв подстанции В при работе одного трансформатора T_1 или T_2	3	V	$K^{(2)}$ на шинах 35 кв подстанции В в режимах: а) нормальном б) отключен L_1	5 5	I IV	—	—	—	—	—
	Максимальная токовая	Отстройка от токов нагрузки, отстройка от токов срабатывания защит L_4 и L_5 или по чувствительности	—	—	$K^{(2)}$ на шинах 10 кв подстанции В в режимах: а) нормальном б) отключена L_1	3 3	I IV	$K^{(3)}$ на шинах 10 кв подстанции Г при работе одного трансформатора T_1 или T_2	1	V	—	—	—

* На трансформаторах T_3 и T_4 должны быть также установлены защиты от однофазных коротких замыканий на стороне 0,4 кв. Расчет токов однофазного к. з. на стороне 0,4 кв, необходимый для проверок чувствительности этих защит, приведен в примере 16.

Таблица 2

Режим	Место короткого замыкания	Режим	Место короткого замыкания
I	1, 2, 3, 5, 6	IV	1, 2, 3, 4
II	1, 2	V	1, 3
III	1	VI	3, 5

линии L_4 и L_5 длиной 5 км выполнены проводом А-25 на опорах по рис. 4;

трансформаторы T_3 и T_4 по 560 ква; $u_k=5,5\%$; номинальные напряжения $10\pm 5\%/0,4$ кВ;

ток трехфазного к. з. на шинах 35 кВ питающей подстанции 5 000 а.

Решение. За расчетную ступень напряжения принимаем 11 кВ, так как на этой ступени установлено наибольшее количество защит.

Сопротивление системы по выражению (4) равно:

$$z_c = \frac{35\,000}{\sqrt{3} \cdot 5\,000} = 4 \text{ ом.}$$

Приведенное к напряжению 11 кВ сопротивление системы равно по выражению (29):

$$z_c = \frac{4 \cdot 11^2}{35^2} = 0,397 \text{ ом.}$$

Индуктивное сопротивление линии 35 кВ по примеру 3 равно 0,417 ом/км; активное сопротивление по приложению П-3 равно 0,46 ом/км. Индуктивные сопротивления линий L_1 , L_2 , L_3 равны 4,17; 2,08 и 6,25 ом; активные 4,6; 2,3 и 6,9 ом.

Сопротивления линий 35 кВ, приведенные к напряжению 11 кВ, будут равны согласно (29):

$$x_{л1} = \frac{4,17 \cdot 11^2}{35^2} = 0,411 \text{ ом; } r_{л1} = 4,6 \cdot \frac{11^2}{35^2} = 0,455 \text{ ом;}$$

$$x_{л2} = \frac{2,08 \cdot 11^2}{35^2} = 0,206 \text{ ом; } r_{л2} = 2,3 \cdot \frac{11^2}{35^2} = 0,227 \text{ ом;}$$

$$x_{л3} = \frac{6,25 \cdot 11^2}{35^2} = 0,617 \text{ ом; } r_{л3} = 6,9 \cdot \frac{11^2}{35^2} = 0,682 \text{ ом.}$$

Сопротивления трансформаторов T_1 и T_2 определяем по выражению (10):

$$z_{T1} = z_{T2} = \frac{10 \cdot 6,5 \cdot 11^2}{1\,000} = 7,85 \text{ ом.}$$

Индуктивное сопротивление линий L_4 и L_5 определено в примере 4: $x=0,387$ ом/км. Активное сопротивление по приложению П-2 равно 1,28 ом/км. Сопротивления линий соответственно будут равны: $x_{л4}=x_{л5}=0,387 \cdot 5=1,93$ ом и $r_{л4}=r_{л5}=1,28 \cdot 5=6,4$ ом. Эти 38

Таблица 3

Режимы		Место короткого замыкания		Исходные режимы и место к. з.	Сопротивления элементов сети до места короткого замыкания							
№	Исходная схема	№	Названия		элемент	х элемента	х _Σ	r элемента	r _Σ	z _Σ	l ⁽³⁾	
I	Нормальный	6	Шины 35 кв подстанции А	—	Система	1,397	0,397 0,397	0	0	— 0,397	— 16 000	
		5	Шины 35 кв подстанции В	I-6	$L_1 \parallel L_2 + L_3$	$0,411 \parallel 0,206 + 0,617$	0,276	0,445 0,227 + 0,682	0,285	—	—	—
		3	Шины 11 кв подстанции В	I-5	$T_1 \parallel T_2$	$7,85 \parallel 7,85$	3,925 4,598	0	0	0,285	—	— 1 380
		1	Шины 11 кв подстанции Г	I-3	$L_4 \parallel L_5$	$1,93 \parallel 1,93$	0,965 5,563	6,4 6,4	3,2 3,485	—	—	— 965
		2	Шины 0,4 кв подстанции Г	I-1	T_3	9,8	9,8 15,363	0	0	0	—	— 400
		5	Шины 35 кв подстанции В	—	$L_2 + L_3$	$0,206 + 0,617$	0,823 1,220	0,227 + 0,682	0,909	0,909	—	— 4 200
VI	Отключена L ₁	3	Шины 11 кв подстанции В	VI-5	$T_1 \parallel T_2$	$7,85 \parallel 7,85$	3,925 5,145	0	0,909	—	— 1 220	

Режимы		Место короткого замыкания		Исходные режимы в месте к. з.	Сопротивления элементов сети до места короткого замыкания										
№	Исходная схема	№	Названия		элемент	x элемента	x Σ	r элемента	r Σ	r Σ	r ⁽³⁾				
IV	Отключены L_1 и T_1	3	Шины 11 кв подстанции В	VI-5	T_2	7,85	7,85	0	0	0,909	—	695			
		1	Шины 11 кв подстанции Г	IV-3	$L_4 \parallel L_5$	—	1,93 1,93	—	6,4	3,2	—	—	585		
		2	Шины 0,4 кв подстанции Г	IV-1	T_3	—	9,8	9,8	0	0	4,109	—	—	315	
		4	Конеч линия L_5 , отключенной от подстанции В	IV-1	L_5	—	1,93	11,965	6,4	6,4	10,509	—	—	400	
II	Отключены L_1 , T_1 и L_4	1	Шины 11 кв подстанции Г	IV-3	L_5	1,93	1,93	6,4	6,4	6,4	—	—	—	485	
		2	Шины 0,4 кв подстанции Г	II-1	T_3	—	9,8	9,8	0	0	7,809	—	—	—	290
		3	Шины 11 кв подстанции В	I-5	T_2	7,85	7,85	0	0	0	0,285	—	—	740	
V	Отключены T_1	1	Шины 11 кв подстанции Г	V-3	$L_4 \parallel L_5$	—	1,93 1,93	6,9	6,9	3,45	—	—	—	620	
		1	Шины 11 кв подстанции Г	I-3	L_5	—	1,93	1,93	6,9	6,9	7,285	—	—	652	

линии находятся на расчетной ступени напряжений и приводить их сопротивления не нужно.

Сопротивления трансформаторов T_3 и T_4 равны:

$$z_{T_3} = z_{T_4} = \frac{10 \cdot 5,5 \cdot 10^2}{560} = 9,8 \text{ Ом.}$$

Необходимо обратить внимание на то, что при определении сопротивлений трансформаторов T_3 и T_4 принято их номинальное напряжение 10,0 кВ, хотя они и включены на расчетной ступени напряжения 11 кВ. К напряжению 11 кВ их сопротивления не приводятся.

Полученные результаты наносятся на расчетную схему по рис. 15,б. Далее на схеме намечаются места коротких замыканий и начинается заполнение табл. 3. После заполнения табл. 3 определяются токи по отдельным элементам сети, необходимые для расчета защит.

Для расчета защиты линий L_1 , L_2 , L_3 и трансформаторов T_1 , T_2 токи короткого замыкания, определенные при расчетном напряжении 11 кВ, по выражению (32) пересчитывают на напряжение 35 кВ. Например, ток короткого замыкания на шинах 35 кВ подстанции В при отключенной линии L_1 (VI-5 в табл. 3) равен:

$$I_{35} = I_{11} \frac{U_{11}}{U_{35}} = 4200 \cdot \frac{11}{35} = 1320 \text{ а.}$$

Для параллельно включенных элементов сети определяется ток через каждый элемент. Например, токи короткого замыкания на шинах подстанции В в нормальном режиме (1-5 в табл. 3) распределяются по линиям L_1 , L_2 и L_3 по выражениям (246) и (256), так как удельные сопротивления линий одинаковы.

Одновременно токи приводятся к напряжению 35 кВ по выражению (32). Ток по линии L_1 равен:

$$I_1 = I \frac{l_2 + l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot \frac{U_{11}}{U_{35}} = 8700 \cdot \frac{5 + 15}{10 + 5 + 15} \cdot \frac{11}{35} = 1830 \text{ а.}$$

Ток по линиям L_2 и L_3 равен:

$$I_1 = I \frac{l_1}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot \frac{U_{11}}{U_{35}} = 8700 \cdot \frac{10}{10 + 5 + 15} \cdot \frac{11}{35} = 840 \text{ а.}$$

14. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

На величину короткого замыкания может значительное влияние оказывать нагрузка. Рассмотрим схему, приведенную на рис. 16,а, в которой за сопротивлением $z_{1л}$ между источником питания и точкой к. з. включена нагрузка z_n . В этом случае, очевидно, по сопротивлению $z_{1л}$ будет проходить суммарный ток, определяемый нагрузкой и коротким замыканием.

Складывая параллельно сопротивления z_n и $z_{2л}$ и определив их суммарное сопротивление, можно рассчи-

тать токи, проходящие от системы $I_c^{(3)}$ и по сопротивлению $z_{1л}$ $I_K^{(3)}$

$$I_c^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \left(z_c + z_{1л} + \frac{z_n z_{2л}}{z_n + z_{2л}} \right)} \quad (43)$$

Из этого выражения видно, чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше ток, идущий от системы, $I_c^{(3)}$.

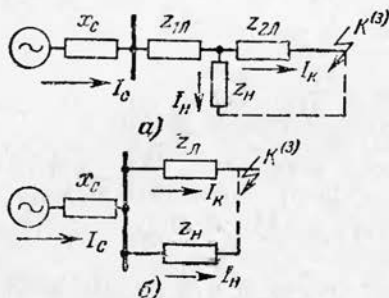


Рис. 16. Схема для определения влияния нагрузки на величину тока короткого замыкания.

Этот ток далее разветвляется; часть его поступает в сопротивление нагрузки, а часть уходит к месту к. з.

Ток, проходящий в месте короткого замыкания, $I_K^{(3)}$ определится по выражению:

$$I_K^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \left(z_c + z_{1л} + z_{2л} + \frac{(z_c + z_{1л}) z_{2л}}{z_n} \right)} \quad (44)$$

Следовательно, ток, проходящий в месте к. з., с учетом нагрузки будет меньше, чем при расчете, выполненном без учета нагрузки. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем меньше ток в месте к. з.

Для учета нагрузки при расчетах токов к. з. ее сопротивление может быть определено по следующему выражению:

$$z_n = \frac{U}{\sqrt{3} I_n} = \frac{U^2}{S_n}, \quad (45)$$

где U — междуфазное напряжение на шинах в нормальном режиме, в;

I_n — максимальный длительный ток нагрузки, а;

S_n — мощность нагрузки, ва.

Кратковременные толчки нагрузки, например при массовом пуске электродвигателей или в цикле АПВ, не учитываются. Коэффициент мощности нагрузки условно принимают равным 0,8; $\cos \varphi_n = 0,8$.

Активное и индуктивное сопротивления нагрузки определяются по выражениям:

$$r_n = z_n \cos \varphi_n = 0,8 z_n; \quad (46)$$

$$x_n = z_n \sin \varphi_n = 0,6 z_n. \quad (47)$$

Поскольку при выборе уставок релейной защиты обычно требуется знать две величины тока короткого замыкания: максимальную и минимальную, расчет производится дважды. Расчет без учета нагрузки дает максимальное значение тока короткого замыкания в месте короткого замыкания и минимальное значение тока от источника питания. Расчет с учетом полной нагрузки дает минимальную величину тока в месте к. з. и максимальную величину тока от источника питания. Поскольку нагрузка в распределительных сетях подключена во многих точках, точно учесть ее при расчетах токов к. з. невозможно. В то же время полностью пренебречь влиянием нагрузки на величину тока короткого замыкания нельзя, ибо это может вызвать серьезные ошибки. Поэтому нагрузку при расчетах учитывают условно. Вся нагрузка заменяется сопротивлением постоянной величины z_n , подключенным непосредственно к шинам подстанции, питающей рассматриваемую сеть, как показано на рис. 16,б.

Поскольку сложение двух параллельно включенных полных сопротивлений z_n и z_l , имеющих разные углы, сравнительно сложно, при расчете токов к. з. с учетом нагрузки в распределительных сетях 6—10 кв можно принимать, что $\varphi_n = \varphi_l$. Это допущение вносит незначительную погрешность, что подтверждается характеристиками, построенными на рис. 17. Угол φ_n нагрузки при $\cos \varphi_n = 0,8 \div 0,9$ мало отличается от угла φ_l для воздушных линий, выполненных сталеалюминиевыми и алюминиевыми проводами небольших сечений (25—50 мм²). Поэтому эквивалентное сопротивление линии и нагрузки z_0 можно определять по выражению

$$z_0 = \frac{z_n z_l}{z_n + z_l}. \quad (48)$$

Если рассматриваемая сеть 6—10 кВ питается от понижительной подстанции 35/6—10 кВ, в свою очередь питающейся по линиям 35 кВ, то приближенно можно считать, что угол φ_c определяется в основном сопротивлениями линий 35 кВ и поэтому достаточно близок к углу φ_n . В этом случае сопротивления z_c и z_a складываются арифметически.

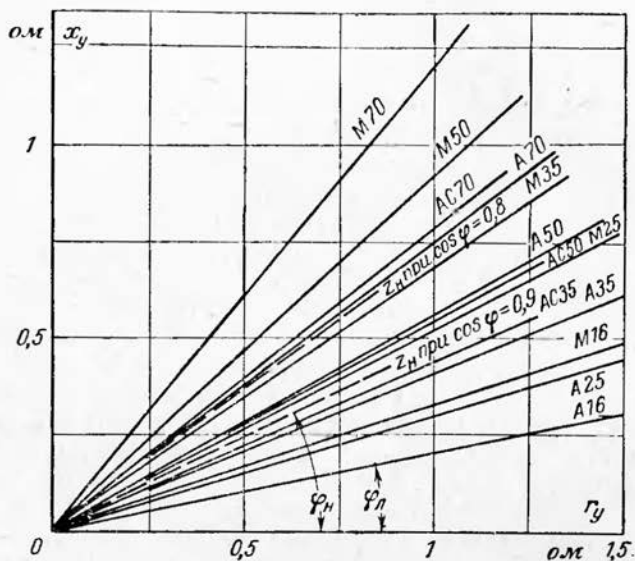


Рис. 17. Сопоставление углов φ_n и φ_l .

Если рассматриваемая сеть питается от шин мощной понижительной подстанции 110/6—10 кВ, то обычно величина z_c очень мала. Так, для сетей 6—10 кВ, питающихся от трансформаторов 110/6—10 кВ мощностью 10—20 Мва и более, величина z_c обычно колеблется в пределах 0,5—1,5 ом. Таким сопротивлением обычно можно пренебречь, считая его равным нулю. Тогда шины, питающие рассматриваемую сеть, окажутся шинами системы бесконечной мощности. При этом следует иметь в виду, что в случае подключения сопротивления нагрузки к шинам системы бесконечной мощности она не будет оказывать влияния на ток к. з. В таких случаях расчет можно вести, не учитывая нагрузки.

Пример 19. Определить ток короткого замыкания на шинах 0,4 кВ подстанции Г с учетом нагрузки трансформаторов T_1 и T_2 по примеру 18.

Принимаем суммарную нагрузку трансформаторов T_1 и T_2 равной 65% их номинальной мощности, или $0,65 \cdot 2 \cdot 1000 = 1300$ кВА.

Сопротивление нагрузки z_n , подключенной к шинам 11 кВ подстанции, по выражению (45) равно:

$$z_n = \frac{U^2}{S_n} = \frac{11000^2}{1300 \cdot 1000} = 93,5 \text{ ом.}$$

Из табл. 3 (пример 18) суммарные сопротивления линий L_4 и L_5 и трансформатора T_3 (T_4) до шин 0,4 кВ равны:

$$x_n = 10,8 \text{ ом}; \quad r_n = 3,2 \text{ ом}; \quad z_n = \sqrt{10,8^2 + 3,2^2} = 11,3 \text{ ом};$$

$$z_3 = \frac{93,5 \cdot 11,3}{93,5 + 11,3} = 10,5 \text{ ом.}$$

Сопротивление z_c до шин 11 кВ подстанции В в нормальном режиме по табл. 3 равно 4,6 ом.

Суммарное сопротивление до места к. з.

$$z_{\Sigma} = 10,5 + 4,6 = 15,1 \text{ ом.}$$

Ток

$$I^{(3)} = \frac{11000}{\sqrt{3 \cdot 15,1}} = 420 \text{ а.}$$

Ток, проходящий по линиям L_4 и L_5 к месту к. з. равен:

$$I_1 = I \frac{z_n}{z_n + z_n} = 420 \cdot \frac{93,5}{93,5 + 11,3} = 374 \text{ а.}$$

Ток, ответвляющийся в нагрузку,

$$I_2 = 420 \cdot \frac{11,3}{93,5 + 11,3} = 46 \text{ а.}$$

Такая небольшая величина тока (около 11% общего тока в месте короткого замыкания), ответвляющегося в нагрузку, объясняется тем, что сопротивление нагрузки очень велико: 93,5 ом по сравнению с сопротивлением линий L_4 , L_5 и трансформаторов T_3 и T_4 : 11,3 ом.

Пример 20. От шин 11 кВ подстанции В (пример 18) питается воздушная линия, выполненная проводом А-25 общей длиной 25 км; $D_{ср} = 1000$ мм. Определить ток короткого замыкания в конце этой линии.

Решение. По приложениям П-2 и П-17 удельные сопротивления линии $r_y = 1,28$ ом/км; $x_y = 0,378$ ом/км. Полное сопротивление линии $z_n = 25 \sqrt{1,28^2 + 0,378^2} = 32,3$ ом.

Величину нагрузки на трансформаторы T_1 и T_2 примем 2000 кВА; тогда

$$z_n = \frac{11000^2}{2000 \cdot 1000} = 60,5 \text{ ом.}$$

Величина

$$z_{\Sigma} = \frac{32,3 \cdot 60,5}{32,3 + 60,5} = 21,2 \text{ ом};$$

z_{Σ} , приведенное к шинам 11 кв подстанции в нормальном режиме равно 4,6 ом.

$$I^{(3)} = \frac{11\,000}{\sqrt{3}(21,2 + 4,6)} = 245 \text{ а.}$$

Ток в месте короткого замыкания

$$I_1 = 245 \cdot \frac{60,5}{32,3 + 60,5} = 160 \text{ а.}$$

Ток в нагрузке

$$I_2 = 245 \cdot \frac{32,3}{32,3 + 60,5} = 85 \text{ а.}$$

Напряжение на шинах 11 кв $U^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 160 \cdot 32,3 = 9 \text{ кв}$. Если нагрузку не учитывать, то ток короткого замыкания, проходящий по трансформаторам T_1 и T_2 подстанции В, будет равен

$$I^{(3)} = \frac{11\,000}{\sqrt{3}(4,6 + 32,3)} = 172 \text{ а}$$

вместо 245 а, определенных с учетом нагрузки.

Разница составляет около 50%. В данном случае увеличение тока, проходящего через трансформаторы, из-за влияния нагрузки может нарушить селективность действия защит линии и трансформаторов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ П-1

Провода медные по ГОСТ 839-59 марки М

Номинальное сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Расчетное сечение, мм ²	Расчетный диаметр, мм	Сопротивление при +20° С не более, Ом/км
4	1×2,24	3,94	2,2	4,65
6	1×2,73	5,85	2,7	3,06
10	1×3,53	9,79	3,5	1,84
16	7×1,68	15,5	5,0	1,20
25	7×2,11	24,5	6,3	0,74
35	7×2,49	34,1	7,5	0,54
50	7×2,97	48,5	8,9	0,39
70	19×2,14	68,3	10,7	0,28
95	19×2,49	92,5	12,5	0,20
120	19×2,80	117	14,0	0,158
150	19×3,15	148	15,8	0,123
185	37×2,49	180	17,4	0,103
240	37×2,84	234	19,9	0,078
300	37×3,15	288	22,1	0,069
400	37×3,66	389	25,6	0,047

ПРИЛОЖЕНИЕ П-2

Провода алюминиевые по ГОСТ 838-59 марки А

Номинальное сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Расчетное сечение, мм ²	Расчетный диаметр, мм	Сопротивление при +20° С не более, Ом/км
16	7×1,70	15,9	5,1	1,98
25	7×2,12	24,7	6,4	1,28
35	7×2,50	34,4	7,5	0,92
50	7×3,00	49,5	9,0	0,64
70	7×3,55	69,3	10,7	0,46
95	7×4,12	93,3	12,4	0,34
120	19×2,80	117	14,0	0,27
150	19×3,15	148	15,8	0,21
185	19×3,50	183	17,5	0,17
240	19×4,00	239	20,0	0,132
300	37×3,20	298	22,4	0,106
400	37×3,69	396	25,8	0,080
500	37×4,15	501	29,1	0,063
600	61×3,55	604	32,0	0,052

ПРИЛОЖЕНИЕ П-3

Провода сталеалюминиевые по ГОСТ 839-59 марки АС

Номинальное сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм		Расчетное сечение, мм ²		Расчетный диаметр провода, мм	Сопротивление при +20° С не более, Ом/км
	алюминиевых	стальных	алюминия	стали		
10	5×1,6	1×1,2	10,1	1,13	4,4	3,12
16	6×1,8	1×1,8	15,3	2,5	5,4	2,06
25	6×2,2	1×2,2	22,8	3,8	6,6	1,38
35	6×2,8	1×2,8	36,9	6,2	8,4	0,85
50	6×3,2	1×3,2	48,3	8,0	9,6	0,65
70	6×3,8	1×3,8	68,0	11,3	11,4	0,46
95	6×4,5	1×4,5	95,4	15,9	13,5	0,33
120	28×2,29	7×2,0	115	22,0	15,2	0,27
150	28×2,59	7×2,2	148	26,6	17,0	0,21
185	28×2,87	7×2,5	181	34,4	19,0	0,17
240	28×3,29	7×2,8	238	43,1	21,6	0,132
300	28×3,66	7×3,2	295	56,3	24,2	0,107
400	28×4,24	19×2,2	395	72,2	28,0	0,080

ПРИЛОЖЕНИЕ П-4

Провода стальные многопроволочные по ГОСТ 5800-51 марок ПС и ПМС

Номинальное сечение, мм	Число и диаметр проволок, мм	Теоретическая площадь сечения, мм ²	Расчетный диаметр, мм
25	5×2,5	24,6	6,8
35	7×2,5	34,4	7,5
50	12×2,3	49,8	9,2
70	19×2,3	78,9	11,5
95	37×1,8	94,0	12,6

ПРИЛОЖЕНИЕ П-5

Провода стальные однопроволочные по ГОСТ 8053-56 марки ПСО

Номинальный диаметр, мм	Число и диаметр проволок, мм	Теоретическая площадь сечения, мм ²	Расчетный диаметр, мм
3	1×3	7,1	3
3,5	1×3,5	9,6	3,5
4	1×4	12,6	4
5	1×5	19,6	5

ПРИЛОЖЕНИЕ П-6

Медные провода по приказу ВСНХ СССР № 597 от 5/IV 1929 г.

Сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Наружный диаметр провода, мм	Сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Наружный диаметр провода, мм
4	1×2,26	2,26	43	7×2,8	8,4
6	1×2,77	2,77	50	7×3,02	9,06
8	1×3,2	3,2	60	7×3,3	10,0
10	1×3,57	3,57	70	19×2,17	10,9
12	1×3,91	3,91	83	19×2,36	11,8
16	7×1,71	5,15	95	19×2,52	12,6
20	7×1,91	5,75	108	19×2,69	13,5
25	7×2,13	6,4	120	19×2,84	14,2
30	7×2,34	6,75	135	19×3,01	15,1
35	7×2,52	7,55	150	19×3,17	15,9

ПРИЛОЖЕНИЕ П-7

Алюминиевые провода по приказу ВСНХ СССР
№ 597 от 5/IV 1929 г.

Марка провода	Сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Наружный диаметр, мм	Марка провода	Сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Наружный диаметр, мм
A-6	10	3×2,06	4,5	A-50	80	7×3,81	11,5
A-8	13	3×2,35	4,85	A-60	100	19×2,59	13,0
A-10	16	7×1,71	5,15	A-70	115	19×2,78	14,0
A-12	20	7×1,91	5,75	A-83	135	19×3,01	15,1
A-16	25	7×2,13	6,4	A-95	150	19×3,17	15,9
A-20	32	7×2,42	7,3	A-108	175	19×3,43	17,2
A-25	40	7×2,7	8,1	A-120	195	19×3,61	18,1
A-30	50	7×3,02	9,06	A-135	220	19×3,83	19,2
A-35	55	7×3,15	9,5	A-150	240	19×4,0	20,0
A-43	70	7×3,57	10,75				

ПРИЛОЖЕНИЕ П-8

Сталеалюминиевые провода по приказу
ВСНХ СССР № 597 от 5/IV 1929 г.

Марка провода	Общее сечение провода, мм ²	Наружный диаметр, мм	Сталь		Алюминий	
			Число и диаметр проволок, мм	Сечение, мм ²	Число и диаметр проволок, мм	Сечение, мм ²
СА-35	73,3	11,3	7×1,4	10,8	26×1,75	62,5
СА-50	105,1	13,5	7×1,65	15,0	26×2,1	90,1
СА-70	143,5	15,8	7×1,95	20,9	26×2,45	122,6
СА-95	193,7	18,3	7×2,25	27,8	26×2,85	165,9
СА-120	244,9	20,6	7×2,25	35,8	26×3,2	209,1
СА-150	309,8	23,1	7×2,85	44,6	26×3,6	264,7
СА-185	382,9	25,7	7×3,2	56,2	26×4,0	326,7
СА-240	491,7	29,1	19×2,15	68,9	26×4,55	422,8

ПРИЛОЖЕНИЕ П-9

Активные сопротивления кабелей по ГОСТ 340-59

Номинальное сечение, мм ²	Активное сопротивление кабеля, ом/км		Номинальное сечение, мм ²	Активное сопротивление кабеля, ом/км	
	медного	алюминиевого		медного	алюминиевого
10	1,84	3,1	95	1,194	0,326
16	1,15	1,94	120	0,153	0,258
25	0,74	1,24	150	0,122	0,206
35	0,54	0,87	185	0,099	0,167
50	0,37	0,62	240	0,0765	0,129
70	0,26	0,443			

Индуктивные сопротивления кабелей
с поясной изоляцией, ом/км, по [Л. 5]

Сечение кабеля, мм ²	Номинальное напряжение, кв		Сечение кабеля, мм ²	Номинальное напряжение, кв	
	6	10		6	10
10	0,11	0,122	95	0,078	0,083
16	0,102	0,113	120	0,076	0,081
25	0,091	0,099	150	0,074	0,079
35	0,087	0,095	185	0,073	0,077
50	0,083	0,09	240	0,071	0,075
70	0,08	0,086			

На рисунках-приложениях П-13 — П-15 и П-20 числа кривых обозначают диаметры проводов, а на П-11, П-12 и П-16 — П-19 — сечения проводов.

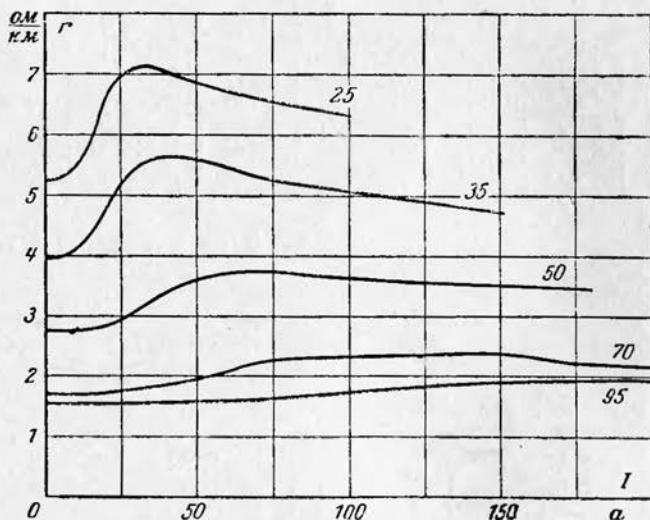


Рис. П-11. Активные сопротивления стальных многопроволочных проводов (ПС) по ГОСТ 5800-51 в зависимости от проходящего по ним тока.

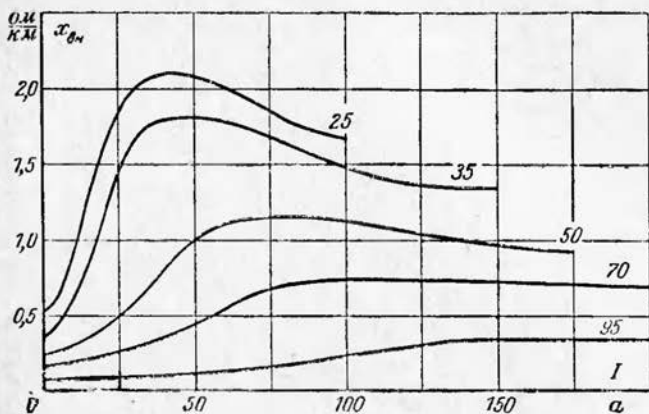


Рис. П-12. Внутренние индуктивные сопротивления стальных многопроволочных проводов (ПС) по ГОСТ 5800-51 в зависимости от проходящего по ним тока.

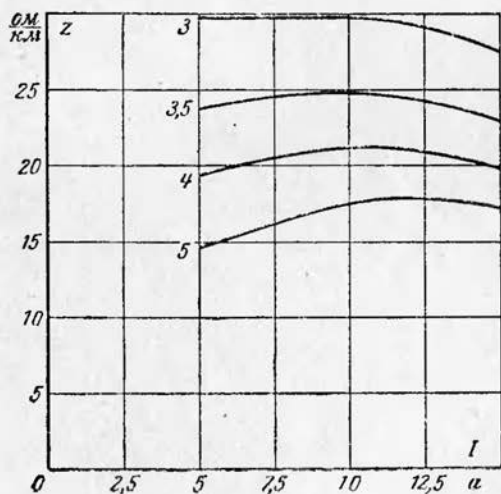


Рис. П-13. Полные сопротивления стальных однопроволочных проводов (ПСО) по ГОСТ 8053-56 в зависимости от проходящего по ним тока.

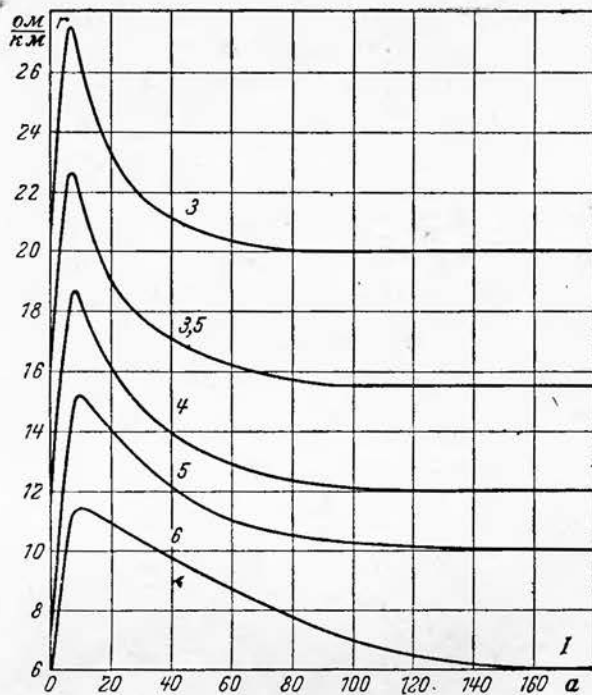


Рис. П-14. Активные сопротивления стальных однопроволочных проводов (Ж) разных диаметров в зависимости от проходящего по ним тока по данным ВИЭСХ 1956 г.

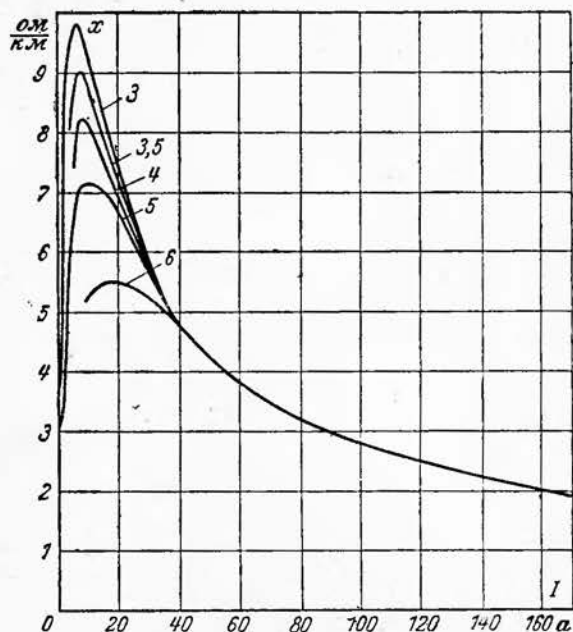


Рис. П-15. Внутренние индуктивные сопротивления стальных однопроволочных проводов (Ж) в зависимости от проходящего по ним тока по данным ВИЭСХ 1956 г.

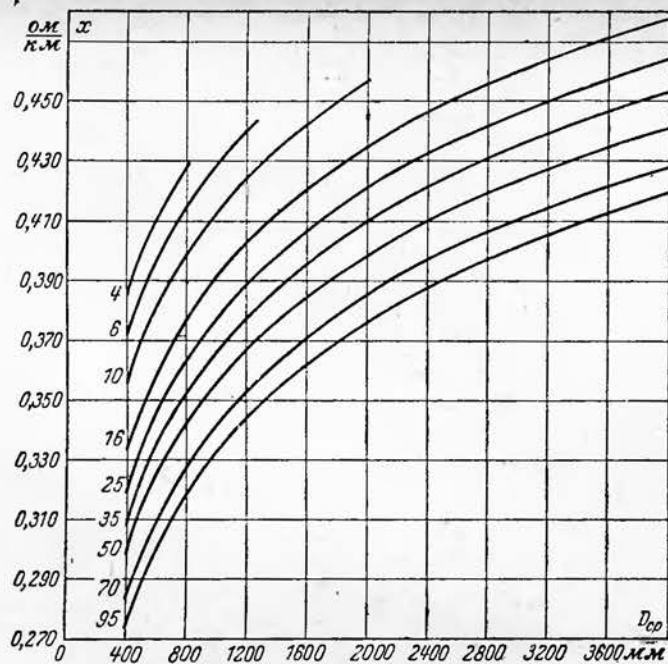


Рис. П-17. Индуктивные сопротивления воздушных линий с алюминиевыми проводами (А) в зависимости от D_{cp} по [Л. 5].

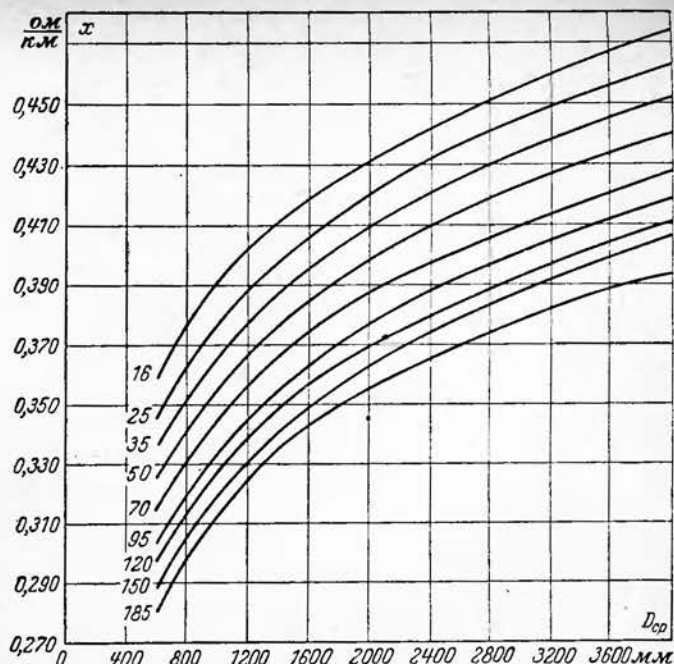


Рис. П-16. Индуктивные сопротивления воздушных линий с медными проводами (М) в зависимости от D_{cp} по [Л. 5].

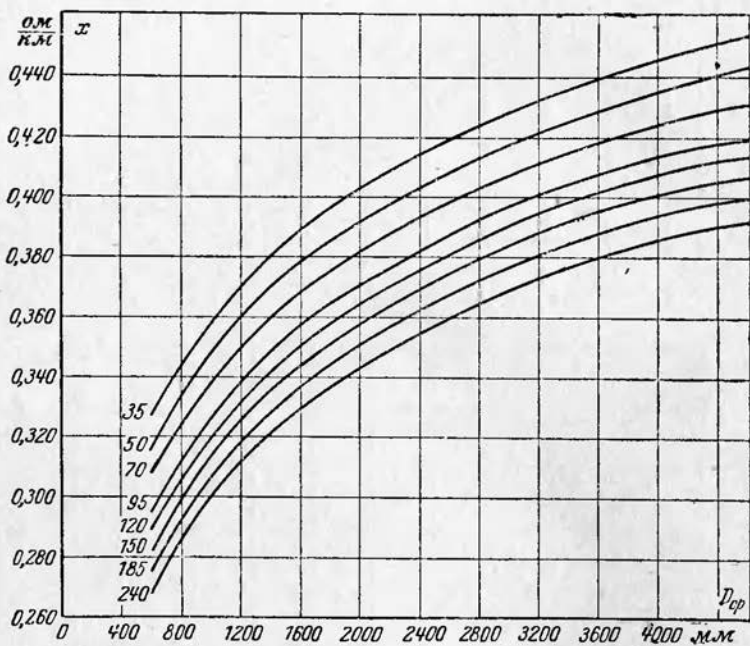


Рис. П-18. Индуктивные сопротивления воздушных линий со стале-алюминиевыми проводниками (АС) в зависимости от D_{cp} по [Л. 5].

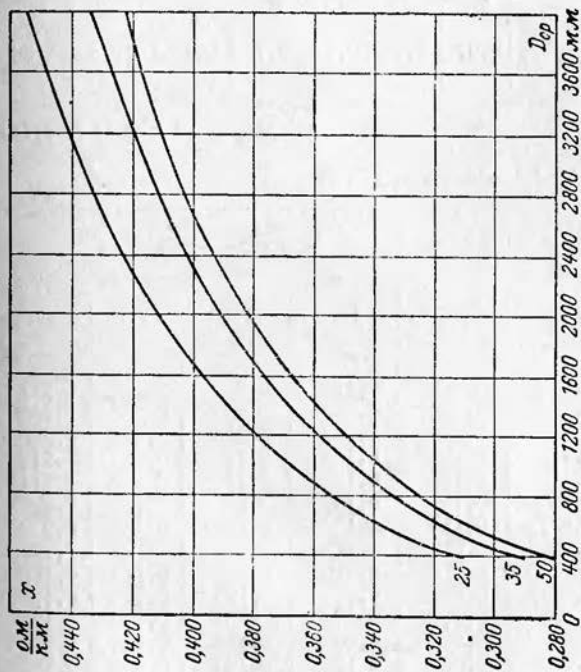


Рис. П-19. Внешние индуктивные сопротивления воздушных линий со стальными многопроволочными проводами (ПС и ПМС) в зависимости от $D_{ср}$ по [Л. 5].

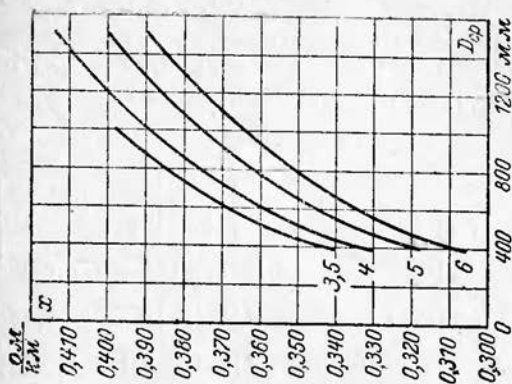


Рис. П-20. Внешние индуктивные сопротивления воздушных линий со стальными однопроволочными проводами (Ж) в зависимости от $D_{ср}$ по [Л. 5].

ПРИЛОЖЕНИЕ П-21

Полное сопротивление трансформаторов по ГОСТ 401-41, соединенных по схеме Y/Y₀, для замыканий между фазой и нулем, $z_T^{(1)}/3$, отнесенное к напряжению 0,4 кВ

а) По [Л. 10]

Мощность трансформатора, <i>кВа</i>	20	30	50	100	180	320	560
Активное сопротивление, <i>ом</i>	0,37	0,26	0,18	0,061	0,039	0,024	0,015
Индуктивное сопротивление, <i>ом</i>	0,91	0,68	0,48	0,17	0,11	0,0715	0,048
Полное сопротивление, <i>ом</i>	0,98	0,715	0,51	0,18	0,116	0,075	0,052

б) По [Л. 6]

Мощность трансформатора, <i>кВа</i>	20	30	50	100	180	320	560
Полное сопротивление, <i>ом</i>	0,97	0,72	0,51	0,17	0,12	0,08	0,05

ПРИЛОЖЕНИЕ П-22

Сопротивление шин

Сечение шины, мм	Активное сопротивление при +65° С, <i>мом/м</i>		Индуктивное сопротивление, <i>мом/м</i> , при $D_{ср}$, мм			
	Медь	Алюминий	100	150	200	300
25×3	0,268	0,475	0,179	0,2	0,225	0,244
30×3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30×4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40×4	0,125	0,222	0,145	0,17	0,189	0,214
40×5	0,1	0,177	0,145	0,17	0,189	0,214
50×5	0,08	0,142	0,137	0,1565	0,18	0,2
50×6	0,067	0,118	0,137	0,1565	0,18	0,2
60×6	0,0558	0,099	0,1195	0,145	0,163	0,189
60×8	0,0418	0,074	0,1195	0,145	0,163	0,189
80×8	0,0313	0,055	0,102	0,126	0,145	0,17
80×10	0,025	0,0445	0,102	0,126	0,145	0,17
100×10	0,02	0,0355	0,09	0,1127	0,133	0,157
2 (60×8)	0,0209	0,037	0,12	0,145	0,163	0,189
2 (80×8)	0,0157	0,0277	—	0,126	0,145	0,17
2 (80×10)	0,0125	0,0222	—	0,126	0,145	0,17
2 (100×10)	0,01	0,0178	—	—	0,133	0,157

ПРИЛОЖЕНИЕ П-23

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока типа ТКФ

Номинальный ток, а	ТКФ-1		ТКФ-3	
	г, мом	х, мом	г, мом	х, мом
7,5	300	480	130	120
10	170	270	75	70
15	75	120	33	30
20	42	67	19	17
30	20	30	8,2	8
40	11	17	4,8	4,2
50	7	11	3,0	2,8
75	3	4,8	1,3	1,2
100	1,7	2,7	0,75	0,7
150	0,75	1,2	0,33	0,3
200	0,42	0,67	0,19	0,17
300	0,2	0,3	0,08	0,08
400	0,11	0,17	0,05	0,04
600	0,05	0,07	0,02	0,02

ПРИЛОЖЕНИЕ П-24

Сопротивления автоматов и рубильников

Номинальный ток, а	Катушки расцепителей автоматов		Контакты, мом	
	г, мом при 65° С	х, мом	Автоматы	Рубильники
50	5,5	2,7	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
1 000	—	—	—	0,08

ПРИЛОЖЕНИЕ П-25

Сопротивления трансформаторов при $\mu_k = 5,5 \%$, приведенные к вторичному напряжению

Номинальная мощность, кВа	Первичное напряжение, кВ	Вторичное напряжение, в			
		230		400	
		г, мом	х, мом	г, мом	х, мом
10	6—10	177,2	230,7	536	697,9
29	6—10	79,3	121,9	240	368,8
50	6—10	28	51	84,8	154,2
100	6—10	12,7	26,2	38,4	79,2
180	6	6,53	14,8	19,8	44,7
180	10	6,69	14,7	20,2	44,5
320	6	3,14	8,53	9,48	25,8
320	10	3,2	8,51	3,69	25,7
560	6—10	1,58	4,95	4,79	15,0

Цена 11 коп.