

Методические рекомендации

Расчеты трехфазных и однофазных коротких замыканий в
сетях 0,4 кВ

программ эвристический алгоритм, моделирующий графическую деятельность разработчика, позволяет получать готовый чертеж со всеми выносками, позиционными номерами, размерными линиями, надписями в требуемом масштабе (1:5). В контуре таблиц и аппаратов приведены номера надписей по «Перечню надписей»; звездочкой обозначены размеры для справок, степень защищенности IP30. Проектировщику остается только дать фамилию и подпись исполнителей в основной надписи.

Изложенная технология автоматизированного проектирования фасадов пультов управления электроприводами разработана в Свердловском отделении ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. Внедренный в эксплуатацию комплекс программ реализован на алгоритмическом языке ФОРТРАН в операционной системе ОС ЕС. Для поддержания информационного обеспечения комплекса использована система управления базой данных SETOP. Комплекс является фрагментом подсистемы Низковольтные комплекты устройства системы автоматизированного проектирования промышленных электроустановок. Проектные разработки, выполненные с применением комплекса программ, показали целесообразность и эффективность его использования, которые еще более возрастут при автоматизированной обработке заданий от проектных организаций на предприятиях-изготовителях НКУ.

Список литературы

1. ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования.
2. ГОСТ 12.2.033-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
3. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
4. Устройства комплектыные низковольтные управления электроустановками. Руководящие материалы по проектированию. ОЛХ.684.002-82.
5. Ауслендер Э. И., Федоров В. Н. Использование алфавитно-цифровых печатающих устройств (АЦПУ) для решения некоторых задач машинной графики при автоматизированном проектировании. — Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок, 1982, № 1, с. 14—16.
6. ОСТ 160.800.485-84. Устройства комплектыные управления на напряжение до 1000 В. Состав и оформление проектной документации, передаваемой предприятию-изготовителю.

Инж. В. Н. Федоров, Свердловское отделение ВНИПИ Тяжпромэлектропроект

УДК 621.3.014.31:537.311.4

✓ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (КЗ) В СЕТЯХ ДО 1000 В

Дана методика расчета переходных сопротивлений при определении результирующего сопротивления до точки КЗ.

Материалом рекомендуем пользоваться при расчете токов короткого замыкания в сетях до 1000 В.

Правильное определение токов КЗ в сетях до 1000 В имеет важное значение, так как от них зависят построение всей цеховой сети.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ определяется по формуле

$$I_k^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (1)$$

где R_Σ и X_Σ — суммарные активные и индуктивные сопротивления до точки КЗ.

В R_Σ для сети до 1000 В входят не только сопротивления всех элементов сети, но и сопротивления контактов коммутационной аппаратуры, токовых обмоток автоматов и реле, обмоток трансформаторов тока, переходных контактов и сопротивления дуги в месте короткого замыкания.

Ввиду неточности определения ряда этих сопротивлений (в [1] рекомендовано вводить в расчет токов КЗ активные переходные сопротивления: 0,015 Ом — для распределительных щитов на электростанциях и подстанциях; 0,02 Ом — для первичных цеховых распределительных пунктов, а также на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями электропередачи от щитов подстанций или главных магистралей; 0,025 Ом — для вторичных цеховых распределительных пунктов и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов; 0,03 Ом — для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов.

Исследования, расчеты и данные [6, 8] показывают, что введение единых, не зависящих от мощности трансформаторов, переходных сопротивлений, указанных выше, в некоторых случаях дает малые значения

токов КЗ. Так, на шинах 0,4 кВ подстанции с трансформатором 1600 кВ·А с $R_{\Gamma} = 0,015$ Ом ток КЗ получается не более $5I_{ном.т.}$. Занижение токов КЗ может привести к ошибкам при выборе элементов систем электроснабжения и защитных аппаратов.

Проанализируем, как изменяются переходные сопротивления R_{Γ} с изменением мощности трансформаторов.

Значение R_{Γ} можно представить в виде двух составляющих

$$R_{\Gamma} = R_{\Gamma 1} + R_{\Gamma 2}, \quad (2)$$

где $R_{\Gamma 1}$ — суммарное сопротивление всех переходных контактов, токовых обмоток автоматов, реле и обмоток трансформаторов тока; $R_{\Gamma 2}$ — сопротивление дуги в месте короткого замыкания;

$$R_{\Gamma 1} = R_{\kappa} + R_{a} + R_{т.т.}, \quad (3)$$

R_{κ} — переходное сопротивление контактного соединения токоведущих шин; R_{a} — сопротивление автоматических выключателей, которое состоит из активного сопротивления катушек расцепителей и переходного сопротивления контактов; $R_{т.т.}$ — сопротивление токовых обмоток трансформаторов тока.

В [2] предлагаются следующие формулы для определения R_{κ} при болтовом соединении шинопроводов:

медь — медь

$$R_{\kappa} = 0,9 \cdot 10^{-4} / (P^{0,9} F^{0,13}), \quad (4)$$

алюминий — алюминий

$$R_{\kappa} = 1,2 \cdot 10^{-4} / (P^{0,9} F^{0,13}), \quad (5)$$

сплав АД31Т1 — сплав АД31Т1

$$R_{\kappa} = 1,4 \cdot 10^{-4} / (P^{0,9} F^{0,13}), \quad (6)$$

где P — нагрузка на шины при соединении, Н; F — площадь нахлестки, мм².

Расчет переходных сопротивлений контактных соединений по (4)–(6) показывает, что его значение при болтовом соединении шин составляет 1% сопротивления автоматического выключателя, который установлен на данном шинопроводе. При современном способе монтажа шинопровода все контактные соединения свариваются аргоновой сваркой и их переходное сопротивление R_{κ} становится еще меньше, поэтому им можно пренебречь.

Сопротивления автоматических выключателей, приведенные в табл. 1, определяются номинальным током автомата и не зависят от его типа [3, 4].

Таблица 1

$I_{ном.}$ А	R_{Γ} мОм	X_{Γ} мОм	$I_{ном.}$ А	R_{Γ} мОм	X_{Γ} мОм
100	2,55	0,86	600	0,37	0,094
140	1,39	0,55	1000	0,22	0,08
200	0,96	0,28	1600	0,13	0,06
400	0,55	0,10	2500	0,12	0,05

Таблица 2

Коэффициент трансформации трансформатора тока	Значения сопротивлений, мОм			
	1-й класс точности		2-й класс точности	
	R	X	R	X
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Сопротивления первичных обмоток катушечных многовитковых трансформаторов тока низкого напряжения согласно [5] приведены в табл. 2. В связи с тем что трансформаторы тока на токи более 500 А выполняются одновитковыми, их сопротивления составляют тысячные доли миллиома и в расчетах токов КЗ ими можно пренебречь.

Большое влияние на ток КЗ оказывает сопротивление дуги в месте короткого замыкания.

Результаты опытных исследований по определению сопротивления дуги в месте короткого замыкания приведены в [3, 6]. Для определения $R_{\Gamma 2}$, мОм, в [6] приводится выражение

$$R_{\Gamma 2} = (U_{д.л.} I_{к.}^2) / I_{к.}^2, \quad (7)$$

где $U_{д.л.}$ — удельное напряжение электрической дуги, В/см; $l_{д.}$ — длина дуги, см; $I_{к.}$ — начальный сверхпереходный ток короткого замыкания, кА.

При токах более 1000 А $U_{д.л.} = 16$ В/см, а длина дуги равна удвоенному расстоянию между фазами сети в месте короткого замыкания. Расстояния между фазами проводников a , наиболее часто применяемых в сетях напряжением до 1000 В, приведены ниже:

Проводник	a , см
ШМА	0,15
ШРА73	0,45
Кабели сечением, мм ² :	
2,5—10	0,16
16—35	0,24
50—95	0,28
120—185	0,4
240	0,48

В [3] предлагается следующая формула для определения $R_{\Gamma 2}$, мОм:

$$R_{\Gamma 2} = 64 / I_{к.}^2, \quad (8)$$

В [6] указано, что падение напряжения на дуге изменяется в небольших пределах 60—90 В.

На основании экспериментальных исследований, описанных в [7], наиболее точным является определение $R_{\Gamma 2}$ по (6), так как это выражение фактически учитывает расстояние между фазами в месте короткого замыкания.

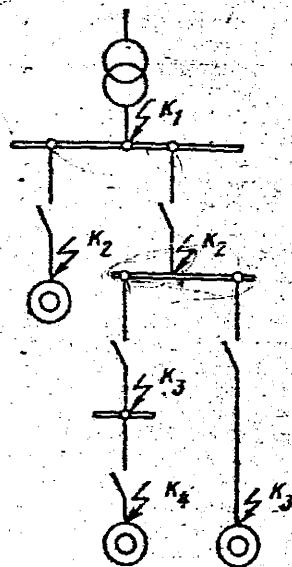
Если расстояние между фазами неизвестно, допускается пользоваться (8).

Расчет переходных сопротивлений производится по выражениям (2), (3), (7) для рекомендуемых в [1] точек схемы электропитания K_1-K_4 (см. рисунок) и трансформаторов различных мощностей. За расчетные принимаются наиболее характерные места коротких замыканий (разделки кабелей, присоединения шиннопроводов); также было принято, что сети за трансформаторами мощностью 400 и 630 кВ·А выполнены кабелями (табл. 3), а за трансформаторами 1000 кВ·А и более — шиннопроводами и кабелями.

Анализируя полученные результаты, видим, что для сетей, выполненных кабелями, переходное сопротивление $R_{п1}$ увеличивается с удалением точки короткого замыкания и уменьшением мощности трансформаторов, так как при этом увеличивается сопротивление автоматических выключателей и трансформаторов тока (табл. 1, 2). Аналогичным образом изменяется и $R_{п2}$ в связи с тем, что при удаленности точки короткого замыкания и уменьшении мощности трансформатора снижается ток K_3 , сопротивление дуги при этом увеличивается (при одинаковом примерно расстоянии между фазами во всех точках, исключенном является точка K_4 , где расстояние между фазами может изменяться в больших пределах).

Изменение сопротивления $R_{п1}$ для трансформаторов мощностью более 1000 кВ·А ничем не отличается от изменения $R_{п1}$ для трансформаторов 400 и 630 кВ·А. Сопротивление $R_{п2}$ в основном определяется расстоянием между фазами сети.

Аппроксимируя результаты, приведенные в табл. 3, получили формулу, определяющую суммарное переходное сопротивление данной точки короткого замыкания $R_{п}$, мОм (исключением является точка K_1 , для которой переходные сопротив-



Расчетная схема сети напряжением до 1000 В

ления комплектных трансформаторных подстанций приведены в табл. 3).

$$R_{п} = (2,5\sqrt{S_T K^2 + 3200\alpha})/S_T \quad (9)$$

где S_T — мощность трансформатора подстанции, кВ·А; K — коэффициент ступени короткого замыкания, $K=2$ — для первичных цеховых распределительных пунктов, а также на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов подстанций или главных магистралей; $K=3$ — для вторичных цеховых распределительных пунктов и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов; $K=4$ — для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников,

Таблица 3

Мощность трансформатора, кВ·А	K_1			K_2			K_3			K_4		
	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п}$	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п}$	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п}$	$R_{п1}$	$R_{п2}$	$R_{п}$
400	0,37	8,84	9,21	$\frac{1,2}{1,74}$	$\frac{1,68}{2,29}$	$\frac{2,88}{4,03}$	$\frac{3,0}{5,05}$	$\frac{1,81}{2,54}$	$\frac{4,81}{7,59}$	$\frac{8,9}{9,81}$	$\frac{2,03}{2,89}$	$\frac{10,93}{12,7}$
630	0,22	7,8	8,02	$\frac{1,05}{1,34}$	$\frac{1,5}{2,03}$	$\frac{2,55}{3,37}$	$\frac{2,51}{4,4}$	$\frac{1,55}{2,28}$	$\frac{4,06}{6,68}$	$\frac{7,2}{11,1}$	$\frac{1,61}{2,43}$	$\frac{8,81}{13,53}$
1000	0,22	8,17	8,41	$\frac{0,55}{0,82}$	$\frac{3,52}{5,1}$	$\frac{4,07}{5,92}$	$\frac{2,28}{3,34}$	$\frac{16,1}{19,03}$	$\frac{18,38}{22,37}$	$\frac{6,32}{6,9}$	$\frac{0,77}{0,89}$	$\frac{7,09}{7,79}$
1630	0,12	5,39	5,51	$\frac{0,49}{0,71}$	$\frac{2,23}{3,1}$	$\frac{2,72}{3,81}$	$\frac{1,71}{2,85}$	$\frac{10,3}{13,1}$	$\frac{12,01}{15,95}$	$\frac{3,8}{4,4}$	$\frac{0,71}{0,87}$	$\frac{4,51}{5,27}$
2500	0,12	5	5,12	$\frac{0,35}{0,61}$	$\frac{1,51}{2,4}$	$\frac{1,86}{3,01}$	$\frac{1,16}{2,31}$	$\frac{5,76}{6,95}$	$\frac{6,92}{9,26}$	$\frac{3,2}{4,1}$	$\frac{0,421}{0,481}$	$\frac{3,62}{4,59}$

Примечание. В числителе — сопротивление при магистральной схеме, в знаменателе — при радиальной.

получающих питание от вторичных распределительных пунктов.

По (9) переходные сопротивления для магистральных схем $R_{маг.} = R_k$, для радиальных $R_{рад}$ примерно равно $1,5R_k$.

Расхождение результатов вычислений, приведенных в табл. 3 и полученных по (9), не превышает $\pm 7\%$.

В [8] для расчета токов КЗ приводятся снижающие коэффициенты, которые определяются отношением реального (экспериментального) тока КЗ к току металлического КЗ. Например, для определения токов КЗ в сетях с трансформаторами мощностью 1600 и 2500 кВ·А предлагается коэффициент $B=0,7$.

Был произведен расчет коэффициента B с учетом (9) для различных точек сети с трансформатором 2500 кВ·А: для точки K_1 $B=0,6$; K_2 — $B=0,9$; K_3 — $B=0,6$; K_4 — $B=0,8$. Таким образом, среднее значение снижающего коэффициента равно 0,725, что говорит о совпадении результатов, полученных по предлагаемой методике, с экспериментальными данными.

Выводы

1. Переходные сопротивления, рекомендуемые в [1] для расчета токов КЗ в сетях до 1000 В, являются завышенными, особенно для трансформаторов выше 1000 кВ·А.

2. На переходные сопротивления большое влияние оказывает сопротивление дуги в месте короткого замыкания.

3. До разработки инструкции по расчету токов КЗ в сетях до 1000 В переходные активные сопротивления при расчете токов КЗ можно определять по (9).

Список литературы

1. Инструкция по проектированию силового и осветительного электрооборудования промышленных предприятий СН 355-77. М.: Стройиздат, 1977. 95 с.

2. Площади касания и уравнение переходного сопротивления контактного соединения токоведущих шин/ Н. Б. Демкин, М. А. Коротков, В. И. Бойченко, Н. Н. Дзекер. — Электричество, 1971, № 8, с. 77—79.

3. Голубев М. Л. Методы расчета токов короткого замыкания в распределительных сетях. М.: Энергия, 1967. 56 с.

4. Голубев М. Л. Расчет токов короткого замыкания в электрических сетях. М.: Энергия, 1980. 88 с.

5. Справочник по проектированию электроснабжения/ Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, Н. Л. Самовера. М.: Энергия, 1980. 456 с.

6. Хайн М., Глазунов А. А. О вероятностных и статистических характеристиках токов коротких замыканий в системах электроснабжения. — Электричество, 1980, № 1, с. 5—11.

7. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Высшая школа, 1967. 194 с.

8. Брон О. Б., Шестиперов Ю. И., Элькин Э. С. Исследование режима дугового короткого замыкания в сетях до 1000 В.— Исследования и разработки в области технологии электроснабжения производства и промышленной электроэнергетики. Труды ВНИИпроектэлектромонтажа, 1981, № 7, с. 81—86.

Канд. техн. наук Г. Я. Вагин, инж. В. А. Чечков, Горьковский политехнический институт.

УДК 621.3.018

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Приводятся рекомендации, позволяющие при проектировании решать вопросы электромагнитной совместимости элементов электропривода.

Экспериментальный анализ источников, путей распространения и рецепторов электромагнитных помех, уровней напряженности электрического и магнитного полей в пространстве расположения элементов и устройств электропривода, а также опыт по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) вентиляльных электроприводов ряда прокатных станов на стадии их наладки и промышленной эксплуатации позволяет сформулировать рекомендации по обеспечению ЭМС элементов вентиляльного электропривода на различных стадиях их проектирования.

1. При выборе элементов управления электроприводом необходимо ориентироваться на применение элементов, имеющих низкое выходное сопротивление и более высокие токи управления.

2. При реализации регуляторов систем электропривода на основе интегральных операционных усилителей целесообразно сопротивление резисторов на входе и в цепях обратных связей выбирать минимально возможными (в пределах 10—200 кОм), а емкости конденсаторов в тех же цепях — максимальными (в пределах 0,01—4 мкФ).

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ РАСЧЕТЫ ТРЕХФАЗНЫХ И ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СЕТЯХ 0,4 кВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

КРОТКИМ замыканием (КЗ) является всякое непредусмотренное нормальными условиями работы замыкание разных фаз между собой или с землей (нулевым проводом).

Обычно в месте КЗ образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивления других элементов пути тока КЗ от одной фазы к другой или от фазы на землю.

Точный учет переходного сопротивления практически невозможен прежде всего из-за трудности оценки сопротивления дуги, которое являясь функцией тока и длины дуги, изменяется в широком диапазоне. В других случаях переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие КЗ называют "металлическими".

В дальнейшем мы будем рассматривать лишь металлические КЗ потому, что тогда создаются худшие условия и возникают возможные наибольшие токи КЗ.

Различают следующие основные виды коротких замыканий:

- 1) трехфазное, когда три фазы соединяются между собой;
- 2) двухфазное, когда две фазы соединяются между собой;
- 3) однофазное, когда одна фаза соединяется с нейтралью источника через землю.

Однофазное КЗ возможно только в системах с глухозаземленной нейтралью. Соединение одного проводника с землей в системах с незаземленной нейтралью называется просто замыканием на землю. Двухфазное КЗ на землю в системах с незаземленной нейтралью дает тот же эффект, что и двухфазное КЗ.

Величина тока КЗ зависит от:

- 1) мощности (электрического сопротивления) источников, питающих место КЗ;
- 2) удаленности источников от места КЗ, т.е.

от величины сопротивлений элементов электрической цепи, включенных между источниками и точкой КЗ;

- 3) вида КЗ (трехфазное, однофазное и др.)
- 4) времени и момента возникновения КЗ.

2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В УСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Расчет токов КЗ в установках напряжением до 1000 В обычно производится для выбора аппаратуры и токоведущих частей. С этой целью необходимо вычислять наибольшие вероятные значения токов КЗ.

Характерная особенность сетей до 1000 В (0,4/0,23 кВ), применяемых для электроснабжения жилых и общественных зданий, заключается в том, что они питаются от понижающих трансформаторов мощностью обычно не выше 630 кВ·А и лишь в редких случаях 1000 кВ·А.

Во избежание получения грубых преувеличений необходимо при расчете тока КЗ возможно полнее учитывать не только все индуктивные и активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи (обмоток силовых трансформаторов, трансформаторов тока, выключающей аппаратуры, воздушных и кабельных линий и т.п.), но и активные сопротивления всех переходных контактов этой цепи (болтовые на шинах, зажимы на вводах и выводах аппаратов, разъемные контакты аппаратов и контакт в месте КЗ).

Величина и форма кривой тока КЗ изменяется по сложным законам, точный учет которых затрудняет расчеты.

Для установок напряжением до 1000 В можно сделать существенные допущения, благодаря чему расчет токов КЗ значительно упрощается:

- 1) сопротивления самого трансформатора и присоединенной к его вторичной обмотке цепи получаются относительно большими, а сопротивление энергосистемы незначительно, его можно не учитывать;

2) мощность системы не ограничена, а напряжение на зажимах трансформатора на стороне высшего напряжения равно постоянной величине.

Данное допущение справедливо, если мощность системы примерно в 50 раз больше мощности понижающего трансформатора (ТП) ($S_C \gg 50 S_T$)

На рис. 1 приведена кривая изменения тока короткого замыкания i_K в цепи. Там же показано, что этот ток можно разложить на две составляющие: вынужденный синусоидальный ток, имеющий установившееся значение, и свободный аperiodический ток, затухающий по экспоненциальному закону. Из теоретической электротехники известно, что такое же изменение тока и его слагающих имеет место в цепи, содержащей L, Z , при включении ее на синусоидальное напряжение.

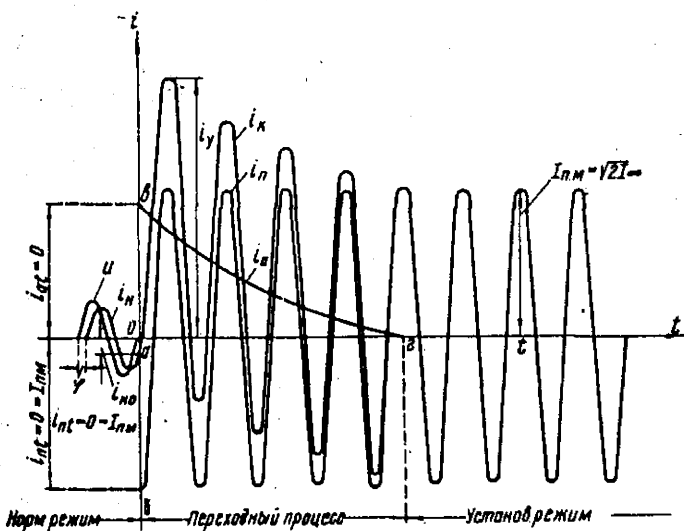


Рис. 1. Кривая изменения тока короткого замыкания в цепи, питающейся от системы неограниченной мощности

В практических расчетах токов КЗ принято вынужденную периодическую слагающую, которая в данном случае является установившимся током, называть периодической составляющей тока КЗ (или короче, периодическим током). Для нее обычно принимают следующие обозначения: мгновенное значение i_n , амплитудное значение I_{nM} , действующее значение I_n .

Действующее значение установившегося тока КЗ в общем случае принято обозначать I_{∞} , поэтому в рассматриваемом нами частном случае КЗ $I_{\infty} = I_n$.

Свободную аperiodическую составляющую

(слагающую) тока КЗ принято называть сокращенно аperiodической слагающей тока КЗ (или даже аperiodическим током). Для нее приняты обозначения: мгновенное значение i_a , начальное значение $i_{at=0}$, наибольшее значение I_{aM} .

Время затухания аperiodического тока определяется соотношением величин активного и индуктивного сопротивлений короткозамкнутой цепи. Чем больше активное сопротивление, тем быстрее уменьшается величина аperiodической составляющей.

Величина периодической составляющей тока трехфазного КЗ определяется напряжением на шинах системы и сопротивлением цепи КЗ. Так как указанное напряжение остается неизменным в течение всего процесса КЗ, то неизменным остается и действующее значение периодической составляющей. Величина действующего значения при трехфазном КЗ определяется по закону Ома по формуле

$$I^{(3)} = \frac{U \cdot 1000}{\sqrt{3} Z} \quad (1)$$

где $I^{(3)}$ - действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ, А;

U - межфазное напряжение, В;

Z - суммарное сопротивление цепи короткого замыкания, мОм (миллиом).

В цепях напряжением выше 1000 В с относительно малым активным сопротивлением среднее значение постоянной времени затухания аperiodической слагающей T_a составляет примерно 0,05 сек, поэтому длительность затухания аperiodической составляющей обычно не превышает 0,2 сек.

В цепях с большим активным сопротивлением аperiodическая составляющая затухает быстрее.

Рассматривая кривую тока КЗ (рис. 1), видим, что через полпериода ($t = 0,01$ сек) мгновенное значение тока КЗ достигает максимального значения, которое называют ударным током КЗ и обозначают i_y .

Ударный ток КЗ определяется по формуле

$$i_y = I_{nM} + I_{aM} \quad e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{nM} + I_{nM} + e^{-\frac{0,01}{T_a}} = \\ = (1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}) \sqrt{2} I_n^{(3)} = K_y \sqrt{2} I^{(3)}$$

где $I_n^{(3)} = I^{(3)}$ - действующее значение тока КЗ;

K_y - ударный коэффициент тока КЗ, учитывающий участие аperiodической составляющей в

образования ударного тока. Ударный коэффициент тока КЗ K_y определяется по кривой (рис. 2) в зависимости от отношения $\frac{x}{z}$.

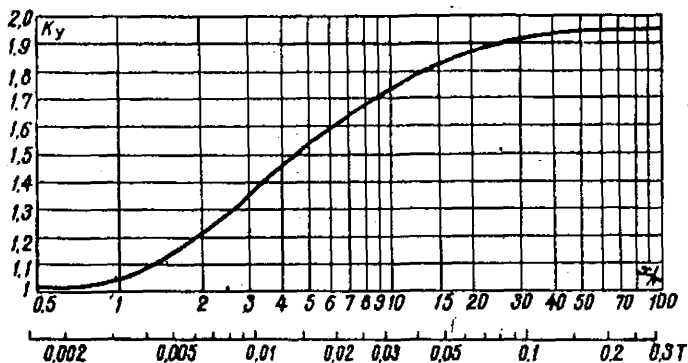


Рис. 2. Кривая изменения ударного коэффициента K_y в зависимости от постоянной времени T

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y за первый период ($t = 0,02$ сек) определяется по следующим формулам:

$$I_y = \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2} I^{(3)}, \text{ при } K_y > 1,3; \quad (3)$$

$$I_y = \sqrt{1 + \frac{T_a}{0,02}} I^{(3)} = \sqrt{1 + 50 T_a} I^{(3)}, \text{ при } K_y < 1,3. \quad (4)$$

Асинхронные электродвигатели следует учитывать только в том случае, если они расположены в непосредственной близости от места КЗ и имеют большую мощность. Влияние асинхронных двигателей на величину ударного тока КЗ учитывается путем прибавления к величине I_y , определенной по формуле (2), величины

$$I_m = 6,5 I_N, \quad (I_m = \sqrt{2} \cdot \frac{0,9}{0,2} I_N = 6,5 I_N), \quad (5)$$

где I_N — номинальный ток электродвигателей, участвующих в питании точки КЗ.

Для момента времени $t > 0,01$ сек током I_m можно пренебречь.

3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

Расчет токов КЗ ведется в следующей последовательности:

а) составляется полная схема рассматриваемого участка сети с указанием длин линий, материала и сечения проводов, данных трансформаторов и т.п.;

б) для каждого элемента — трансформатор, линия, аппаратура и т.п. — определяются его активное и индуктивное сопротивления;

в) намечаются точки КЗ и расчетные режимы, исходя из требований защиты;

г) определяются суммарное активное и реактивное сопротивления участка сети от трансформатора до места КЗ;

д) определяется ток в месте КЗ.

Практика показывает, что при расчете токов КЗ в установках до 1000 В удобнее пользоваться именованными единицами, выражая сопротивления всех элементов цепи в омах (Ом) или миллиомах (мОм), напряжение — в киловольтах (кВ) или вольтах (В), ток — в амперах (А) или килоамперах (кА); мощность — в киловольтамперах (кВ·А), киловаттах (кВт), ваттах (Вт).

При отсутствии достоверных данных о полном числе всех контактов и о их переходных сопротивлениях, включая контакт в месте КЗ, рекомендуется в соответствии с [2 и 3] при подсчете токов КЗ учитывать сопротивления всех контактов совокупно, путем введения в расчет активного сопротивления:

а) для распределительных щитов на подстанциях — 15 мОм;

б) для первичных цеховых, вводно-распределительных устройств, распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от пунктов подстанции или от главных магистралей — 20 мОм;

в) для вторичных цеховых распределительных пунктов, как и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов, щитков, — 25 мОм;

г) для аппаратуры, установленной непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов, — 30 мОм.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ

1. Полное сопротивление трансформаторов определяется по формуле

$$Z_T = \frac{10 u_k U_N^2}{S_T}, \quad (6)$$

где Z_T — полное сопротивление трансформатора, Ом;

U_N — номинальное линейное напряжение трансформатора, кВ;

S_T — номинальная мощность, кВ·А;

u_k — напряжение короткого замыкания, %.

2. Активное сопротивление трансформатора определяется по формуле:

$$\zeta_T = \frac{\Delta P U_N^2}{S_T^2}, \quad (7)$$

где ζ_T — активное сопротивление трансформатора, Ом;

ΔP — потери в обмотке трансформатора, Вт;

U_N — номинальное линейное напряжение

трансформатора, кВ;

S_T — номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

3. Зная полное Z_T и активное \mathcal{C}_T сопротивление трансформатора, можно определить его индуктивное сопротивление \mathcal{X}_T по выражению

$$\mathcal{X}_T = \sqrt{Z_T^2 - \mathcal{C}_T^2} \quad (8)$$

Результаты расчетов определения сопротивления трансформаторов приведены в приложении 1, табл. 1.

4. Определение сопротивлений кабелей, проводов:

а) активное сопротивление жилы кабеля участка цепи определяется по выражению

$$\mathcal{C}_K = \mathcal{C}_y l \quad (9)$$

где \mathcal{C}_y — удельное сопротивление, мОм (приложение 1, табл. 2);

l — длина участка цепи, м;

б) индуктивное сопротивление участка цепи кабеля определяется по формуле

$$\mathcal{X}_K = \mathcal{X}_y l \quad (10)$$

где \mathcal{X}_y — удельное сопротивление, мОм (приложение 1, табл. 2);

l — длина участка цепи, м.

В приложении 1, табл. 3, 4, 5 приведены сопротивления шин, автоматов, рубильников, трансформаторов тока низкого напряжения.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УЧАСТКА СЕТИ

Полным сопротивлением Z какого-либо участка сети является геометрическая сумма активного \mathcal{C} и индуктивного \mathcal{X} сопротивлений (рис. 3), как

$$Z = \sqrt{\mathcal{C}^2 + \mathcal{X}^2} \quad (11)$$

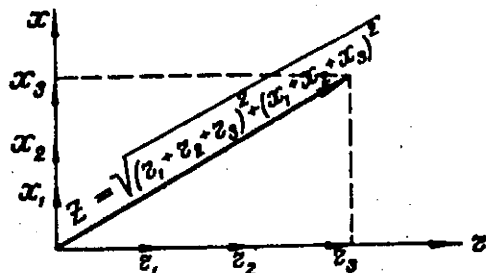


Рис. 3. Определение полного сопротивления

Поэтому при определении полного сопротивления цепи до места КЗ необходимо отдельно определить суммарное активное сопротив-

ление \mathcal{C}_X , отдельно суммарное индуктивное сопротивление \mathcal{X}_X , затем найти их геометрическую сумму как

$$Z = \sqrt{\mathcal{C}_X^2 + \mathcal{X}_X^2} \quad (12)$$

где

$$\mathcal{C}_X = \mathcal{C}_1 + \mathcal{C}_2 + \dots + \mathcal{C}_n \quad (12a)$$

$$\mathcal{X}_X = \mathcal{X}_1 + \mathcal{X}_2 + \dots + \mathcal{X}_n \quad (12б)$$

6. ВЫБОР АППАРАТУРЫ И ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Все аппараты и токоведущие части на трансформаторных подстанциях, распределительных щитах, пунктах и т.п. должны быть выбраны по условиям длительной их работы при нормальном режиме. Нормальные условия работы аппаратов и токоведущих частей характеризуются номинальным напряжением и током. Выбор аппарата заключается в сравнении наибольшего длительного рабочего тока той цепи, где предполагается установить данный аппарат с номинальным его током.

Должны быть проверены в режиме короткого замыкания выбранные по номинальным условиям работы аппараты и токоведущие части:

а) шины и изоляторы распределительных устройств, а также аппаратура защиты и управления в линиях питания электроприемников 1-й категории (по надежности электроснабжения) в электроустановках на объектах, на которые распространяется ВСН18-74 (пп. 1.1. 3.71);

б) во всех остальных электроустановках в соответствии с ПУЭ, п. 1-4-2 — распределительные щиты, токопроводы, силовые шкафы и т.п. с установленной в них аппаратурой.

Для определения динамической и термической устойчивости аппаратов, проводников в качестве расчетного вида КЗ следует принимать

трехфазное КЗ. Расчетный ток трехфазного КЗ следует рассчитывать, исходя из условий повреждения в такой точке рассматриваемой цепи при КЗ, в которой аппараты и проводники этой цепи находятся в наиболее тяжелых условиях (обычно в начале защищаемого участка). При этом аппаратура защиты должна обеспечивать автоматическое отключение аварийного участка цепи при однофазном КЗ в конце защищаемой линии.

Защитная аппаратура и проводники будут считаться выбранными правильно, если они выдерживают воздействие максимально возможных токов КЗ и автоматически отключается аварийный участок цепи при однофазном КЗ. Токи КЗ вызывают значительные механические

силы в токоведущих частях электрических аппаратов, шинах, изоляторах. Последствием этих механических сил могут быть разрушения аппаратов, шин и конструкций распределительных устройств. Поэтому для проверки устойчивости аппаратуры токоведущих конструкций важно знать величину этих механических сил.

Выбор шин

Для определения устойчивости токоведущих частей, в частности шин, необходимо пользоваться наибольшей величиной механической силы, которая вызывается ударным током. При этом наибольшее усилие действует на среднюю шину (рис. 4). Для однополосных шин максимальная сила определяется по формуле

$$F_{max} = 1,76 i_y^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot 10^{-2} \text{ кгс}, \quad (13)$$

где i_y - ударный ток, кА;
 l - расстояние между осями опорных изоляторов, см;

a - расстояние между осями шин, см.

Рассматривая шину как многопролетную балку, определяем наибольший изгибающий момент при числе пролетов три и более по формуле

$$M_{max} = \frac{F_{max} l}{10} \text{ кгс·см} \quad (14)$$

При одном или двух пролетах определяем наибольший изгибающий момент по формуле

$$M_{max} = \frac{F_{max} l}{8} \text{ кгс·см} \quad (15)$$

Момент сопротивления в зависимости от расположения шин (плашмя, на ребро) определяется по следующим формулам:

для рис. 5, а

$$W = \frac{b h^2}{6} \text{ см}^3 \quad (16)$$

для рис. 5, б

$$W = \frac{b^2 h}{6} \text{ см}^3 \quad (17)$$

для круглых шин

$$W = 0,1 d^3 \text{ см}^3 \quad (18)$$

Определяем напряжение в материале по формуле

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} \text{ кгс/см}^2 \quad (19)$$

При этом должно соблюдаться условие:

$$\sigma_{доп} \geq \sigma \quad (20)$$

где $\sigma_{доп}$ - допустимое напряжение в материале.

В среднем можно принять $\sigma_{доп}$:
 а) для меди - 1400 кгс/см² при $t = 300^\circ\text{C}$,

б) для алюминия - 700 кгс/см² при $t = 200^\circ\text{C}$,

в) для стали - 1800 кгс/см² при $t = 400^\circ\text{C}$.

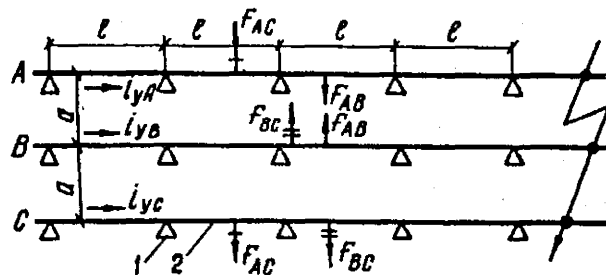


Рис. 4. Схема механических усилий:
 1 - опорный изолятор; 2 - шина

На основании расчетов токов КЗ определяем динамическую и термическую устойчивость шин, выбранных в конкретном проекте.

В приложении 1, табл. 6, 7 приведены данные динамической и термической устойчивости алюминиевых шин.

По данным заводов-изготовителей динамическая устойчивость шин составляет: из панелей ШД59, ПРСП, ШО70-50 кА; ШО59, ПРС1 - 30 кА.

Для большинства практических расчетов проверку на термическую устойчивость можно делать по формуле

$$S_{мин} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_n} \text{ мм}^2, \quad (21)$$

где $S_{мин}$ - сечение проводника, мм²;
 I_{∞} - установившийся ток КЗ, равный действующему значению, кА;
 C - термический коэффициент, определяется в зависимости от материала (приложение 1, табл. 8);
 t_n - приведенное (фиктивное) время, сек, практически может быть принято равным времени срабатывания защиты.

Выбор изоляторов

Все изоляторы выбираются по напряжению, роду установки и допускаемой механической нагрузке. Проходные изоляторы дополнительно выбирают по номинальному току.

Выбор по напряжению:

$$U_{из.ном} \geq U_{уст.ном} \quad (22)$$

где $U_{из.ном}$ - номинальное напряжение изолятора, В;

$U_{уст.ном}$ - номинальное напряжение установки, численно равное номинальному напряжению сети, питающейся от этой установки, В.

При выборе изоляторов по допускаемой механической нагрузке должно быть соблюдено условие:

$$f_{расч} \leq 0,6 f_{разр} \quad (23)$$

где $f_{расч}$ - наибольшая расчетная нагрузка на изолятор при трехфазном ударном токе КЗ, кгс;

$f_{разр}$ - разрушающая нагрузка по каталогу, кгс;

0,6 - коэффициент запаса прочности.

Разрушающие усилия изоляторов составляют:

типа А 632 - 150 кгс;

типа СА-3/6, армированный - 250 кгс;

типа троллейбусный № 2820 - 250 кгс;

типа ОМА-8 - 375 кгс.

Проверка аппаратов на устойчивость при токах КЗ

Устойчивость аппаратов при КЗ указывается в каталогах и информациях заводов-изготовителей. Поэтому проверка допустимости применения аппарата по условиям КЗ сводится к сопоставлению возможных значений токов КЗ в месте установки аппарата с допустимыми значениями по каталожным данным.

Данные, приводимые в информациях заводов, указывают либо периодическую составляющую установившегося тока КЗ, либо ударный ток КЗ, либо наибольшее действующее значение полного тока КЗ.

Аппаратура считается устойчивой, если удовлетворены следующие условия:

$$а) I_{гар}^{(3)} > I^{(3)} \quad (24)$$

где $I_{гар}^{(3)}$, $I^{(3)}$ - значения периодической составляющей, соответственно гарантированное по данным завода-изготовителя и расчетное в месте установки аппарата;

$$б) i_{гар} > i_y \quad (25)$$

где $i_{гар}$, i_y - значения ударного тока КЗ, соответственно гарантированное по данным завода-изготовителя и расчетное в месте установки аппарата;

$$в) I_{у.гар} > I_y \quad (26)$$

где $I_{у.гар}$, I_y - значения наибольшего действующего полного тока, соответственно гарантированное по данным завода-изготовителя и расчетное в месте установки аппарата.

В приложении 1, табл. 9 - 18 приведены

основные технические данные и коммутационная способность автоматов типа А3100, АВМ, АП50; предохранителей ПН2, ПП17.

В приложении 2, рис. 1 - 11 даны времятоковые характеристики предохранителей типа ПН2, НПН2, ПП17, автоматов типа А3100, АВМ4, АВМ10, АВМ15, АВМ20.

7. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью в соответствии с [1, 2, 3, 9] должно быть надежное отключение защитным аппаратом однофазного короткого замыкания (ОКЗ). Это диктуется требованиями техники безопасности.

Расчетными точками для определения ОКЗ являются наиболее удаленные точки сети (конец линии), так как именно этим точкам соответствует наименьшее значение тока ОКЗ.

Ток ОКЗ в цепи фаза-нуль определяется по формуле:

$$I^{(1)} = \frac{U_{\phi} \cdot 1000}{Z_{\Pi} + \frac{Z_{Тр}}{3}} \quad (27)$$

где $I^{(1)}$ - расчетный ток ОКЗ линии, А;

U_{ϕ} - фазное напряжение сети, В;

Z_{Π} - полное сопротивление петли фазного и нулевого провода с учетом сопротивления контактов, мОм;

$Z_{Тр}$ - полное сопротивление трансформатора в режиме однофазного короткого замыкания, мОм (приложение 1, табл. 19).

Полное сопротивление петли определяется по формуле

$$Z_{\Pi} = \sqrt{(Z_{\Pi} + Z_{Кс})^2 + X_{\Pi}^2} \quad (28)$$

где Z_{Π} - активное сопротивление фазного и нулевого проводников, мОм;

$Z_{Кс}$ - активное сопротивление контактов цепи КЗ; как указывалось ранее, при отсутствии данных принимается совокупно;

X_{Π} - индуктивное сопротивление проводников петли фаза-нуль, мОм, определяется по формуле

$$X_{\Pi} = X'_{\Pi} + X''_{\phi} + X''_{\Pi} \quad (29)$$

где X'_{Π} - внешнее индуктивное сопротивление петли фазного и нулевого провода; принимаем равным 0,8 мОм/м. Исключение - см. примечания;

X''_{ϕ} , X''_{Π} - внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводников.

Примечания: 1. Для проводников из цветного металла внутреннее индуктивное сопротивление не учитывается.

2. Внешнее индуктивное сопротивление не учитывается при использовании в качестве ну-

ловых и заземляющих проводников четвертых жил кабелей, алюминиевых оболочек кабелей и стальных труб электропроводок.

3. Данные о сопротивлении стальных проводников (полос и труб) приведены в [12,13].

Для упрощения расчета по определению вероятных значений ОКЗ с достаточной точностью предлагается следующая формула:

$$I^{(1)} = \frac{U_{\phi} \cdot 1000}{\sum_{\nu} Z_{\text{лн}} \ell + Z_{\text{ТР}}} \quad (30)$$

где $I^{(1)}$ – расчетный ток ОКЗ линии, состоящей из n участков, имеющих разные сечения и материал проводников, А;

U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В;

$Z_{\text{лн}}$ – удельное сопротивление, мОм/м (приложение 1, табл. 20 – 24);

ℓ – длина каждого участка проверяемой линии, км (м);

$Z_{\text{ТР}}$ – расчетное сопротивление одной фазы трансформатора, мОм.

В приложении 1, табл. 25 приведены формулы для определения условий срабатывания защитного аппарата при ОКЗ (отключения аварийной линии).

8. ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО И ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В качестве примера выбрана схема первичных соединений напряжением 0,4 кВ "Дома политпросвещения". Электроснабжение здания осуществляется от трехсекционного главного распределительного щита (ГРЩ). Каждая секция получает питание от своего трансформатора ТМ-630/10, а распределительный щит (РЩ) гостиницы и общежития – от соответствующих панелей ГРЩ. На шинах ГРЩ между 1-й и 2-й секциями предусмотрено устройство АВР.

Для проверки панелей ГРЩ, РЩ, их ошинок и установленной аппаратуры, а также линий сети (электрооборудование) составляется расчетная схема (рис. 6), намечаются точки КЗ, в которых аппаратура и проводники находились бы в наиболее тяжелых условиях и при этом аппараты защиты обеспечивали автоматическое отключение аварийного участка при ОКЗ.

Такими характерными точками при трехфазном КЗ являются K_1, K_2, K_4, K_5, K_7 , а при ОКЗ – K_1, K_3, K_6, K_8 .

Результаты расчета сводятся в табл. 1 и 2.

Токи трехфазного короткого замыкания

Определяя трехфазный ток КЗ в характерных точках, проверяем электрооборудование по условиям работы в режиме КЗ:

– в точке K_1 (на шинах) – устойчивость

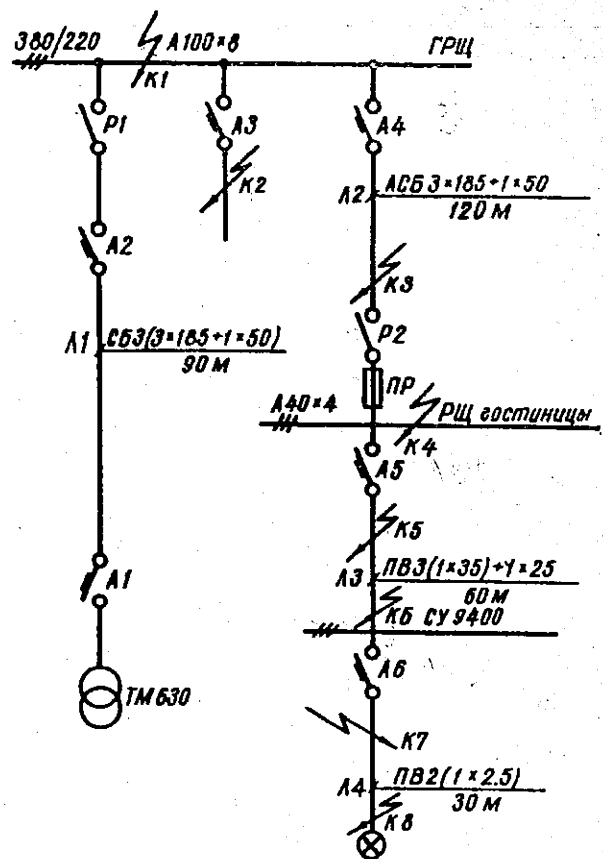


Рис. 6. Схема сети:

А1 – автомат установлен в ТП, АВМ15С, № 445071; $I_N=1200\text{А}$, $I_{\text{у}}=1500\text{А}$, $I_M=8000\text{А}$, уставка выдержки времени 0,4–0,8 сек; А-2 автомат АВМ15С, № 444072, $I_N=1200\text{А}$, $I_{\text{у}}=1500\text{А}$, $I_M=8000\text{А}$, уставка выдержки времени 0,25–0,4 сек; Р1 – рубильник на 2000А; Р2 – рубильник на 250А; А3 – автомат А3124; А4 – автомат А3144; $I_N=300\text{А}$; А-5 – автомат А3124; $I_N=100\text{А}$; А6 – автомат А3161; $I_N=15\text{А}$; Пр – предохранитель ПН2-250, $I_N=250\text{А}$

распределительного щита (ГРЩ), вводных автоматов, сборных шин;

- в точке K_2 (за автоматами) – устойчивость аппаратуры на линейных панелях ГРЩ;
- в точке K_4 (на шинах) – устойчивость распределительного щита (РЩ), сборных шин;
- в точке K_5 (за автоматами) – устойчивость аппаратуры на линейных панелях РЩ;
- в точке K_7 (за автоматами) – устойчивость аппаратуры на распределительном групповом щите.

Определение токов КЗ в точке K_1 :

а) по формулам (8) – (12), (12а), (12б) находим сопротивление электрической цепи до места КЗ, т.е. до точки K_1

$$Z_{\Sigma K_1} = Z_{\text{Т}} + Z_{\text{КЛ}_1} + Z_{\text{собр}_1} = Z_{\text{Т}} + Z_{\text{у}} \ell + Z_{\text{собр}_1} = 3,2 + \frac{0,099 \cdot 90}{3} + 20 = 26,17 \text{ мОм.}$$

Т а б л и ц а I

Результаты расчета токов трехфазного короткого замыкания

Место короткого замыкания	Аппараты защиты	Сопротивления элементов цепи до места КЗ, мОм											Время срабатывания защиты, сек	Примечание		
		Трансформаторы		Проводники		Автоматы		Контакты	Z_x	X_x	Z	$I^{(3)}$			I_y	I_y
		Z_T	X_T	$Z_{к:}$ $Z_{ш}$	$X_{к:}$ $X_{ш}$	Z_A	X_A									
K ₁	A1 A2	3,2	13,4	2,97	1,79	-	-	20	26,17	15,19	30,2	7700	11450	-	0,4÷0,6 0,25÷0,4	
K ₂ C-1	A3 A2	3,2	13,4	2,97	1,79	6,8	2,7	20	32,97	17,89	38,0	6350	8950	-	0,01-0,020 1,2-2,8	
K ₄	A4 Пр A2	3,2	13,4	2,97 2,97	8,95	-	-	25	51,17	22,35	55,7	4150	5850	-	0,025-0,035 0,025-0,07 2,8-4,8	
K ₅	A5 Пр A4 A2	3,2	13,4	51,17	22,35	2,05	0,85	25	53,22	23,2	58,4	3920	5520	-	0,010÷0,020 0,030÷0,08 0,025÷0,035 3,0÷4,8	
K ₇	A6 A5 Пр A4 A2	3,2	13,4	57,37	26,17	6,8	2,7	30	94,7	28,87	99,0	2330	3270	-	0,015÷0,030 0,010÷0,020 0,20÷0,60 0,025÷0,035 5÷9	

Таблица 2

Результаты расчета токов ОКЗ

Место короткого замыкания	Сопротивления элементов, МОм			Защитный аппарат			Расчетный ток ОКЗ $I^{(1)}$, А	Результат проверки по формуле $I \leq I^{(1)}$	Время срабатывания защитного аппарата, сек
	$\frac{Z_{ГР}}{3}$	$Z_{П}$	$Z_{П} + \frac{Z_{ГР}}{3}$	Тип	Проверяемый расцепитель (ном. ток уставки), А	Расчетный ток отключения $I_{В}$, А			
K_1		17,4	60,4	АВМ15с	$I_{Н} = 1200$	$3 I_{Н} = 3 \cdot 1200 = 3600$	3640	Обеспечено отключение $3600 < 3640$	3,5÷5,5
K_3	43	136,2	179,2	А3144	$I_{Н} = 300$ $I_{ЭМ} = 2100$	$I_{Втр} = 3 I_{Н} = 3 \cdot 300 = 900$ $I_{Вэм} = 1,27 \cdot 2100 = 2670$	1230	$900 < 1230$ Обесп. отключ. тепл. расп. $2670 > 1230$ не срабатыв.	25÷45
K_6		262,2	269,2	А3124	$I_{Н} = 100$ $I_{ЭМ} = 800$	$I_{Втр} = 3 I_{Н} = 300$ $I_{Вэм} = 1,27 \cdot 800 = 1020$	820	$300 < 820$ обеспечив. тепл. расп. $1020 > 820$ не сраб.	5÷12
K_8		925,2	968,2	А3181	$I_{Н} = 15$	$I_{Втр} = 3 I_{Н} = 45$	228	$45 < 228$ обеспечивает	0,2

Примечания: 1. $I_{Втр}$ - расчетный ток отключения автомата с тепловым расцепителем (для комбинированных расцепителей).

2. $I_{Вэм}$ - расчетный ток отключения автомата с электромагнитным расцепителем (для комбинированных расцепителей).

Принимаем $Z_{сов} = 20 \text{ мОм}$;

$$X_{\Sigma K_1} = X_T + X_{KL_1} = X_T + X_y, \ell_1 = 13,4 + \frac{0,0598 \cdot 90}{3} + 15,19 \text{ мОм};$$

$$Z_{K_1} = \sqrt{Z_{\Sigma K_1}^2 + X_{\Sigma K_1}^2} = \sqrt{26,17^2 + 15,19^2} = 30,2 \text{ мОм};$$

Значения сопротивлений трансформатора и кабелей даны в приложении 1, табл. 1,2;

б) по формулам (1), (2) определяем ток КЗ:

действующее значение периодической составляющей тока

$$I_{K_1}^{(3)} = \frac{U \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot Z_{K_1}} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 30,2} = 7700 \text{ А};$$

ударный ток

$$i_{yK_1} = K_y \sqrt{2} I_{K_1}^{(3)} = 1,05 \sqrt{2} \cdot 7700 = 11450 \text{ А}.$$

Коэффициент K_y находим по рис. 2 из соотношения

$$\frac{X_{\Sigma K_1}}{Z_{\Sigma K_1}} = \frac{15,19}{26,17} = 0,58 \Rightarrow K_y = 1,05.$$

Вывод: 1) автоматы А1, А2 устойчивы к токам трехфазного КЗ (приложение 1, табл. 15);

2) алюминиевые шины А100х8 устойчивы (приложение 1, табл. 6);

3) панели ГРШ устойчивы - допустимый ударный ток 50 кА;

4) время срабатывания автомата А1 0,4 - 0,6 сек; А2 - 0,25 - 0,4 сек. (приложение 2, рис. 9).

Определение токов КЗ в точке К₂:

а) находим сопротивление электрической цепи до точки К₂:

$$Z_{\Sigma K_2} = Z_{\Sigma K_1} + Z_{A3} = 26,17 + 6,8 = 32,97 \text{ мОм};$$

$$X_{\Sigma K_2} = X_{\Sigma K_1} + X_{A3} = 15,19 + 2,7 = 17,89 \text{ мОм};$$

где сопротивление автомата А3: $Z_{A3} = 6,8 \text{ мОм}$;

$X_{A3} = 2,7 \text{ мОм}$ принимаем по табл. 4, приложения 1.

$$Z_{\Sigma K_2} = \sqrt{Z_{\Sigma K_2}^2 + X_{\Sigma K_2}^2} = \sqrt{32,97^2 + 17,89^2} = 38 \text{ мОм};$$

б) определяем ток КЗ:

$$I_{K_2}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 38} = 6350 \text{ А};$$

$$i_{yK_2} = K_y \sqrt{2} I_{K_2}^{(3)} = 2 \cdot 6350 = 8950 \text{ А}.$$

Определяем K_y по рис. 2 из соотношения

$$\frac{X_{\Sigma K_2}}{Z_{\Sigma K_2}} = \frac{17,89}{38} = 0,47 \Rightarrow K_y = 1.$$

Вывод: 1) установочные автоматы типа АЗ124 устойчивы к токам КЗ с током расцепления не менее 25 А (приложение 1, табл. 12);

2) время срабатывания автомата А3 мгновенно и равно времени срабатывания автомата 0,10 - 0,020 сек;

3) время срабатывания автомата А2 1,2 - 2,8 сек (приложение 2, рис. 9). Автоматы А1, А2, А3 работают селективно.

Определение токов КЗ в точке К₄:

а) находим сопротивление электрической цепи до точки К₄

$$Z_{\Sigma K_4} = Z_T + Z_y \ell_1 + Z_{y2} \ell_2 + Z_{сов4} =$$

$$= 3,2 + 2,97 + 0,167 \cdot 120 + 25 = 51,17 \text{ мОм}.$$

Принимаем $Z_{сов} = 25 \text{ мОм}$,

$$X_{\Sigma K_4} = X_{\Sigma K_1} + X_y \ell_2 =$$

$$= 15,19 + 0,0598 \cdot 120 = 22,35 \text{ мОм};$$

$$Z_{K_4} = \sqrt{51,17^2 + 22,35^2} = 55,7 \text{ мОм};$$

б) определяем ток КЗ:

$$I_{K_4}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 55,7} = 4150 \text{ А},$$

$$i_{yK_4} = K_y \sqrt{2} I_{K_4}^{(3)} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 4150 = 5850 \text{ А}.$$

Вывод: 1) Шины устойчивы к току КЗ (приложение 1, табл. 6);

2) время срабатывания автомата А4 мгновенно и равно времени срабатывания 0,025 - 0,035 сек;

3) предохранитель Пр отключает аварийный участок за 0,025 - 0,07 сек (приложение 2, рис. 1);

4) автомат А2 срабатывает за 2,8 - 4,8 сек.

Автомат А4 и предохранитель Пр могут работать неселективно. Остальная защитная аппаратура работает избирательно.

Определение токов КЗ в точке К₅:

а) сопротивление электрической цепи до точки К₅

$$Z_{\Sigma K_5} = Z_{\Sigma K_4} + Z_{A5} = 51,17 + 2,05 = 53,22 \text{ мОм};$$

$$X_{\Sigma K_5} = X_{\Sigma K_4} + X_{A5} = 22,35 + 0,85 = 23,2 \text{ мОм},$$

где сопротивления автомата А5 $Z_{A5} = 2,05 \text{ мОм}$, $X_{A5} = 0,8 \text{ мОм}$ принимаем по табл. 4 (приложение 1),

$$Z_{K_5} = \sqrt{53,22^2 + 23,2^2} = 58,4 \text{ мОм};$$

б) определяем ток КЗ:

$$I_{K_5}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 58,4} = 3920 \text{ А},$$

$$i_{yK_5} = K_y \sqrt{2} I_{K_5}^{(3)} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 3920 = 5520 \text{ А}.$$

Вывод: 1) на линейных панелях установочные автоматы АЗ124 устойчивы (приложение 1, табл. 12);

2) автомат А5 срабатывает мгновенно; время отключения автомата 0,010 - 0,020 сек;

3) предохранитель Пр - 0,030 - 0,08 сек (приложение 2, рис. 1);

4) автомат А4 - 0,025 - 0,035 сек (приложение 2, рис. 4);

5) автомат А2 - 3,0 - 4,8 сек (приложение 2, рис. 9).

Защитная аппаратура работает селективно, хотя автомат А4 и предохранители Пр могут работать неселективно.

Определение токов КЗ в точке К₇:

а) находим сопротивление цепи до точки К₇:

$$\begin{aligned} Z_{\text{эк7}} &= Z_T + Z_{\text{КЛ1}} + Z_{\text{КЛ2}} + Z_{\text{КЛ3}} + Z_{\text{сов7}} + Z_{\text{А6}} = \\ &= Z_T + Z_{\text{У1}} l_1 + Z_{\text{У2}} l_2 + Z_{\text{У3}} l_3 + Z_{\text{сов7}} + Z_{\text{А6}} = \\ &= 3,2 + 2,97 + 20 + 0,52 \cdot 60 + 30 + 6,8 = 94,7 \text{ мОм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\text{эк7}} &= X_T + X_{\text{КЛ1}} + X_{\text{КЛ2}} + X_{\text{КЛ3}} + X_{\text{А6}} = \\ &= X_T + X_{\text{У1}} l_1 + X_{\text{У2}} l_2 + X_{\text{У3}} l_3 + X_{\text{А6}} = \\ &= 13,4 + 1,79 + 7,16 + 0,0637 \cdot 60 + 2,7 = 28,87 \text{ мОм}. \end{aligned}$$

Сопротивления проводов и кабелей определены по табл. 2, приложения 1, $Z_{\text{сов7}} = 30 \text{ мОм}$, автомата А6 по табл. 4 (приложение 1), $Z_{\text{К7}} = 94,7^2 + 28,87^2 = 99 \text{ мОм}$;

б) определяем ток КЗ:

$$I_{\text{К7}}^{(3)} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3 \cdot 99}} = 2330 \text{ А};$$

$$I_{\text{ук7}} = K_{\text{У}} \sqrt{2} I_{\text{К7}}^{(3)} = 1 \sqrt{2} \cdot 2330 = 3270 \text{ А}.$$

В ы в о д: 1) автомат А6 срабатывает мгновенно за время, равное времени отключения автомата, 0,015 - 0,030 сек;

- 2) автомат А5 - 0,010 - 0,020 сек;
- 3) предохранитель Пр - 0,20 - 0,6 сек;
- 4) автомат А4 - 0,025 - 0,035 сек;
- 5) автомат А2 - 5-9 сек.

Аппараты защиты работают селективно, за исключением автомата А5. Автомат А5 срабатывает и отключает линии Л3 и Л4.

При КЗ в точке К₇ срабатывает автомат А5 и, возможно, автомат А6. Все остальные аппараты защиты работают селективно.

Токи однофазного короткого замыкания (ОКЗ)

Значения токов ОКЗ определяются по формуле (27). Сопротивления трансформатора, кабелей (проводов) приведены в приложении 1, табл. 19, 22.

Определение ОКЗ в точке К₁:

$$\begin{aligned} I_{\text{К1}}^{(1)} &= \frac{U_{\text{ф}} \cdot 1000}{Z_{\text{пу1}} l_1 + \frac{Z_{\text{ТР}}}{3}} = \frac{220 \cdot 1000}{0,58 \cdot \frac{80}{3} + 43} = \\ &= \frac{220000}{60,4} = 3640 \text{ А}. \end{aligned}$$

В ы в о д: автомат А2 работает и отклю-

чит аварийный участок за время 3,5 - 5,5 сек (приложение 2, рис. 9)

$$I_{\text{в}} = 3 I_{\text{н}} = 3 \cdot 1200 = 3600 \text{ А}.$$

Определение ОКЗ в точке К₃:

$$\begin{aligned} I_{\text{К3}}^{(1)} &= \frac{U_{\text{ф}} \cdot 1000}{Z_{\text{пу1}} l_1 + Z_{\text{пу2}} l_2 + \frac{Z_{\text{ТР}}}{3}} = \\ &= \frac{220 \cdot 1000}{0,58 \cdot \frac{80}{3} + 0,99 \cdot 120 + 43} = \frac{220000}{179,2} = 1230 \text{ А}. \end{aligned}$$

В ы в о д: 1) автомат А4 срабатывает за 25-45 сек, отключение обеспечивает тепловой расцепитель автомата А4

$$I_{\text{Втр}} = 3 I_{\text{н}} = 3 \cdot 300 = 900 \text{ А} < I_{\text{Кз}}^{(1)}$$

электромагнитный расцепитель не срабатывает (приложение 1, табл. 26, приложение 2, рис. 4);

2) автомат А2 не срабатывает. Защитная аппаратура работает избирательно.

Определение ОКЗ в точке К₆:

$$\begin{aligned} I_{\text{К6}}^{(1)} &= \frac{U_{\text{ф}} \cdot 1000}{Z_{\text{пу1}} l_1 + Z_{\text{пу2}} l_2 + Z_{\text{пу3}} l_3 + \frac{Z_{\text{ТР}}}{3}} = \\ &= \frac{220 \cdot 1000}{17,4 + 118,8 + 1,5 \cdot 60 + 43} = \frac{220000}{269,2} = 820 \text{ А}. \end{aligned}$$

В ы в о д: 1) автомат А5 срабатывает за 5-12 сек. Отключение обеспечивает тепловой расцепитель автомата

$$I_{\text{Втр}} = 3 I_{\text{н}} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ А} < I_{\text{К6}}^{(1)}$$

Электромагнитный расцепитель не срабатывает, (приложение 1, табл. 25, приложение 2, рис. 4), т. е.

$$I_{\text{Взм}} = 1,27 \cdot 800 = 1020 \text{ А} > I_{\text{6}}^{(1)} = 820 \text{ А};$$

2) предохранитель Пр срабатывает за время 20-60 сек (приложение 2, рис. 7);

3) автомат А4 срабатывает за 20-150 сек (приложение 2, рис. 4).

Аппаратура защиты работает избирательно.

Определение ОКЗ в точке К₈:

$$\begin{aligned} I_{\text{К8}}^{(1)} &= \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{ПК6}} + Z_{\text{пу4}} l_4} = \frac{220 \cdot 1000}{269,2 + 23,3 \cdot 30} = \\ &= \frac{220000}{968,2} = 228 \text{ А}. \end{aligned}$$

В ы в о д: 1) автомат А6 срабатывает за время 0,2 сек;

2) автомат А5 - за время более 150 сек. Вся защитная аппаратура работает избирательно.

Для медных
кабелей и проводов

$$\gamma_y = \frac{18,4}{S} \text{ мОм/м.}$$

(Ом/км)
S - сечение мм²

$$S = \pi \cdot r^2 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$0,185 \text{ мм}^2 \rightarrow \frac{18,4}{0,185} = 23,44 \text{ (}\phi 1 \text{ мм)}$$

$$1,5 \text{ мм}^2 \rightarrow 12,3$$

$$2,5 \text{ мм}^2 \rightarrow 7,36$$

$$4 \text{ мм}^2 \rightarrow 4,6$$

$$0,636 \text{ мм}^2 \rightarrow 28,93 \text{ (}\phi 0,9 \text{ мм)}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1

Сопротивления трансформаторов, приведенные к вторичному напряжению 0,4 кВ

Номинальная мощность, кВ·А	20	50	100	160	180	250	320	400	560	630	750	1000
Активное, мОм Z_T	240	84	38,4	17	20	10,8	9,7	5,7	4,8	3,2	3,4	2,1
Индуктивное, мОм X_T	360	152	79,2	42	44	28,9	25,8	17,2	14,9	13,4	10,8	8,5

Таблица 2

29,2

13,8

Активные и индуктивные сопротивления кабелей

Номинальное сечение жилы, мм ²	Активное сопротивление жил при +20°С, мОм/м $Z_{ж}$		Индуктивное сопротивление, мОм/м, $X_{ж}$		
	алюминий	медь	Номинальное напряжение кабеля, кВ		
			до 1	6	10
2,5	20,6	12,3	0,11	-	-
4	12,4	7,35	0,104	-	-
6	7,74	4,8	0,095	-	-
10	5,17	3,07	0,090	-	-
18	3,1	1,84	0,073	0,11	0,122
25	1,94	1,15	0,0675	0,102	0,113
35	1,24	0,74	0,0662	0,091	0,099
50	0,89	0,52	0,0637	0,087	0,095
70	0,62	0,37	0,0625	0,083	0,090
95	0,443	0,26	0,0612	0,080	0,086
120	0,326	0,184	0,0602	0,078	0,083
150	0,258	0,153	0,0602	0,076	0,081
185	0,206	0,122	0,0596	0,074	0,079
240	0,167	0,099	0,0506	0,073	0,077
300	0,129	0,077	0,0587	0,071	0,075

Таблица 3

Сопротивление шин

Сечение шин, мм	Активное сопротивление при +65°С, мОм/м $Z_{ш}$		Индуктивное сопротивление, мОм/м, при $D_{ср}$, мм, $X_{ш}$			
	Алюминий	Медь	$D_{ср}$			
			100	150	200	300
25x3	0,475	0,268	0,179	0,2	0,225	0,244
30x3	0,394	0,223	0,163	0,189	0,208	0,235
30x4	0,286	0,167	0,163	0,189	0,208	0,235
40x4	0,222	0,125	0,145	0,17	0,189	0,214
40x5	0,177	0,1	0,145	0,17	0,189	0,214
50x5	0,142	0,08	0,137	0,1585	0,18	0,2
50x6	0,118	0,087	0,137	0,1585	0,18	0,2
60x6	0,099	0,0558	0,1185	0,145	0,163	0,189
60x8	0,074	0,0418	0,1185	0,145	0,163	0,189
80x8	0,055	0,0313	0,102	0,126	0,145	0,17
80x10	0,0445	0,025	0,102	0,126	0,145	0,17
100x10	0,0355	0,2	0,09	0,1127	0,133	0,157
2(60x8)	0,037	0,0209	0,12	0,145	0,163	0,189
2(80x8)	0,0277	0,0157	-	0,126	0,145	0,17
2(80x10)	0,0222	0,0125	-	0,126	0,145	0,17
2(100x10)	0,0178	0,01	-	-	0,133	0,157

Примечание: $D_{ср}$ - среднее геометрическое расстояние между фазами.

Таблица 4

Сопротивления автоматов и рубильников

Номинальный ток, А	Катушки расцепителей автоматов		Контакты, мОм, Z	
	активное при +65°С, мОм, Z_A	индуктивное, мОм, X_A	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	0,094	0,25	0,15
1000	-	-	-	0,08

Таблица 5

Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов тока низкого напряжения

Коэффициент трансформации	Активное сопротивление, мОм	Индуктивное сопротивление, мОм
20/5	42	67
30/5	20	30
40/5	11	17
50/5	3	4,8
75/5	1,7	2,7
100/5	0,75	1,2
150/5	0,42	0,67
200/5	0,2	0,3
300/5	0,11	0,17
400/5	0,05	0,09

Таблица 6

Динамическая устойчивость алюминиевых шин, кА

Размеры шин, мм	Расстояние между опорными изоляторами вдоль ося шин l , см											
	100				130				150			
	Расстояние между осями шин смежных фаз a , см											
	20	25	35	40	20	25	35	40	20	25	35	40
	А В С Расположение шин — — —											
15x3	9,5	10,5	12,5	13	7	8	9,5	10	6	7	8	9
20x3	12,5	14	16,5	17,5	9,5	10,5	12,5	13,5	8	9	11	11,5
25x3	16	17,5	21	22	12	13,5	16	17	10,5	11,5	14	15
30x4	22	24,5	29	31	17	19	22,5	24	14,5	16,5	19,5	21
40x4	29,5	33	39	42	22,5	25,5	30	32	19,5	22	26	28
40x5	32	36	42,5	46	25	28	33	35	21,5	24	28,5	30,5
50x5	41	46	54	58	31,5	35	41,5	46	27	30	36	38,5
50x6	45	50,5	60	64	35	39	46	49	30	33,5	40	42,5
60x6	53,5	60	70	76	41	46	54,5	58	36	40	47	50,5
80x6	70,5	79	93	100	54	60	71,5	76,5	47	52,5	62	66,5
100x6	87,5	98	115	123	67	75	89	95	58	65	77	82
60x8	62	69,5	82	88	47	53	63	67,5	41	46	54,5	58,5
80x8	82	91,5	108	115	63	70	83	89	54,5	61	72	77
100x8	102	113	134	143	78	87	100	110	68	75,5	89	95,5
60x10	68	75,5	89	95	52	58	68,5	73,5	45	50,5	59,5	64
80x10	93	104	122	131	71	80	94	102	62	69	82	88
100x10	115	129	152	163	88	99	117	125	77	86	102	109
	А В С Расположение шин											
15x3	4	5	5,5	6	3	3,5	4,5	4,5	3	3	3,5	4
20x3	5	5,5	6,5	7	3,5	4	5	5	3	3,5	4	4,5
25x3	5,5	6	7	7,5	4	4,5	5,5	6	3,5	4	4,5	5
30x4	8	9	10,5	11	6	7	8	8,5	5	6	7	7,5
40x4	9	10,5	12	13	7	8	9,5	10	6	7	8	8,5
40x5	11,5	13	15	16,5	9	10	11,5	12,5	7,5	8,5	10	10,5
50x5	13	14,5	17	18	10	11	13	14	8,5	9,5	11,5	12
50x6	15,5	17,5	20,5	22	12	13	16	17	10,5	11,5	13,5	14,5
60x6	17	19	22	24	13	14,5	17	18,5	11,5	12,5	15	16
80x6	19,5	22	25,5	27,5	15	17	20	21	13	14,5	17	18,5
100x6	22	24,5	29	31	17	19	22	24	14,5	16	19	20,5
60x8	22,5	25	30	32	17,5	19,5	23	24,5	15	17	20	21
80x8	26	29	34	37	20	22	26	28	17	19	23	24,5
100x8	29	32	38	41	22	25	30	31,5	19,5	21,5	26	27,5
60x10	28	31,5	37	40	21,5	24	28,5	30,5	19	21	25	26,5
80x10	32	36	42,5	45,5	25	28	32,5	35	21,5	24	28	30
100x10	36,5	41	48,5	52	28	31,5	37	40	24,5	27	32	35

Примечание: Таблица составлена на основании материалов [8].

Таблица 7

Термическая устойчивость алюминиевых шин, кА

Размеры шин, мм	Приведенное время t , сек												
	0,1	0,15	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,76	2	2,5	3	3,5
15x3	14	11	8,8	6,2	5	4,3	3,9	3,6	3,3	3,1	2,7	2,5	2,3
20x3	18,7	15	11,6	8,3	6,8	6	5,3	4,8	4,5	4,2	3,7	3,3	3,1
25x3	23	18,5	14,5	10,4	8,4	7,3	6,5	6	5,5	5,1	4,6	4,2	3,9
30x4	37	30	23	16,5	13,5	11,5	10,4	9,5	8,8	8,3	7,4	7,7	6,2
40x4	49	40	31	22	18	15,5	14	12,5	11,5	11	9,8	9	8,3
40x5	61	50	39	28,5	22,5	19,5	17,5	16	14,5	13,5	12	11	10,4
50x5	77	62	48	34	28	24	22	20	18,5	17	15,5	14	13
50x6	92	74	58	41	33,5	29	26	24	22	20,5	18,5	16,5	15,5

Продолжение табл. 7

Размеры шин, мм	Приведенное время t , сек												
	0,1	0,15	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5
60x6	110	90	70	50	40	35	31	29	26,5	25	22	20	18,5
80x6	147	120	93	66	54	46,5	41,5	38	35	33	29	27	25
100x6	184	148	116	82	67	58	52	48	44	41	37	33	31
60x8	147	120	93	66	54	46,5	41,5	38	35	33	29	27	25
80x8	195	160	125	88	72	62	55	51	47	44	39	36	33
100x8	245	200	155	110	90	77	69	64	59	55	49	45	41
60x10	184	148	116	82	67	58	52	48	44	41	37	33	31
80x10	245	200	155	110	90	77	69	64	59	55	49	45	41
100x10	307	250	194	137	112	97	86	80	74	69	61	56	52

Примечание: Таблица составлена на основании [8].

Таблица 8

Допустимые температуры нагрева шин и кабелей при КЗ и значение коэффициента С:

Вид и материал проводника	Наибольшая допустимая температура, °С	Коэффициент, С	Вид и материал проводника	Наибольшая допустимая температура, °С	Коэффициент, С
Шины медные	300	165	Кабели с бумажной изоляцией до 10 кВ с медными жилами	200	165
Шины алюминиевые	200	95			
Шины стальные, не имеющие непосредственного присоединения к аппаратам	400	70	То же, с алюминиевыми жилами	200	95
Шины стальные с непосредственным присоединением к аппаратам	300	60	Кабели и провода с полихлорвиниловой или резиновой изоляцией	150	150

Таблица 9

Типы и основные технические данные автоматов АЗ100

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Число полюсов*	Род расцепителя	Номинальный ток расцепителя, А	Обозначение типа (по исполнению)	Возможность установки блок-контактов	Возможность установки независимого расцепителя
А 3160	50	1	Тепловой	15,20,25,30,40 и 50	А 3161	Нет	Нет
			Без расцепителя	-	А 3161/7		
			Тепловой	15,20,25,30,40 и 50	А 3162		
		2	Без расцепителя	-	А 3162/7		
		3	Тепловой	15,20,25,30,40 и 50	А 3163		
			Без расцепителя	-	А 3163/7		
А 3110	100	2	Комбинированный	15,20,25,30,40,50,60, 80, 100	А 3113/1	Нет	Нет
			Электромагнитный	15,20,25,40,60 и 100	А 3113/5		
			Без расцепителя	-	А 3113/7		
		3	Комбинированный	15,20,25,30,40,50,60, 80 и 100	А 3114/1	Нет	Нет
			Электромагнитный	15,20,25,40,60 и 100	А 3114/5		
			Без расцепителя	-	А 3114/7		

Продолжение табл. 9

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Число полюсов*	Род расцепителя	Номинальный ток расцепителя, А	Обозначение типа (по исполнению)	Возможность установки блок-контактов	Возможность установки независимого расцепителя
А 3120	100	2	Комбинированный Электромагнитный	15,20,25,30,40,50,60, 80 и 100 30 и 100	А 3123	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3123/7	Нет	Нет
		3	Комбинированный Электромагнитный	15,20,25,30,40,50,60, 80 и 100 30 и 100	А 3124	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3124/7	Нет	Нет
А 3130	200	2	Комбинированный Электромагнитный	120, 150 и 200 200	А 3133	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3133/7	Есть	Нет
		3	Комбинированный Электромагнитный	120, 150 и 200 200	А 3134	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3134/7	Есть	Нет
А 3140	600	2	Комбинированный Электромагнитный	250,300,400,500, 600 600	А 3143	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3143/7	Есть	Нет
		3	Комбинированный Электромагнитный	250,300,400,500,600 600	А 3144	Есть	Есть
			Без расцепителя	-	А 3144/7	Есть	Нет

* Двухполюсные автоматы имеют те же габариты, что и трехполюсные.

Т а б л и ц а 10

Начальные токи срабатывания тепловых расцепителей

Тип автомата	Кратность тока по отношению к номинальному току расцепителя	Время, ч, в течение которого тепловой элемент расцепителя:		Тип автомата	Кратность тока по отношению к номинальному току расцепителя	Время, ч, в течение которого тепловой элемент расцепителя:	
		не должен сработать	должен сработать			не должен сработать	должен сработать
А 3180	1,1	2	-	А 3120	1,45	-	1
	1,35	-	2			-	-
А 3110	1,1	2	-	А 3130	1,45	-	1
	1,45	-	1			-	-
А 3120	1,1	2	-	А 3140	1,45	-	1

Т а б л и ц а 11

Уставки на ток мгновенного срабатывания автоматов серии АЗ 100

Тип автомата	Комбинированный расцепитель		Электромагнитный расцепитель		Отклонение от уставки [*]		
	Номинальный ток, А	Уставка на ток мгновенного срабатывания (постоянный и переменный ток), А	Номинальный ток, А	Уставка на ток мгновенного срабатывания, А	Нижний предел	Верхний предел	
						при переменном токе	при постоянном токе
А 3110	15	150	15	150	100	200	240
	20	200	20	200	140	280	360
	25	250	25	250	170	330	400
	30	300	40	300	210	390	480
	40	400	40	400	280	520	640
	50	500	60	500	350	650	800
	60	600	60	600	420	780	960
	80	800	100	800	580	1050	1240
	100	1000	100	1000	700	1300	1600
А 3120	15, 20, 25, 30	430		430	380	500	650
	40, 50, 60	600	100	600	510	700	900
	80, 100	800		800	680	950	1200
А 3130	120	840		840	700	1000	1400
	150	1050	200	1050	900	1200	1700
	200	1400		1400	1150	1600	2300
А 3140	250	1750		1750	1500	2000	2000
	300	2100		2100	1800	2400	2400
	400	2800	600	2800	2350	3200	3200
	500	3500		3500	3000	4000	4000
	600	4200		4200	3500	5000	5000

* При нижнем пределе электромагнитные расцепители не должны срабатывать, а при верхнем пределе должны срабатывать четко.

Т а б л и ц а 12

Коммутационная способность автоматов серии А 3100 на переменном токе

Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Предельный допустимый ударный ток короткого замыкания, А				Допустимое колич. отключений не менее	Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Предельный допустимый ударный ток короткого замыкания, А				Допустимое колич. отключений не менее
		127 В	220 В	380 В	500 В				127 В	220 В	380 В	500 В	
А 3161	15	3000	2500 ^v			10	А 3110	15	4000	3200	2500	15	
	20	3500	3000			7		20	5000	4000	3200	12	
	25	4000	3500			6		25	6500	5000	4000	10	
	30	4500	4000			5		30	9000	7000	6000	7	
	40	5000	4500			4		40	10000	8500	7000	5	
	50	5000	5000			3		50	12000	10000	8000	4	
								60	13000	11000	9000	3	
А3162 А3163	15			2000		15	80	14000	11500	9500	3		
	20			2500		12	100	15000	12000	10000	3		
	25			3000		10	А 3120	15	7000	5500	4000	12	
	30			3500		8		20	7500	6000	5000		
	40			4000		6		25	11000	9000	7000		
50			4500 ^v		5	30	12000	10000	8000				
							40	15000	13000	10000			

Продолжение табл. 12

Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Предельный допустимый ударный ток короткого замыкания, А				Допустимое колич. отключений не менее
		127 В	220 В	380 В	500 В	
А 3120	50		22000	19000	14000	7
	60		23000	20000	15000	7
	80		26000	22000	16000	7
	100		30000	23000	18000	5
А 3130	120		20000	19000	14000	12
	150		30000	23000	18000	8
	200		35000	30000	25000	4
А3140	250		35000	32000	32000	8
	300, 400		40000	35000	35000	6
	500, 600		50000	50000	40000	3

Продолжение табл. 13

Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Допустимое амплитудное значение тока короткого замыкания, А		Допустимое колич. отключений не менее
		110 В	222 В	
А 3110	от 15 до 100		5000	12
А 3120	15		9500	
	20		10000	
	25		13000	12
А 3130	от 30 до 80		16000	9
	100		20000	3
	120 и 150		17000	12
А3140	200		28000	3
	от 250 до 500 и 600		25000	6
			50000	3

Т а б л и ц а 13

Коммутационная способность автоматов серии А 3100 на постоянном токе

Тип автомата	Номинальный ток расцепителя, А	Допустимое амплитудное значение тока короткого замыкания, А		Допустимое колич. отключений не менее
		110 В	220 В	
А 3161	15	2000		7
	20	2400		6
	25	2800		5
	30	3200		4
	40	3600		3
	50	3600		3
А 3162 А 3163	15		1800	8
	20		2000	7
	25		2400	6
	30		2800	5
	40		3200	4
	50		3600	3

Т а б л и ц а 14

Динамическая и термическая устойчивость неавтоматических выключателей серии А 3100

Тип автомата	Ударный ток электродинамической устойчивости, А ампл, не менее	Ток полусекундной термической устойчивости, А действ, не менее
А 3161/7 А 3162/7 А 3163/7	1500	1000
А 3113/7 А 3114/7	2000	1400
А 3123/7 А 3124/7	5000	3500
А 3133/7 А 3134/7	10000	7000
А 3143/7 А 3144/7	25000	15000

Т а б л и ц а 15

Коммутационная способность автоматов серии АВМ

Величина автомата	Исполнение автомата	Переменный ток, кА		Постоянный ток, кА		
		Динамическая устойчивость при сквозном коротком замыкании (амплитуда ударного тока)	Ток контура при металлическом КЗ			
			Отключаемый ток, действующее значение симметричной составляющей $\cos \varphi = 0,3 \div 0,4$		Максимально отключаемый ток при постоянной времени 0,01 сек	
		до 400 В	до 500 В	до 230 В	до 480 В	
АВМ4*	Стационарный*	42	20	10	40	30
и АВМ10*	Выдвижной	42	18	10	40	30
АВМ15	Стационарный	65	35	20	45	30
	Выдвижной	60	35	20	45	30
АВМ20	Стационарный	75	35	20	45	30
	Выдвижной	60	35	20	45	30

* При подводе тока от источников питания к нижним зажимам стационарных выключателей типа АВМ4, АВМ10 отключающая способность снижается на 50% (см. ТУ16 - 522. 010-73).

Т а б л и ц а 16

Предельная коммутационная способность автоматов серии АП50

Исполнение автомата	Номинальный ток установки расцепителя, А	Допустимое значение тока КЗ для переменного тока с номинальным напряжением 500 В, частотой 50 Гц, $\cos \varphi = 0,5$, А*	Полное время отключения, сек	Допустимое значение тока КЗ для постоянного тока с номинальным напряжением 220 В и постоянной времени цепи 0,01 сек, А**	Полное время включения, сек	Допустимое количество отключений***
С тепловыми и электромагнитными расцепителями	1,6	300	0,17	1000	0,02	35
	2,5	400		1000		25
	4	600		1000		15
	6,4	800		1500		10
	10	1500		1500		3
	18	1500		1500		3
	25	1500		2000		3
	40	1500		2000		3
50	1500	2000	3			
Только с тепловыми расцепителями в каждом полюсе	1,6 2,5 4 6,4 10 18 25 40 50	14-кратный от номинального	до 3	14-кратный от номинального	до 3	35

* Эффективное значение симметричной составляющей тока КЗ цепи.

** Установившееся значение тока КЗ при разрыве цепи двумя полюсами.

*** После половины указанного числа отключений необходимо зачистить контакты, удалить копоть, пыль и частицы металла с пластмассовых деталей и дугочастельного устройства.

Т а б л и ц а 17
Собственное время срабатывания (отключения) аппарата

Тип автомата	Время отключения, сек
A3180	0,015±0,030
A3110	0,010±0,015
A3120, A3130	0,010±0,020
A3140	0,025±0,035
ABM4, ABH 10 неселективные	0,080
ABM 15 неселективный	0,08
ABM 20 неселективный	0,085
АП50 с тепловым и электромагнитным распределителем для переменного тока	0,17
То же, для постоянного тока	0,02
АП50 с тепловым распределителем в каждом полюсе	до 3

Т а б л и ц а 18
Предельная коммутационная способность предохранителей типа ПН2, ПП17 - 3900

Тип предохранителя	Номинальный ток, А	Предельное значение (действующее) отключаемого тока, кА, при напряжении:			
		380 В	500 В	постоянная времени не более 0,015 сек	
		$\cos \varphi = 0,1-0,3$	$\cos \varphi = 0,1-0,3$	220 В	440 В
ПН2-100	100	100	50	100	
ПН-250	250	100	80	100	
ПН2-400	400	40	25	80	
ПН2-600	600	25	25	40	
ПП17-3900	1000	110	64	100	60

Т а б л и ц а 19
Расчетные сопротивления трансформаторов при ОКЗ на стороне 400/230 В

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	Схема соединений	Расчетное сопротивление одной фазы трансформатора $\frac{\sum_{TP}}{3}$ МОм
Масляные трансформаторы			
20	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	1390
25	6±10	То же	1040
30	6±10	"	900
40	6±10	"	650
50	6±10	"	540
63	6±10	"	413

Продолжение табл. 19

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	Схема соединений	Расчетное сопротивление одной фазы трансформатора $\frac{\sum_{TP}}{3}$ МОм
100	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	260
160	6±10	То же	182
180	6±10	"	150
250	6±10	"	104
320	6±10	"	85
400	6±10	"	65
400	6±10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	22
560	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	48
630	6±10	То же	43
630	6±10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	14
1000	6-10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	9
750	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	38
1000	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	27
Сухие трансформаторы			
180	6±10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	55
180	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	180
250	6±10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	35
400	6±10	То же	22
320	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	85
560	6±10	Звезда-звезда с выведенным нулем	48
630	6±10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	14

Продолжение табл. 19

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	Первичное напряжение, кВ	Схема соединений	Расчетное сопротивление одной фазы трансформатора
			$\frac{Z_{TP}}{3}$, МОм
750	6+10	Звезда-звезда с выведенным нулем	36
1000	6+10	То же	27
1000	6+10	Треугольник-звезда с выведенным нулем	9

Примечание: При вторичном напряжении 230/133В значения сопротивлений, указанные в таблице, следует уменьшить в 3 раза.

Таблица 20

Полное сопротивление петли "фазный-нулевой провод" проводок, выполненных проводами и кабелями с резиновой или пластмассовой изоляцией, проложенных пучком в оболочках (в коробах, трубах, в каналах строительных конструкций и т.д.) без учета проводимости металлических оболочек. Z_{Σ} МОм/м

Сечение жил провода, мм ²	Материал жил	Сечение жил провода, мм ²		Материал жил	
		медь	алюминий	медь	алюминий
1,5	нулевого	29,2	-	70	25
2,5	нулевого	23,3	-	70	35
2,5	нулевого	17,4	29,3	70	50
4	нулевого	14,2	23,5	70	70
4	нулевого	10,95	18,3	95	35
6	нулевого	9,1	14,9	95	50
6	нулевого	7,32	12,1	95	70
10	нулевого	5,85	9,71	95	95
10	нулевого	4,87	7,27	120	35
16	нулевого	3,58	5,96	120	50
16	нулевого	2,78	4,82	120	70
25	нулевого	3,04	5,05	120	95
25	нулевого	2,26	3,77	120	120
25	нулевого	1,74	2,88	150	50
35	нулевого	2,79	4,63	150	70
35	нулевого	1,98	3,28	150	95
35	нулевого	1,5	2,49	150	120
35	нулевого	1,25	2,08	150	150
50	нулевого	1,8	2,66	185	50
50	нулевого	1,3	2,16	185	70
50	нулевого	1,06	1,76	185	95
50	нулевого	0,88	1,46	185	120
				185	150
				185	185

Примечание: Температура нагрева проводников принята 65°С.

Таблица 21

Полное сопротивление петли "фазная жила - алюминиевая оболочка" трехжильных кабелей с бумажной изоляцией в алюминиевой оболочке Z_{Σ} , МОм/м

Количество и сечение жил, мм ²	Марка кабеля, материал жил			
	АГ, АБ медь	ААГ, ААБ алюминий	АШ В медь	ААШ В алюминий
3x6	5,02	7,71	4,98	7,67
3x10	3,33	4,95	3,31	4,92
3x16	2,35	3,36	2,31	3,33
3x25	1,81	2,46	1,79	2,44
3x35	1,39	1,85	1,37	1,83
3x50	1,09	1,42	1,07	1,40
3x70	0,84	1,07	0,83	1,08
3x95	0,67	0,84	0,66	0,83
3x120	0,57	0,71	0,56	0,70
3x150	0,42	0,53	0,44	0,54
3x185	0,36	0,45	0,36	0,45
3x240	0,31	0,37	0,28	0,38

Примечание: Температура нагрева проводников принята 80°С.

Таблица 22

Полное сопротивление петли "фазная жила - нулевая жила" четырехжильных кабелей с бумажной изоляцией Z_{Σ} , МОм/м

Количество и сечение жил, мм ²	Без учета проводимости алюминиевых и свинцовых оболочек		С учетом проводимости алюминиевой оболочки	
	Медь	Алюминий	Медь	Алюминий
3x4+1x2,5	14,83	25,3	-	-
3x6+1x4	9,5	16,22	4,74	7,49
3x10+1x6	6,09	10,39	3,08	4,73
3x16+1x10	3,71	6,33	2,01	3,08
3x25+1x16	2,34	4,0	1,38	2,1
3x50+1x25	1,37	2,34	0,78	1,16
3x70+1x25	1,24	2,12	0,61	0,87
3x95+1x35	0,9	1,53	0,48	0,69
3x120+1x35	0,85	1,44	0,41	0,58
3x150+1x50	0,61	1,04	0,31	0,45
3x185+1x50	0,58	0,99	0,27	0,37

Примечание: Температура нагрева проводников принята 80°С.

Таблица 23

Активные сопротивления проводов и кабелей при $t = 65^{\circ}\text{C}$, МОм/м

Сечение жилы, мм ²	Материал жилы		Сечение жилы, мм ²	Материал жилы	
	медь	алюминий		медь	алюминий
1	22	-	35	0,626	1,03
1,5	14,6	-	50	0,44	0,73
2,5	8,73	14,6	70	0,324	0,52
4	5,44	9	95	0,23	0,38
6	3,66	6,08	120	0,183	0,31
10	2,2	3,64	150	0,146	0,244
16	1,39	2,2	185	0,118	0,187
25	0,873	1,44	240	0,089	0,151

Т а б л и ц а 24

Средние значения индуктивных сопротивлений петли "фазный - нулевой провод", выполненного из цветных металлов, $X_{лн}, \text{МОм/м}$

Условия прокладки	Индуктивные сопротивления
Кабель до 1 кВ или провода, проложенные в трубах	0,15
Изолированные провода на роликах	0,4
Провода на изоляторах внутри помещений или по наружным стенам здания	0,5
Воздушные линии низкого напряжения	0,6

П р и м е ч а н и е: Таблица составлена на основании материалов [11].

Продолжение табл. 25

Защитный аппарат	Элемент, отключающий ток КЗ	Среды невзрывоопасная (I-7-58 ПУЭ)	Среды взрывоопасная (УП-3-89 ПУЭ)
		Автоматы типа АП50 с комбинированным или только с электромагнитным расцепителем	Электромагнитный расцепитель мгновенного срабатывания (отсечка) Тепловой расцепитель (тепловой элемент)
Воздушные автоматы АВМ, Н,С исполнения (неселективные и селективные) и исполнения Б	Максимальный расцепитель мгновенного срабатывания (отсечка) Номинальный ток катушки максимального расцепителя замедленного срабатывания (у автоматов Н и С исполнения)	$I_B \geq 1,25 I_Y$	$I_B \geq 3 I_N$; $I_B \geq 6 I_M$

Т а б л и ц а 25

Формулы для определения расчетного тока отключения защитных аппаратов при ОКЗ

Защитный аппарат	Элемент, отключающий ток КЗ	Среды невзрывоопасная (I-7-58 ПУЭ)	Среды взрывоопасная (УП-3-89 ПУЭ)
		Предохранители	Плавкая вставка
Установочные автоматы типа АЗ160 и АП50, имеющие только тепловой расцепитель	Тепловой элемент расцепителя	$I_B \geq 3 I_N$	$I_B \geq 6 I_M$
Установочные автоматы серии АЗ100 с комбинированным или только с электромагнитным расцепителем	Электромагнитный расцепитель мгновенного срабатывания (отсечка)	$I_B \geq 1,43 I_M$ - для автоматов АЗ110 $I_B \geq 1,27 I_M$ - для автоматов АЗ120, АЗ130, АЗ140	
	Тепловой расцепитель (тепловой элемент комбинированного расцепителя)	$I_B \geq 3 I_N$	$I_B \geq 6 I_M$

Условные обозначения:

- I_B - ток отключения защитного аппарата, обеспечивающий отключение аварийной линии в минимальное время, А;
- I_N - номинальный ток плавкой вставки предохранителя или теплового элемента автомата, номинальный ток катушки максимального расцепителя, А.
- I_M - уставка на ток мгновенного срабатывания электромагнитного расцепителя, А. Коэффициенты 1,43 и 1,27 вычислены путем умножения коэффициента 1,1 (запас) на коэффициент, учитывающий производственный допуск (по заводским данным 1,3 для автоматов АЗ110 и 1,15 для автоматов АЗ120, АЗ130, АЗ140);
- I_Y - регулируемая уставка на ток мгновенного срабатывания, (отсечка) для автоматов АП и АВМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

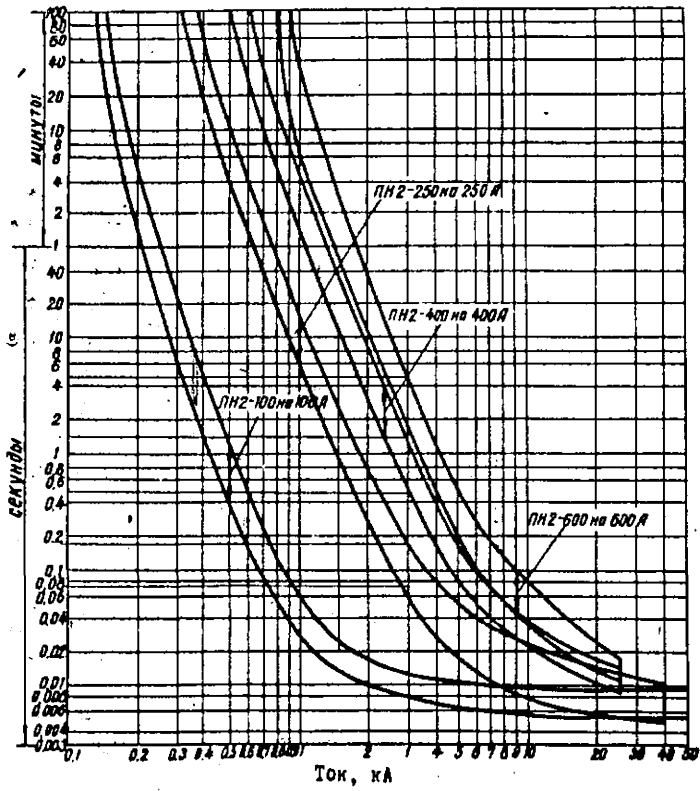


Рис. 1. Защитные характеристики предохранителей серии ПН2 для температуры окружающей среды + 25 °С

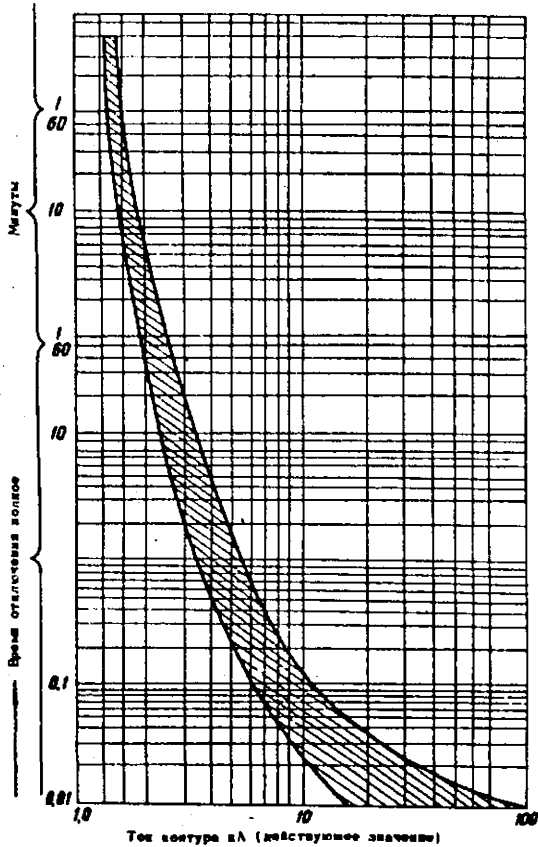


Рис. 3. Защитная характеристика предохранителя типа ПН7-3900 на номинальный ток плавкой вставки 1000А и напряжение 380 В

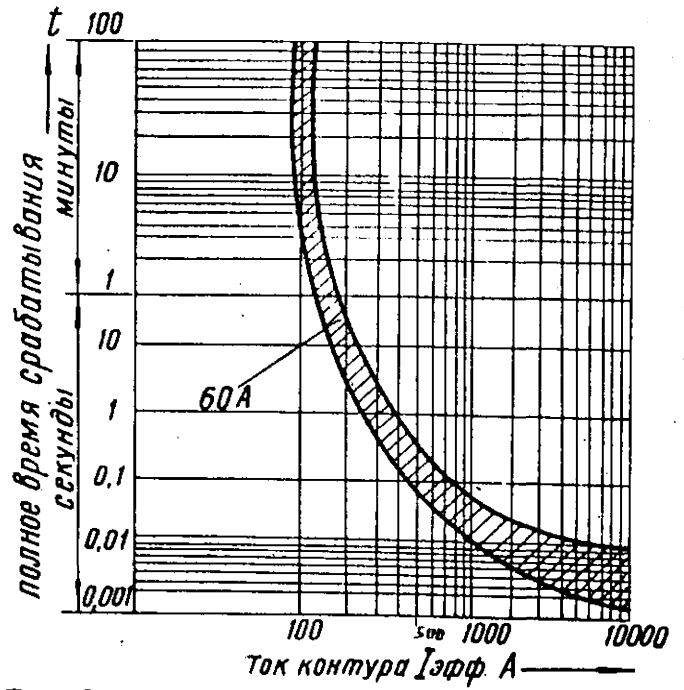


Рис. 2. Защитная характеристика предохранителя ПН2-60

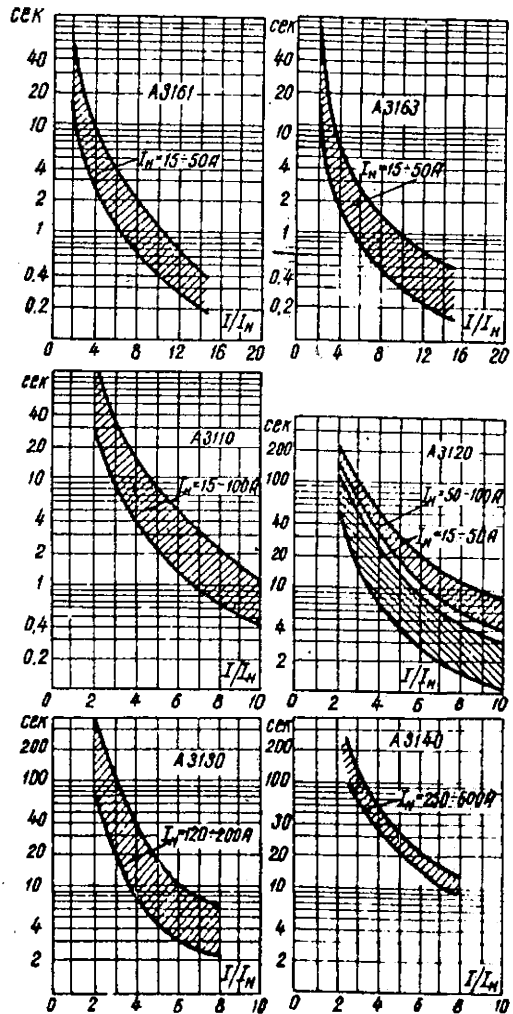


Рис. 4. Время-токовые характеристики автоматов А3100

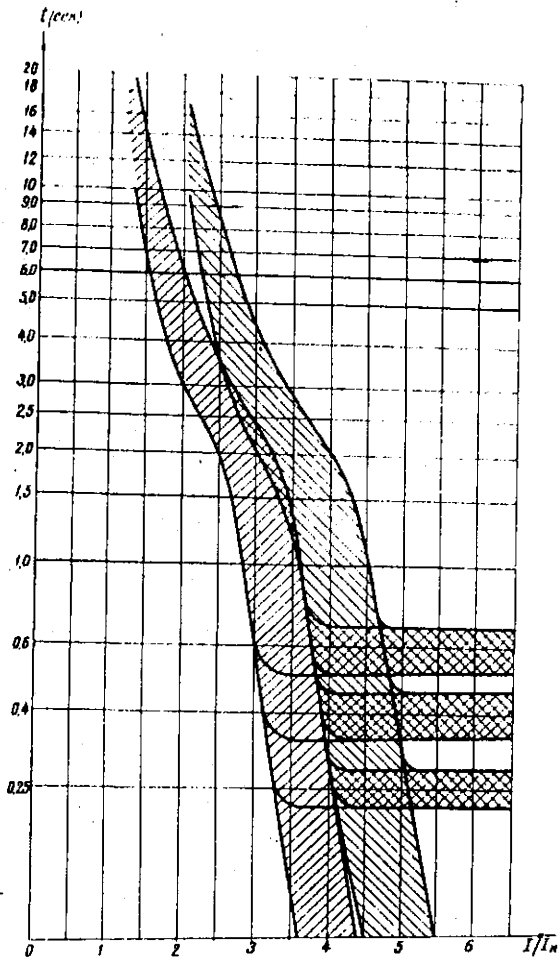


Рис. 5. Время-токовые характеристики автоматов величины АВМ20- $I_n = 2000$ А

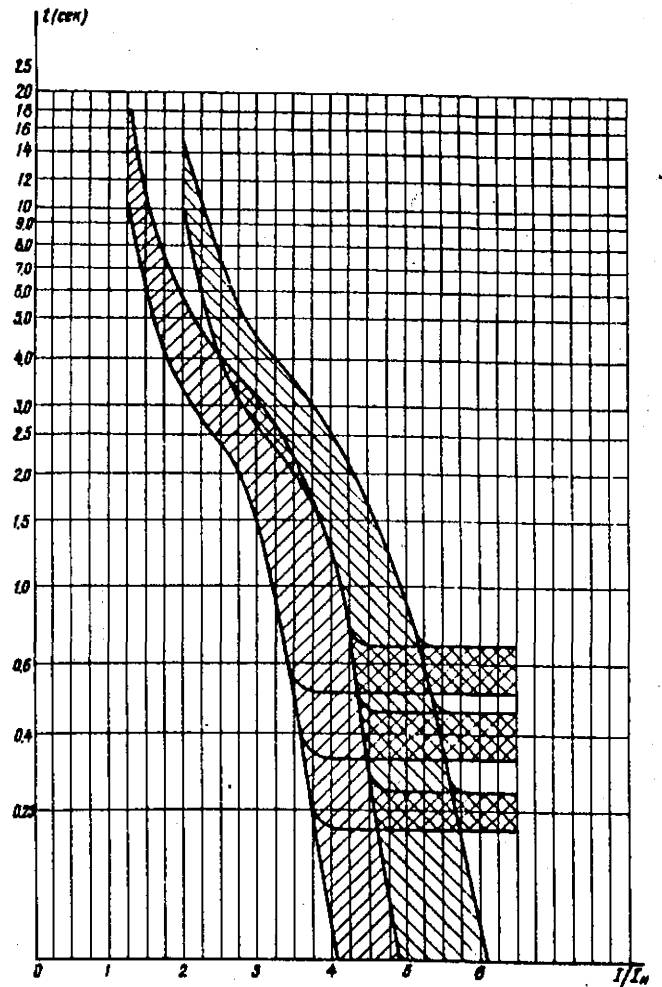


Рис. 6. Время-токовые характеристики автоматов величины АВМ20- $I_n = 1800$ А

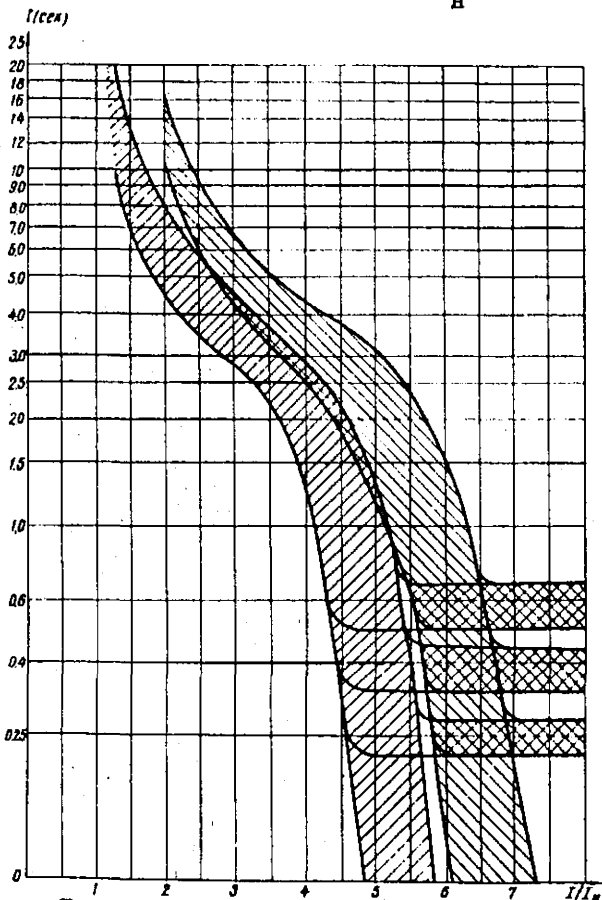


Рис. 7. Время-токовые характеристики автоматов величин АВМ20, АВМ15- $I_n = 1500$ А

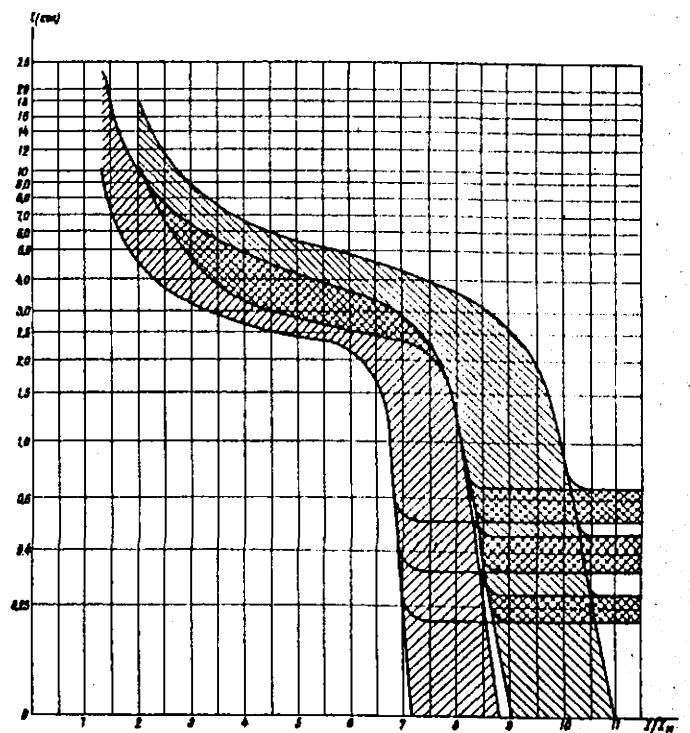


Рис. 8. Время-токовые характеристики автоматов величин АВМ20, АВМ15 - $I_n = 1000$ А, АВМ10 - $I_n = 1000$ А, $I_n = 800$ А

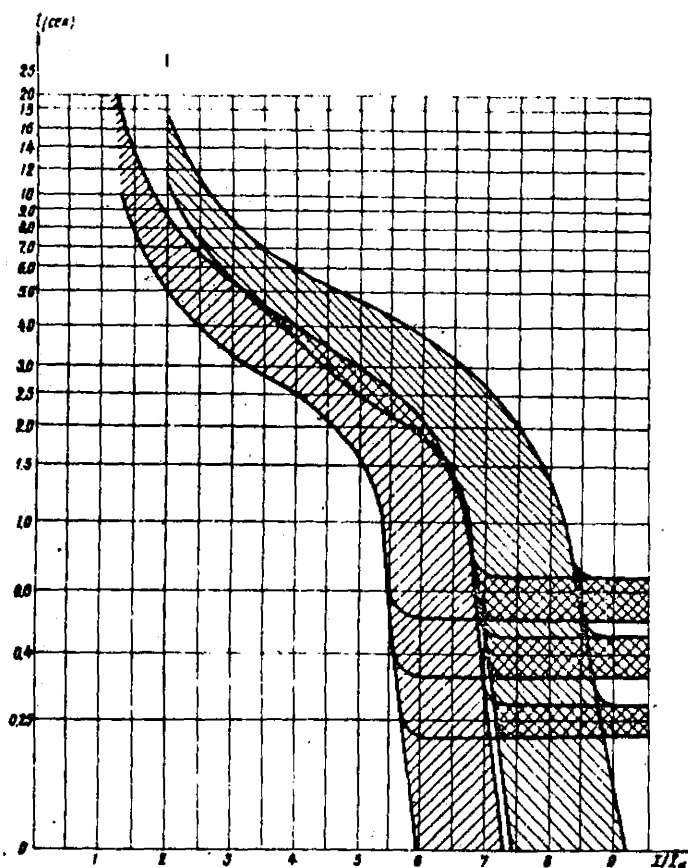


Рис. 9. Время-токовые характеристики автоматов величин АВМ20, АВМ15 - $I_n = 1200 \text{ A}$

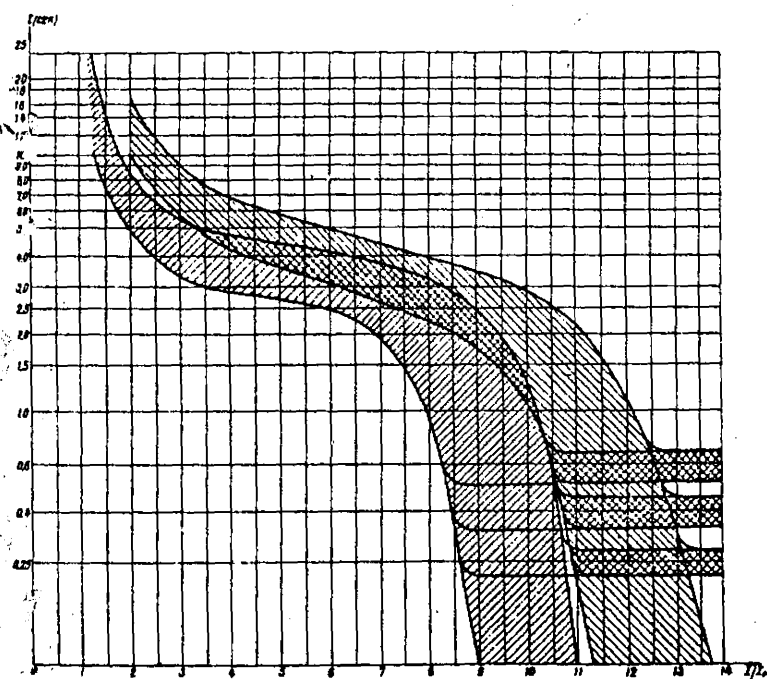


Рис. 10. Время-токовые характеристики автоматов величины АВМ15 - $I_n = 800 \text{ A}$

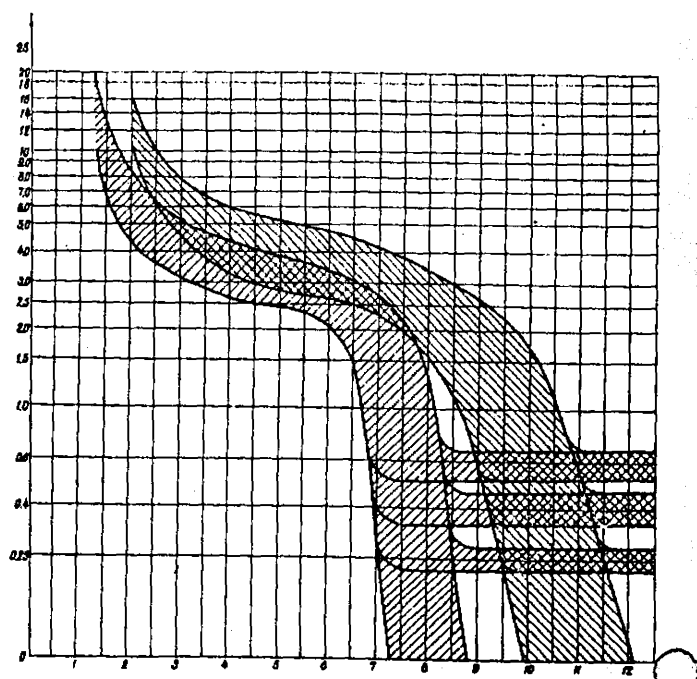


Рис. 11. Время-токовые характеристики автоматов величин АВМ4, АВМ10 - $I_n = 120-600 \text{ A}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). "Энергия", 1966.
2. Указания по проектированию силового электрооборудования промышленных предприятий СН 357-66, Стройиздат, 1967.
3. Инструкция по проектированию электрооборудования общественных зданий массового строительства ВСН-19-74/Госгражданстрой.
4. Архипов Н.К. Расчет токов короткого замыкания, изд. Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1954.
5. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий, Госэнергоиздат, 1961.
6. Голубев М.Л. Методы расчета токов короткого замыкания в распределительных сетях, "Энергия", 1967.
7. Баптиданов А.Н., Тарасов В.Н. Электрооборудование электрических станций и подстанций (в двух томах), Том I - Проектирование, электроустановок промышленных предприятий в 2 частях, под ред. Я.М. Большама, В.А. Грачева, М.Л. Савоера, Госэнергоиздат, 1963.
8. Информационное письмо Госэнергонадзора Т-13-68 от 1 октября 1968 г.
9. Спеваков П.И. Вычисление тока однофазного короткого замыкания в осветительных сетях методом удельного сопротивления. "Светотехника", 1971, № 1.
10. Карпов Ф.Ф., Козлов В.Н. Справочник по расчету проводов и кабелей, "Энергия", 1969.
11. Наифельд М.Р. Заземление, защитные меры безопасности, "Энергия", 1971.
12. Спеваков П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В, "Энергия", 1971.

Инженер Н.М.БЛЮМКИН

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ "ЛЕННИПРОЕКТ"

Адрес: 197046, Ленинград, пл. Революции, 3087

Отдел научно-технической информации, Технический редактор и корректор Н.П. Пастухова

Подписано к печ. 3.1.1977 г. М-09003. Формат бумаги 80x80/8. Печ. л. 3. зак. 1120.

Тираж 700 экз. Цена 38 коп. Ротапринт института "ЛенНИИпроект"