БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 617

А. В. БЕЛЯЕВ

ВЫБОР АППАРАТУРЫ, ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1988

В книге показано, как рассчитать токи к. з., учесть токоограничивающее действие электрической дуги в месте повреждения, какие значения токов принять для выбора аппаратуры и защит. Дана информация об автоматических выключателях и предохранителях новых типов и их защитных характеристиках. Далее рассмотрены вопросы выбора кабелей, аппаратуры, рабочих установок защит электродвигателей, сборок, вводов от трансформаторов, аварийных генераторов. Указано на недостатки защитных характеристик некоторых типов автоматических выключателей. Описаны выносные релейные защиты и области их применения. Даны примеры решения задач.

В приложении приведены справочные материалы для расчетов токов к. з.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность за ценные советы и помощь в работе над книгой М. А. Шабаду и В. А. Семенову.

Замечания и отзывы просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

Автор

1. СХЕМЫ СЕТЕЙ 0,4 кВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Построение первичных схем сетей 0,4 кВ определяется технологией производства, требованиями надежности электроснабжения электроприемников в соответствии с Правилами [13], удобством обслуживания, технико-экономическими показателями, а также требованиями защиты и автоматики. Схемы могут выполняться радиальными, магистральными и смешанными.

Радиальные схемы (рис. 1). От главного распределительного щита или комплектной трансформаторной подстанции (КТП) отходят линии питания электродвигателей *Д1* и *Д8* и других электроприемников большой мощности, а также сборок *1—4* (распределительных пунктов). К главному щиту нецелесообразно подключать большое количество электроприемников малой и средней мощности, так как они снижают его надежность. Для питания таких электроприемников (например, электродвигателей *Д2—Д10*) образуют вторичные сборки, питающиеся непосредственно от основного щита, и третичные сборки, питающиеся от вторичных сборок. Третичные сборки обладают наименьшей надежностью, их селективную защиту выполнить трудно, и поэтому их применяют лишь в отдельных случаях, для питания мелких и неответственных электроприемников. Токи к. з. на сборках значительно меньше, чем на основном щите 0,4 кВ, что позволяет применять более дешевую и менее стойкую аппаратуру с небольшими номинальными токами. При образовании сборок учитывается территориальное расположение электроприемников, удобство обслуживания, возможность экономии кабелей, поскольку сечение питающего сборку кабеля принимают меньше суммы сечений кабелей индивидуальных электроприемников ввиду их неодновременного включения.

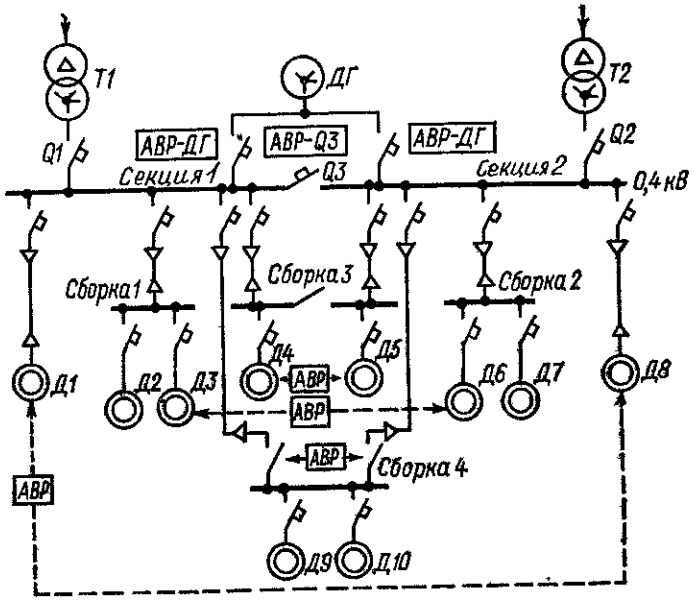


Рис. 1. Радиальная схема

Т — питающие трансформаторы; *ДГ* — аварийный дизель-генератор; *Q* — вводные и секционный автоматические выключатели; *Д* — электродвигатели

Распределение электродвигателей по сборкам зависит от их мощности и возможности выполнения защиты сети. Технико-экономические расчеты показывают, что к главному щиту целесообразно, как правило, подключать электродвигатели большой мощности (более 55 кВт). Электродвигатели малой (до 10 кВт) и средней (10—55 кВт) мощности целесообразно подключать ко вторичным сборкам. Однако в зависимости от конкретных особенностей данной электроустановки одиночные электродвигатели большой мощности (но не более 100 кВт) иногда могут подключаться к вторичным сборкам, а средней — к основному щиту 0,4 кВ.

В ответственных электроустановках с целью обеспечения надежности всю схему делят на две независимые части (подсистемы). Каждая из подсистем состоит из своего понижающего трансформатора *Т1 (Т2)*, питающегося от независимого источника, соответствующей секции основного щита 0,4 кВ и питающихся от нее вторичных сборок. Подсистемы взаимно резервируются на разных ступенях напряжения с помощью устройств автоматического включения резерва (АВР). Электродвигатели и приводимые ими ответственные механизмы одного назначения обычно дублируют и снабжают технологическим АВР (*Д1* и *Д8*, *Д3* и *Д6*, *Д4* и *Д5*). Такие электродвигатели также разделяют на две независимые группы, которые подключают к разным подсистемам (к разным секциям основного щита 0,4 кВ, к сборкам *1* и *2*, имеющим вводы от разных секций, к разным секциям сборки *3*). Ответственные электродвигатели, не имеющие технологического резервирования, подключают либо к секциям основного щита 0,4 кВ, либо к сборке *4*, имеющей АВР со стороны питания.

При таком построении схемы надежность работы обеспечивается тем, что в случае погашения одной из подсистем и отказа или неуспешной работы АВР между подсистемами (к. з. на шинах) напряжение в другой подсистеме сохраняется и нарушения технологического процесса не произойдет, так как сработает АВР электродвигателей и других ответственных электроприемников.

Для особо ответственных электроприемников (от которых зависит безаварийный останов производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров, повреждений дорогостоящего оборудования) предусматривают третий, аварийный источник питания, например аварийный дизель-генератор ДГ. Один из вариантов его подключения показан на рис. 1, здесь он резервирует каждую из подсистем независимо от состояния другой подсистемы. Чтобы не перегрузить генератор, все электроприемники, кроме особо ответственных, отключаются при потере основных источников питания защитой минимального напряжения (с выдержкой времени), а затем устройство АВР ДГ включает питание от генератора [4].

Магистральные схемы (рис. 2). Распределение энергии от трансформаторов *Т1* и *Т2* до сборок *1, 2* и электродвигателей *Д1, Д2* выполняется с помощью шинопроводов магистральных (*ШМ*) и распределительных (*ШР*), к которым подсоединяют электроприемники.

Смешанные схемы. Представляют собой комбинации из радиальных и магистральных схем. На рис. 3 показана одна из таких схем, применяемая для питания собственных нужд тепловых электростанций. К основным

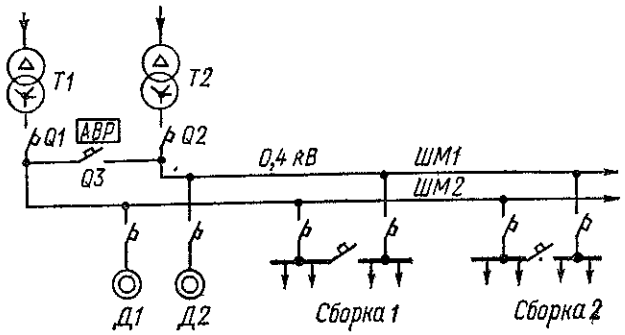


Рис. 2. Магистральная схема

секциям щитов 0,4 кВ подключеиы электродвигатели большой мощности *Д1, Д2, Д3,* к сборкам *1, 2, 3* — двигатели средней мощности *Д4—Д9.* Сборки *4, 5, 6,* подключениые по магистральной схеме и имеющие АВР на вводах, предиазначеиы для пнтания электродвигателей малой мощностн (в основном задвижек). На вводах в сборки *4* и *6* установлены реакторы для сиижения токов к. з. н обеспечеиия стойкостн автоматических выключателей АП-50 отходящих линий. Для резервного питания используется специальный трансформатор *ТСНр,* от которого проложен шинопровод, имеющий ввод на каждый из основных щитов 0,4 кВ.

Построение схемы сети 0,4 кВ в большой степени определяется зиачениямн токов коротких замыкаиий (к. з.) для выбора аппаратуры н защнт, а также ограниченными возможностямн применяемых защитных аппаратов (автоматических выключателей н плавких предохранителей).

Для этих сетей характерно весьма значительное (в десятки раз большее, чем в сетях напряжением выше 1000 В) влияние сопротивлений элементов схемы на зиачения токов к. з., быстрое снижение значений токов к. з. по мере удаления места повреждения от главиых шнн 0,4 кВ. Напрнмер, еслн при расчетах токов к. з. в сетях 6(10) кВ сопротнвление кабеля с алюминиевыми жнламн сечением 3×150 мм² длиной 200 м можно не учнтывать, то в сети 0,4 кВ такой же кабель, подключениый к КТП за траисформатором мощностью 1600 кВ·А, сиижает значение тока трехфазного металлического к. з.

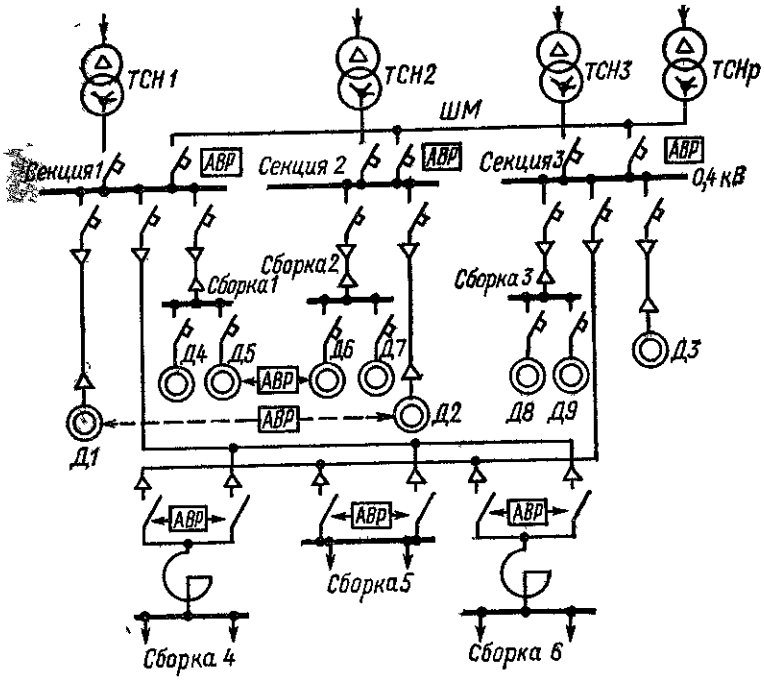


Рис. 3. Смешаиная схема

ТСН — рабочий трансформатор; *ТСНр* — резервный трансформатор

в 8,7 раза по сравнению с аналогичным значеиием до кабеля.

В сетях 0,4 кВ в отличие от сетей напряжением выше 1000 В применяют только встроенные в автоматические выключатели весьма неточные максимальные токовые защиты илн предохранители. Поэтому требования защиты сети накладывают определенные ограничения на типы н характеристикн применяемых защитных аппаратов, длины и сечения кабелей и, следовательно, на построеиие схемы сети.

Напрнмер, прн питанни от основного щита 0,4 кВ кабельнымн линнями (магистралямн) последовательно нескольких сборок с двигателями большой и средней мощностн обычно не удается обеспечнть необходнмую чувствительность защиты этих линий из-за необходимостн ее отстройкн от токов пуска или самозапуска электро-

двигателей. Поэтому такая магистральная схема питания применяется только для электродвигателей малой мощности (сборки *4, 5, 6* на рис. 3). Для питания электродвигателей средней мощности используются сборки, имеющие один или два самостоятельных ввода от щита 0,4 кВ (сборки *1, 2, 3, 4* на рис. 1). Однако и для одиночных сильно нагруженных сборок с большим количеством электродвигателей средней мощности также часто не удается обеспечить достаточную чувствительность защит питающих линий. В этих случаях вместо одной такой сборки устанавливают несколько с самостоятельными линиями питания, или питание части двигателей осуществляют непосредственно от щита 0,4 кВ.

Выбор кабелей также может определяться не только нагрузкой, но и условиями защиты, например, в сетях, требующих защиты от перегрузки, или при необходимости обеспечения достаточной чувствительности защиты, когда считается целесообразным увеличить токи к. з. путем увеличения выбранного по нагрузке сечения кабеля (но не более, чем на 1—2 ступени).

Условие селективности действия защит обусловливает необходимость сокращения количества последовательно включенных аппаратов защиты в сети 0,4 кВ. Обычно селективными удается выполнить лишь 1—2 ступени защиты на участках от щита 0,4 кВ до электроприемников, включая защитный аппарат отходящей от щита линии.

Из изложенного следует, что для сетей 0,4 кВ характерно единство процесса построения схемы сети, выбора кабелей, коммутационных аппаратов и защит

2. РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Цель и особенности расчетов. Расчет выполняется с целью выбора коммутационной аппаратуры, шинопроводов, кабелей и другого электрооборудования, а также проверки чувствительности защит.

Особенности расчета токов к. з. в сетях 0,4 кВ: необходимо учитывать активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи к. з.; при питании от энергосистемы не учитывается затухание периодической составляющей тока к. з. ввиду большой электрической

удаленности генераторов; при питании от маломощных местных электростанций или автономных генераторов напряжением выше 1000 В затухание периодической составляющей тока к. з. не учитывается, если мощность генератора превышает мощность понижающего трансформатора в пять и более раз; при питании от автономных или аварийных генераторов напряжением 0,4 кВ затухание учитывается независимо от мощности генератора.

В зависимости от цели расчета учитывают разные расчетные режимы работы электрической схемы. При выборе аппаратуры расчетным считается максимальный режим, при котором токи к. з. имеют максимальные значения. Этот же режим учитывают при расчетах токов пуска и самозапуска электродвигателей с целью обеспечения несрабатывания защит в сети. При проверке чувствительности защит расчетным является минимальный режим, при котором токи к. з. имеют минимальные значения. Этот же режим используют для проверки возможности пуска и самозапуска электродвигателей.

При расчетах металлических к. з. (сопротивление контакта в месте повреждения не учитывается) определяют следующие значения токов:

$I^{(3)}_{к.макс}$ — максимальный ток трехфазного металлического к. з. при максимальном режиме работы питающей энергосистемы, используется для выбора аппаратуры и защит, проверки селективности их действия;

$I^{(2)}_{к.мин}$ — минимальный ток двухфазного металлического к. з. при минимальном режиме работы энергосистемы, используется для проверки чувствительности защит;

$I^{(1)}_{к.мин}$ — минимальный ток однофазного металлического к. з., определяется для проверки чувствительности и селективности действия защит.

Подавляющее большинство к. з. в сетях 0,4 кВ проходит через электрическую дугу в месте повреждения, сопротивление которой существенно снижает значение тока к. з. По данным исследований ЛенПЭОВНИИПЭМ в 85 % случаев к. з. возникают вследствие металлического контакта, однако электродинамические силы, пропорциональные квадрату тока, разбрасывают металлические проводники, разрывают закоротки небольшого сечения и к. з. переходит в дуговое. При больших токах электродинамические силы достигают нескольких тонн

и так быстро разрывают металлнческий контакт, что ток к. з. не достигает максимального значения, а сразу же ограничивается сопротивлением дуги (как в токоограиичивающих выключателях). Лишь в 2 % случаев к. з. остается металлнческнм, при условии иадежно закрепленной закоротки большого сечения. Чтобы учесть токоограннчнвающее действне электрической дуги в месте повреждення, определяют следующие зиачения токов и напряженнй:

$I^{(3)}_{к.ср}$ — средний, наиболее вероятный ток трехфазного к. з., вычисленный с учетом токоограннчивающего действия дугн в месте повреждения [2], используется для выбора аппаратуры в сетн, в том числе отходящих от КТП линий, в случае, если невозможио выбрать аппаратуру, стойкую прн металлнческом к. з. (кроме вводных н секционного выключателей КТП, которые всегда следует выбирать по металлическим к. з.), а также для проверки селективностн защнт при этом токе, если при металлическом к. з. она не обеспечивается;

$I^{(2)}_{кR}$ — мннимальный ток двухфазиого к. з., вычисленный с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждеиия, нспользуется для проверки чувствительностн защит;

$I^{(1)}_{кR}$ — минимальный ток одиофазного к. з., вычнсленный с учетом токоограннчивающего действия дугн в месте повреждения, используется для проверкн чувствительиости защит;

$U_{к.ост}$ — остаточиое напряжение прн к. з. через дугу, используется для проверкн чувствнтельности максимальных токовых защит с пуском по напряжению, устанавливаемых на понижающих трансформаторах и генераторах иапряженнем 0,4 кВ.

Определяются также значения удариого тока к. з. и его тепловой импульс, их используют для выбора аппаратуры (автоматических выключателей, рубильиков), шинопроводов и другого электрооборудования.

Сопротивления элементов схемы замещения. Для расчетов токов к. з. составляют схему замещения, в которую входят все сопротнвления цепн к. з. Значення этих сопротивленнй выражают в миллиомах (мОм). Далее рассмотрено, как определяются сопротивления отдельиых элементов схемы замещения.

Питающая энергосистема. Актнвное н индуктивное сопротивления пнтающей энергосистемы до зажимов высшего напряження ВН понижающего трансформатора находят из расчета токов к. з. на стороне ВН и приводят к стороне низшего напряжения НН по выражениям:

$$x_с = 10^3 x_{с.ВН}\left(\frac{U_{н.т.НН}}{U_{н.т.ВН}}\right)^2; \quad r_с = 10^3 r_{с.ВН}\left(\frac{U_{н.т.НН}}{U_{н.т.ВН}}\right)^2, \qquad (1)$$

где $x_{с.ВН}$ и $r_{с.ВН}$ — соответственно индуктивиое и активное сопротнвлеиия энергосистемы, прнведенные к стороне ВН, Ом; $x_с$ н $r_с$ — то же, прнведенные к стороне НН понижающего трансформатора, мОм; $U_{н.т.НН}$ н $U_{н.т.ВН}$ — соответствеино номииальиые напряженнн обмоток НН и ВН поннжающего трансформатора.

Для практнческих расчетов токов к. з. допустимо не учнтывать активное сопротивление энергосистемы, а индуктивное прииимать равным полиому сопротивлению энергоснстемы (это не влняет на точность расчетов токов к. з. в сетн 0,4 кВ), определяя его зиачение (в омах) по известному току $I^{(3)}_{к.ВН}$ (в килоамперах) или мощности $S^{(3)}_{к.ВН}$ (в мегавольт-амперах) трехфазного к. з. на зажимах ВН поннжающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ:

$$x_{с.ВН} \approx \frac{U_{с.ВН}}{\sqrt{3} I^{(3)}_{к.ВН}} = \frac{U^2_{с.ВН}}{S^{(3)}_{к.ВН}}, \qquad (2)$$

где $U_{с.ВН}$ — напряжение эиергосистемы со стороны ВН трансформатора, при котором определялись ток и мощность к. з. снстемы, кВ.

Трансформаторы. Активное и ниндуктивное сопротивления понижающего трансформатора (в мнллномах), приведенные к стороне НН:

$$z_т = 10^4 \frac{u_к U^2_{н.т}}{S_{н.т}}; \qquad (3)$$

$$r_т = 10^6 \frac{P_к U^2_{н.т}}{S^2_{н.т}}; \qquad (4)$$

$$x_т = \sqrt{z^2_т - r^2_т}, \qquad (5)$$

где $S_{н.т}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $U_{н.т}$ — номннальное линейное напряжение обмоткн НН, кВ; $P_к$ — мощность потерь к. з. в трансформаторе, кВт; $u_к$ — напряженне к. з. траисформатора, %.

Таблица 1. Активные и индуктивные сопротивления, мОм, трансформаторов 6(10)/0,4 кВ [12]

Мощность трансформатора, кВ·А	$u_к$, %	$x_{1т}=x_{2т}$	$x_{0т}$	$r_{1т}=r_{2т}$	$r_{0т}$	$z_т^{(1)}/3$
Соединение обмоток Y/Y						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27
1000	8	12,6	72,8	2,0	19,1	33,6
1600	5,5	4,9	37,8	1,3	11,9	16,6
Соединение обмоток Δ/Y						
100	4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	27	27	10,7	10,7	30
400	4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1000	8	12,65	12,65	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

Параметры стандартных трансформаторов 6(10)/0,4 кВ приведены в табл. 1.

Кабели. Активное и индуктивное сопротивления кабелей определяют по выражениям

$$x_к = x_{уд} l; \quad r_к = r_{уд} l, \tag{6}$$

где $x_{уд}$ и $r_{уд}$ — соответственно индуктивное и активное удельные сопротивления кабелей, принимаются по табл. 2, мОм/м; l — длина кабеля, м.

Шины и шинопроводы. Сопротивление шин и шинопроводов находят аналогично. Их удельные сопротивления приведены в табл. 3, 4. Сопротивление шин и шинопроводов длиной 5 м и менее можно не учитывать, так как их влияние на ток к. з. невелико.

При известных расстояниях между прямоугольными шинами индуктивное сопротивление (в миллиомах на метр) можно определить приближенно по выражению

Таблица 2. Удельное сопротивление (прямой последовательности) кабелей с алюминиевыми жилами при температуре проводника 65 °С мОм/м [18]

Сечение жил, мм²		$r_{уд}$	$x_{уд}$	
фазных	нулевой		трехжильный кабель	четырехжильный кабель
3×4	2,5	9,610	0,092	0,098
3×6	4	6,410	0,087	0,094
3×10	6	3,840	0,082	0,088
3×16	10	2,400	0,078	0,084
3×25	16	1,540	0,062	0,072
3×35	16	1,100	0,061	0,068
3×50	25	0,769	0,06	0,066
3×70	35	0,549	0,059	0,065
3×95	50	0,405	0,057	0,064
3×120	50	0,320	0,057	0,064
3×150	70	0,256	0,056	0,063
3×185	70	0,208	0,056	0,063
3×240	—	0,160	0,055	—

Примечание. Для кабелей с медными жилами приведенные в таблице значения активного сопротивления следует уменьшить в 1,7 раза.

$$x_{уд} = 0{,}1445 \lg \frac{4a_{ср}}{h}, \tag{7}$$

где $a_{ср} = \sqrt[3]{a_{12} a_{13} a_{23}}$ — среднее геометрическое расстояние между фазами 1, 2 и 3, мм; h — высота шины, мм.

Воздушные линии. Активное и индуктивное сопротивления линий определяются по формуле (6). Для линий 0,4 кВ с проводами из цветных металлов значение удельного индуктивного сопротивления приближенно принимается равным 0,3 мОм/м, активного — по табл. 5. Линии со стальными проводами применяют редко. Их активное и индуктивное сопротивления зависят от конструкции провода, значения тока и могут быть найдены из работ [5, 14].

Реактор напряжением 0,4 кВ типа РТТ-0,38-50-0,14. Номинальные параметры реактора: напряжение 380 В, ток 50 А, индуктивное сопротивление при частоте 50 Гц составляет 140 мОм, активное — для исполнения У3 (алюминиевая обмотка) 17 мОм, для исполнения Т3 (медная обмотка) 16 мОм. До 1982 г. реактор обозначался РТТС-0,5-50-0,14.

Таблица 3. **Удельные сопротивления шин при 65 °С, мОм/м [15]**

Сечение, мм²	$r_{уд}$		$x_{уд}$ при среднем геометрическом расстоянии между фазами, мм, равном			
	медь	алюминий	100	150	200	250
25×3	0,2680	0,475	0,1790	0,2000	0,225	0,244
30×3	0,2230	0,394	0,1630	0,1890	0,206	0,235
30×4	0,1670	0,296	0,1630	0,1890	0,206	0,235
40×4	0,1250	0,222	0,1450	0,1700	0,189	0,214
40×5	0,1000	0,177	0,1450	0,1700	0,189	0,214
50×5	0,0600	0,142	0,1370	0,1565	0,180	0,200
50×6	0,0670	0,118	0,1370	0,1565	0,180	0,200
60×6	0,0558	0,099	0,1195	0,1450	0,163	0,189
60×8	0,0418	0,074	0,1195	0,1450	0,163	0,189
80×8	0,0313	0,055	0,1020	0,1260	0,145	0,170
80×10	0,0250	0,0445	0,1020	0,1260	0,145	0,170
100×10	0,0200	0,0355	0,0900	0,1127	0,133	0,157
2 (60×8)	0,0209	0,0370	0,1200	0,1450	0,163	0,189
2 (80×8)	0,0157	0,0277	—	0,1260	0,145	0,170
2 (80×10)	0,0125	0,0222	—	0,1260	0,145	0,170
2 (100×10)	0,0100	0,0178	—	—	0,133	0,157

Трансформаторы тока. Сопротнвление трансформаторов тока ввиду почти незаметного влняння на ток к. з. для упрощеиия расчетов не учитывается.

Автоматические выключатели, рубильники, переходные сопротивления. Сопротивленля автоматических выключателей, рубильников, а также переходные сопротнвления (вставных контактов, болтовых соединенний шин н др.) принимают по справочникам и каталогам. Эти сопротивления часто не учнтывают, поскольку их влияние на значение тока к. з. не превышает 5 % вблнзн трансформатора и снижается прн удалении точки к. з. Сопротивление автоматического выключателя, отключающего к. з., не учнтывают, так как при эксперимнтальном определении его предельиой коммутационной способностн нсходят из токов, которые были в цепи прн отсутствии этого выключателя (ГОСТ 2933—83).

При определении токов металлического к. з. $I^{(3)}_{к.макс}$ и $I^{(3)}_{к\,мин}$ переходное сопротивление в месте повреждения не учнтывается.

При определении минимального тока к. з. с учетом токоограничивающего действия дугн в месте повреждения $I^{(3)}_{кR}$ в схему замещения вводится актнвное сопро-

Таблица 4. **Удельные сопротивления шинопроводов до 1000 В, мОм/м [16]**

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Размеры сечения, мм²	
		фазных шин	нулевого провода
ШМА73	1600	2 (90×8)	2×710
ШМА68Н	2500	2 (120×10)	2×640
ШМА68Н	4000	2 (160×12)	2×640
ШЗМ16	1600	2 (100×8)	1500
ШРА73	250	35×5	—
ШРА73	400	50×5	—
ШРА73	630	80×5	—

Продолжение

Тип шинопровода	Сопротивление фазы		Сопротивление петли фаза—нуль		
	$r_{уд}$	$x_{уд}$	$z_{п.уд}$	$x_{п.уд}$	$r_{п.уд}$
ШМА73	0,031	0,017	0,123	0,072	0,098
ШМА68Н	0,027	0,023	—	—	—
ШМА68Н	0,013	0,02	—	—	—
ШЗМ16	0,017	0,014	0,067	0,052	0,043
ШРА73	0,200	0,100	—	—	—
ШРА73	0,130	0,100	—	—	—
ШРА73	0,085	0,075	—	—	—

ивленне $R_п = 15$ мОм [2, 8], учитывающее совокупно все ереходные сопротивлеиня (рубильников, автоматов, ставных контактов, болтовых соедннений) и сопротивеиие электрнческой дуги в месте повреждения.

Значение $R_п = 15$ мОм соответствует минимальному возможному оку к. з., полученному по опытным данным на одной из установок 5 кВ [18]. Максимальное расчетное значение тока к. з., равное 58 кА, авалось получить только при налнчин толстой медной перемычки, адежно привинченной к шинам. При к. з., полученном с помощью ривинченной медной закоротки сечением 6—25 мм², значение тока азывалось равным соответственно 60—87 % максимальиого, при ободно лежащем медном брусе — 56 %, при стальном свободно жащем брусе — 68 %, а при перекрытнях по изоляции — 32—56 %. ким образом, минимальное значение тока к. з. было равно 0,32× 58=18,6 кА. Из первого опыта металлического к. з. со значеннем ка 58 кА легко найти сопротивление цепн, которое прнближенно ожно счнтать индуктивным: $x = U/\left(\sqrt{3}\, I^{(3)}_к\right) = 500/\left(\sqrt{3}\cdot 58\right) = 5$ мОм. з опыта к. з. через наибольшее переходное сопротивление можно

Таблица 5. **Конструктивные и расчетные данные неизолированных медных, алюминиевых и сталеалюминиевых проводов при 20 °С (ГОСТ 839—74)**

Номинальное сечение, мм²	Медные провода (М)		Алюминиевые провода (А)		Сталеалюминиевые провода (АС)	
	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, мОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, мОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, мОм/м
4	2,2	4,52	—	—	—	—
6	2,7	3,03	—	—	—	—
10	3,6	1,79	—	—	4,5	2,695
16	5,1	1,13	5,1	1,8	5,6	1,772
25	6,4	0,72	6,4	1,14	6,9	1,146
35	7,5	0,515	7,5	0,83	8,4	0,773
50	9,0	0,3 1	9,0	0,576	9,6	0,593
70	10,7	0,267	10,7	0,412	11,4	0,42
95	12,6	0,191	12,3	0,308	13,5	0,314
120	14,0	0,154	14,0	0,246	15,5	0,249
150	15,8	0,122	15,8	0,194	16,8	0,195
185	17,6	0,099	17,5	0,157	18,8	0,159

найти значение этого сопротивления $R_п$. Поскольку минимальное значение тока к. з. равно $I^{(3)}_{кR} = U/\left(\sqrt{3}\sqrt{x^2 + R_п^2}\right) = 500/\left(\sqrt{3}\sqrt{5^2 + 5^2}\right) = 18{,}6$ кА, то $R_п = 15$ мОм. Это значение $R_п$ рекомендуется вводить в расчетную цепь инструкцией СН-357—77 [8]. Значение переходных сопротивлений $R_п = 15$ мОм можно принимать одинаковым для любой точки сети 0,4 кВ. Это объясняется тем, что по мере удаления от трансформатора существенно увеличиваются сопротивления остальных элементов цепи к. з., поэтому влияние переходных сопротивлений на ток к. з. быстро уменьшается и их более точный учет уже не имеет практического смысла. Определяющим в значении $R_п$ является сопротивление электрической дуги в месте повреждения.

Расчет токов междуфазного к. з. при питании от энергосистемы. Ток трехфазного металлического к. з. (в килоамперах) определяется по выражению

$$I^{(3)}_к = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}\sqrt{x^2_\Sigma + r^2_\Sigma}} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} z_\Sigma}, \qquad (8)$$

где $U_{ср.н}$ — среднее номинальное линейное напряжение сети НН, В (для сети 0,4 кВ равно 400 В); x_Σ и r_Σ — результирующее активное и индуктивное сопротивления (прямой последовательности) цепи к. з., мОм; z_Σ — результирующее полное сопротивление цепи к. з., мОм.

При определении $I^{(3)}_{к.макс}$ в значения x_Σ и r_Σ входят сопротивления питающей энергосистемы в максимальном режиме, а при определении $I^{(3)}_{к.мин}$ — в минимальном.

Минимальный ток металлического двухфазного к. з.

$$I^{(2)}_{к.мин} = 0{,}867 I^{(3)}_{к.мин}. \qquad (9)$$

Минимальный ток трехфазного к. з. с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения обычно почти не зависит от режима работы питающей системы и определяется по выражению

$$I^{(3)}_{кR} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}\sqrt{x^2_\Sigma + (r_\Sigma + R_{пер})^2}}, \qquad (10)$$

где x_Σ и r_Σ — индуктивное и активное результирующие сопротивления (прямой последовательности) цепи к. з. без учета сопротивлений рубильников, выключателей, вставных контактов, болтовых соединений, мОм; $R_{пер}$ — переходные сопротивления, совокупно учитывающие сопротивление электрической дуги в месте к. з., а также сопротивление рубильников, выключателей, вставных контактов, болтовых соединений, рекомендуется принимать равным 15 мОм.

Соответствующий ток двухфазного к. з.

$$I^{(2)}_{кR} = 0{,}867 I^{(3)}_{кR}. \qquad (11)$$

Среднее значение (наиболее вероятное) тока трехфазного к. з. с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения для любого расчетного случая (любой мощности питающей системы, трансформатора, удаленности точки к. з.) определяется по выражению [2]

$$I^{(3)}_{к.ср} = k_н \frac{I^{(3)}_{к.макс} + I^{(3)}_{кR}}{2}, \qquad (12)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,05—1,1 при токах металлического к. з. более 40 кА и 1,0 в остальных случаях.

Значения токов, получаемые по выражению (12), практически совпадают с результатами экспериментальных исследований наиболее вероятных токов к. з. в электроустановках 0,4 кВ [2].

Реальные возможные значения токов трехфазных к. з. находятся в зоне, верхней границей которой является ток металлического

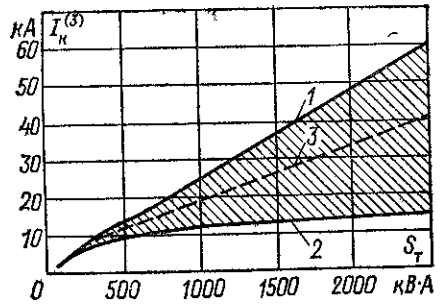


Рис. 4. Зона возможных токов при трехфазном к. з. на стороне 0,4 кВ трансформатора в зависимости от его мощности $S_т$

1 — граница максимальных токов при металлическом к. з. $I^{(3)}_{к.макс}$; *2* — граница минимальных значений токов к. з. через переходные сопротивления $I^{(3)}_{кR}$; *3* — значения наиболее вероятных токов к. з. $I^{(3)}_{к.ср}$

к. з. $I^{(3)}_{к.макс}$, определяемый по формуле (8), нижней — ток $I^{(3)}_{кR}$, вычисленный с учетом токоограничивающего действия дуги по формуле (10).

Влияние токоограничивающего действия дуги на зону возможных токов к. з. зависит от мощности трансформатора, мощности питающей энергосистемы и удаленности точки к. з. от шин 0,4 кВ.

Влияние мощности трансформатора на величину зоны возможных токов к. з. за трансформатором (на шинах 0,4 кВ) для случая, когда трансформатор питается от мощной энергосистемы ($x_с = 0{,}1\ x_т$), показано на рис. 4. Из этого рисунка видно, что влияние токоограничивающего действия дуги очень велико, особенно для мощных трансформаторов. Чем меньше мощность трансформатора (т. е. чем больше результирующее сопротивление до точки к. з.) тем меньше зона возможных токов к. з.

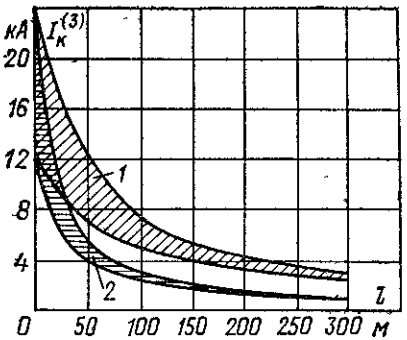
По мере удаления точки к. з. от шин 0,4 кВ зона возможных токов также сужается (рис. 5).

Аналогично влияет на зону возможных токов к. з. и сопротивление питающей системы. Для пояснения этого влияния представим сопротивление питающей системы до выводов 6 или 10 кВ трансформатора $x_с$ в виде отношения $x_с/x_т$. Зона возможных токов к. з. за трансформаторами в зависимости от $x_с/x_т$ видна из рис. П1, *а*, *б*, *в*. (т. е. чем больше результирующее сопротивление до точки к. з.), тем меньше зона возможных токов к. з.

Таким образом, в зависимости от конкретных расчетных условий значения токов $I^{(3)}_{к.макс}$ и $I^{(3)}_{кR}$ могут весьма существенно отличаться друг от друга, и это необходимо учитывать при выборе аппаратуры и проверке чувствительности защиты.

Для выбора аппаратуры следует использовать значения тока металлического к. з. Допустимо выбирать аппаратуру линий, отходящих от шин щита 0,4 кВ, по значению среднего (наиболее вероятного) тока к. з., если невозможно выбрать аппаратуру, стойкую при

Рис. 5. Зоны возможных токов при трехфазном к. з. алюминиевыми кабелями сечением 3×150 мм² (зона *1*) и 3×50 мм² (зона *2*) в зависимости от их длины *l* при питании от трансформатора мощностью 1000 кВ·А ($x_о = 0{,}1\ x_т$)



металлических к. з. Однако вводные и секционный выключатели этого щита как наиболее ответственные следует выбирать по металлическим к. з., поскольку при отказе выключателя отходящей линии они должны локализовать к. з. в пределах одной из подсистем электрической схемы.

В то же время при проверке чувствительности защит трансформаторов 6/0,4 и 10/0,4 кВ, а также автоматических выключателей и предохранителей 0,4 кВ во избежание отказов защиты следует учитывать минимальные токи к. з., рассчитанные с учетом токоограничивающего действия дуги $I_{кR}$. Например, согласно директивным указаниям института АТЭП коэффициент чувствительности (отношение минимального тока к. з, протекающего через реле защиты, к току его срабатывания) максимальной токовой защиты понижающих трансформаторов при двухфазном к. з. со стороны 0,4 кН должен быть: при токе металлического к. з. $I^{(2)}_{к.мин}$ не менее 1,5, при токе к. з. с учетом токоограничивающего действия дуги $I^{(2)}_{кR}$ не менее 1,2.

Если чувствительность максимальной токовой защиты трансформатора оказывается недостаточной к токам к. з. с учетом токоограничивающего действия дуги, то следует уменьшить ток срабатывания защиты, а для обеспечения ее несрабатывания при токах самозапуска электродвигателей уменьшить количество двигателей, участвующих в самозапуске, либо применить их поочередный автоматический самозапуск, либо выполнить защиту с пусковым органом напряжения. При определении чувствительности последнего также следует учитывать возможность дугового к. з. (см. § 11, пример 13). Расчеты показывают, что применение пускового органа напряжения для трансформаторов мощностью 630 кВ·А и более при малом сопротивлении питающей энергосистемы неэффективно из-за низкой чувствительности, однако вполне оправдано при большом сопротивлении питающей энергосистемы, а также при небольшой мощности трансформаторов или для защиты генераторов напряжением 0,4 кВ.

При проверке селективности защит в сети 0,4 кВ также в некоторых случаях целесообразно учитывать влияние переходных сопротивлений, особенно для потребителей II и III категорий, и обеспечивать селективное действие защит не во всем диапазоне возможных значений токов к. з. вплоть до тока металлического к. з. $I^{(3)}_{к.макс}$, а только в диапазоне до наиболее вероятных токов $I^{(3)}_{к.ср}$, не учитывая

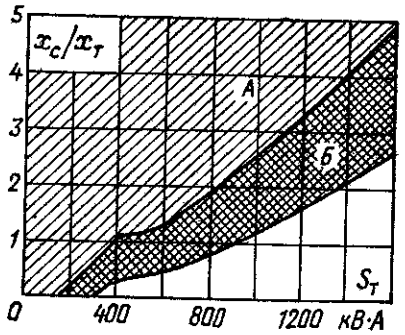


Рис. 6. Области, в которых можно не учитывать токоограничивающее действие дуги

редкие случаи неселективного действия защит при металлических к. з. Например, если проверку селективности между защищающими понижающий трансформатор предохранителями ПК-6 и ПК-10 и автоматами 0,4 кВ производить при максимальном токе $I^{(3)}_{к\,макс}$, то может потребоваться завышение номинальных токов вставок ПК, что не рекомендуется, или замена предохранителей выключателями, в то время как при токах $I^{(3)}_{к.ср}$, которые могут быть значительно меньше $I^{(3)}_{к\,макс}$, селективность будет обеспечена.

Влияние токоограничивающего действия дуги в месте к. з. можно не учитывать в следующих случаях: при выборе аппаратуры — если мощность трансформатора менее 400 кВ·А; при проверке чувствительности защит — если мощность трансформатора менее 250 кВ·А. При мощности понижающих трансформаторов $S_т$, равной или большей указанной, влиянием токоограничивающего действия дуги в месте к. з. можно пренебречь при достаточно большом сопротивлении питающей энергосистемы, при выборе аппаратуры, если отношение $x_c/x_т$ находится в области *А* или *Б*, а при проверке чувствительности защит — если это отношение находится в области *А*, рис. 6. Например, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А влиянием токоограничивающего действия дуги можно пренебречь при выборе аппаратуры, если $x_c/x_т \geqslant 1{,}2$, при оценке чувствительности защит — если $x_c/x_т \geqslant 2{,}5$.

При выборе аппаратуры можно не считаться с токоограничивающим действием дуги, если разница между током металлического к. з. $I^{(3)}_{к.макс}$ и током $I^{(3)}_{к\,ср}$ не превышает 15 %, т. е. если $(I^{(3)}_{к\,макс} - I^{(3)}_{к.ср})/I^{(3)}_{к.ср} \leqslant 0{,}15$. Подставляя в это уравнение значение $I^{(3)}_{к.ср}$ из выражения (12), получаем условие $I^{(3)}_{к\,макс} < 1{,}35\, I^{(3)}_{кR}$, при выполнении которого, выбирая аппаратуру, можно не учитывать токоограничивающее действие дуги.

Аналогично при оценке чувствительности защит можно не учитывать токоограничивающее действие дуги, если $(I^{(3)}_{к\,макс} - I^{(3)}_{кR})/I^{(3)}_{кR} \leqslant 0{,}15$, или если $I^{(3)}_{к.макс} \leqslant 1{,}15\, I^{(3)}_{кR}$.

Выражая токи $I^{(3)}_{к.макс}$ и $I^{(3)}_{кR}$ в полученных неравенствах через активное и индуктивное сопротивления трансформатора и индуктивное сопротивление энергосистемы, получаем уравнение, характеризующее отношение $x_c/x_т$, при котором также можно не считаться с токоограничивающим действием дуги при выборе аппаратуры и проверке чувствительности защиты:

$$\frac{x_c}{x_т} \geqslant \frac{\sqrt{(r_т + R_п)^2 - K_1 r_т^2}}{K_2 x_т} - 1,$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты, которые при выборе аппаратуры равны 1,82 и 0,82 соответственно; при оценке чувствительности защит — 1,32 и 0,32 соответственно. Кривые на рис. 6 соответствуют этому уравнению.

Определение ударных токов к. з. Ударный ток к. з. определяется по выражению

$$i_у = k_у \sqrt{2}\, I^{(3)}_{к.р}, \qquad (13)$$

где $k_у$ — ударный коэффициент; $I^{(3)}_{к.р}$ — расчетный ток трехфазного к. з., при расчетах по металлическим к. з. равен $I^{(3)}_{к.макс}$, при расчетах с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения равен $I^{(3)}_{к.ср}$.

При точных расчетах ударных токов металлического к. з. значение $k_у$ определяется в зависимости от отношения результирующих сопротивлений цепи к. з. x_Σ/r_Σ:

x_Σ/r_Σ	0,5	0,8	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_у$	1,0	1,02	1,05	1,12	1,2	1,35	1,46	1,53	1,59	1,63	1,67	1,71

При приближенном определении ударных токов к. з. на шинах КТП за трансформаторами мощностью 400 кВ·А и более принимают [8, 9]:

для металлического к. з. — наибольшее возможное значение ударного коэффициента $k_у = 1{,}5$, при этом $i_у = 2{,}12\, I^{(3)}_{к.макс}$;

для к. з. через переходные сопротивления $k_у = 1{,}3$, при этом $i_у = 1{,}83\, I^{(3)}_{к.ср}$.

Для к. з. на вторичных сборках, где имеется большое влияние кабелей, $k_у=1{,}1$; $i_у=1{,}55\,I^{(3)}_{к.р}$.

Учет подпитки места к. з. электродвигателями напряжением до 1000 В. Согласно Правилам [13] влияние асинхронных двигателей на ток к. з. не учитывается, если ток от них поступает к месту к. з. через те элементы, через которые протекает основной ток к. з. от сети и которые имеют существенное сопротивление. Для сети 0,4 кВ такими элементами являются кабели и переходные сопротивления в месте к. з. Поэтому подпитку от электродвигателей следует учитывать только при выборе аппаратуры на основном щите КТП и не следует учитывать при выборе аппаратуры на сборках 0,4 кВ.

Периодическую составляющую тока подпитки от электродвигателей можно определить, рассматривая нагрузку трансформатора как обобщенную с параметрами $E''_*=0{,}8$ и $x''_*=0{,}35$:

$$I''_{дв}=\frac{E''_*}{x''_*}I_{н.т}=2{,}29I_{н.т}. \qquad (14)$$

Суммарный ток в месте к. з. с учетом подпитки от электродвигателей

$$I^{(3)}_{к\Sigma}=I^{(3)}_{к.р}+2{,}29I_{н.т}, \qquad (15)$$

где $I^{(3)}_{к.р}$ — расчетный ток к. з. от трансформатора, для металлического к. з. равен $I^{(3)}_{к.макс}$; для к. з. через переходные сопротивления равен $I^{(3)}_{к.ср}$.

Ударный ток к. з. от электродвигателей

$$i_{у.дв}=k_{у.дв}\sqrt{2}I''_{дв}=3{,}22I_{н.т}, \qquad (16)$$

где $k_{у.дв}$ — ударный коэффициент тока к. з. от электродвигателей, принимается равным единице ввиду быстрого затухания апериодической составляющей.

Суммарный ударный ток к. з. с учетом подпитки от электродвигателей

$$i_{у\Sigma}=i_у+3{,}22I_{н.т}. \qquad (17)$$

Тепловой импульс тока к. з. ($кА^2\cdot с$). Определяется в месте установки выключателя по выражению

$$B_к=\left(I^{(3)}_{к.р}\right)^2\left(t_{откл}+T_{а.ср}\right)+1{,}5\left(I''_{дв}\right)^2T_{а.ср}+4I''_{дв}I^{(3)}_{к.р}T_{а.ср}, \qquad (18)$$

где $t_{откл}=t_{с.о}+t_а$ — время отключения к. з., с; $t_{с.о}$ — выдержка времени срабатывания отсечки селективного автомата, с, для автоматов отходящих линий обычно принимают минимальные уставки по времени, так как в подавляющем большинстве случаев этого достаточно; $t_а$ — время гашения дуги, для автоматических выключателей серии АВМ и «Электрон» равно 0,06 с, для А3700 — 0,01 с; $T_{а.ср}$ — усредненное значение времени затухания свободных токов к. з., принимается 0,03 с; $I^{(3)}_{к.р}$ — расчетный ток к. з., кА, для металлических к. з. равен $I^{(3)}_{к.макс}$, для к. з. через переходные сопротивления равен $I^{(3)}_{к.ср}$.

Пример 1. КТП с трансформатором мощностью 1000 кВ·А; напряжением 6,3/0,4 кВ; $u_к=5{,}5$ % питается от энергосистемы. Ток к. з. со стороны энергосистемы на зажимах ВН трансформатора составляет в максимальном режиме 17 кА, в минимальном — 10 кА. Определить параметры для выбора автоматических выключателей отходящих от КТП линий, а также минимальный ток двухфазного к. з. на шинах 0,4 кВ КТП и в конце отходящей кабельной линии с алюминиевыми жилами сечением 3×120 мм² длиной 100 м.

Решение. Вначале выполним расчет при металлическом к. з. в максимальном режиме работы питающей энергосистемы. Сопротивление питающей энергосистемы, приведенное к напряжению 0,4 кВ по формулам (1) и (2) составляет $x_с=10^3(0{,}4/6{,}3)^2\cdot0{,}63/(\sqrt{3}\cdot17)=0{,}85$ мОм. Сопротивление трансформатора (см. табл. 1): $x_т=8{,}5$ мОм; $r_т=2$ мОм. Максимальный ток металлического трехфазного к. з. на шинах 0,4 кВ определяем по формуле (8)

$$I^{(3)}_{к.макс}=\frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(0{,}85+8{,}5)^2+2^2}}=24\text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока подпитки от электродвигателей по формуле (14) $I''_{дв}=2{,}29\cdot1{,}445=3{,}3$ кА, где 1,445 — номинальный ток силового трансформатора, кА.

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры (с учетом подпитки от двигателей) по формуле (15) $I^{(3)}_{к\Sigma}=24+3{,}3=27{,}3$ кА.

Отношение результирующих сопротивлений от шин 0,4 кВ $x_\Sigma/r_\Sigma=(0{,}85+8{,}5)/2=4{,}67$. С учетом этого находим $k_у=1{,}5$, а значение ударного тока от системы по формуле (13) $i_у=1{,}5\cdot\sqrt{2}\cdot24=50{,}9$ кА. Суммарный ударный ток с учетом подпитки от двигателей по формуле (17) $i_{у\Sigma}=50{,}9+3{,}22\cdot1{,}445=55{,}5$ кА.

Тепловой импульс тока к. з. для автоматических выключателей серии АВМ и «Электрон» при выдержке времени срабатывания отсечки $t_{с.о}=0{,}25$ с по формуле (18) $B_к=24^2\,(0{,}25+0{,}06+0{,}03)+1{,}5\times3{,}3^2\cdot0{,}03+4\cdot3{,}3\cdot24\cdot0{,}03=206$ $кА^2\cdot с$. Аналогично для выключателей А3700 при $t_{с.о}=0{,}1$ с имеем $B_к=90{,}6$ $кА^2\cdot с$.

Определим теперь значения токов при двухфазном металлическом к. з. в минимальном режиме питающей энергосистемы. Сопротивление питающей энергосистемы $x_с=\dfrac{6{,}3}{\sqrt{3}\cdot10}\left(\dfrac{0{,}4}{6{,}3}\right)^2\cdot10^3=$

=1,47 мОм. При к. з. на шинах 0,4 кВ

$$I^{(3)}_{\text{к.мин}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(1{,}47+8{,}5)^2+2^2}} = 22{,}7 \text{ кА},$$

$I^{(2)}_{\text{к.мин}} = 0{,}867 \cdot 22{,}7 = 19{,}7$ кА. Сопротивление кабеля по формуле (6) $x_к = 0{,}057 \cdot 100 = 5{,}7$ мОм; $r_к = 0{,}32 \cdot 100 = 32$ мОм. При к. з. в конце кабеля

$$I^{(3)}_{\text{к.мин}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(1{,}47+8{,}5+5{,}7)^2+(2+32)^2}} = 6{,}2 \text{ кА},$$

$I^{(2)}_{\text{к.мин}} = 0{,}867 \cdot 6{,}2 = 5{,}38$ кА.

Выполним тот же расчет, но с учетом токоограничивающего действия дуги в месте к. з. Значение тока к. з. на шинах с учетом $R_п = 15$ мОм в максимальном режиме работы питающей системы по формуле (10)

$$I^{(3)}_{кR} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(0{,}85+8{,}5)^2+(2+15)^2}} = 12 \text{ кА}.$$

Среднее значение тока к. з. по формуле (12) $I^{(3)}_{\text{к.ср}} = (24+12)/2 = 18$ кА.

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры с учетом токоограничивающего действия электрической дуги и подпитки от двигателей по формуле (15) $I^{(3)}_{к\Sigma} = 18+3{,}3 = 21{,}3$ кА.

Ударный ток с учетом подпитки от двигателей по формулам (13) и (17) $I_{у\Sigma} = 1{,}3 \cdot \sqrt{2} \cdot 18 + 3{,}22 \cdot 1{,}44 = 37{,}6$ кА.

Тепловой импульс тока к. з. для автоматов серии АВМ и «Электрон» ($t_{с.о} = 0{,}25$ с): $B_к = 18^2(0{,}25+0{,}06+0{,}03) + 1{,}5 \cdot 3{,}3^2 \cdot 0{,}03 + 4 \cdot 3{,}3 \times 18 \cdot 0{,}03 = 117{,}8$ кА^2·с. Аналогично для автоматов А3700 ($t_{с.о} = 0{,}1$ с) $B_к = 53$ кА^2·с.

Значения токов при двухфазном к. з. через переходные сопротивления в минимальном режиме. При к. з. на шинах

$$I^{(3)}_{кR} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(1{,}47+8{,}5)^2+(2+15)^2}} = 11{,}7 \text{ кА};$$

$I^{(2)}_{кR} = 0{,}867 \cdot 11{,}7 = 10{,}1$ кА. При к. з. за кабелем

$$I^{(3)}_{кR} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(1{,}47+8{,}5+5{,}7)^2+(2+32+15)^2}} = 4{,}5 \text{ кА};$$

$I^{(2)}_{кR} = 0{,}867 \cdot 4{,}5 = 3{,}9$ кА.

Расчет токов к. з. по кривым приложения дает тот же результат. Не все из рассчитанных параметров нужны для выбора конкретных типов выключателей, это зависит от их каталожных данных. Здесь лишь дан пример их вычисления.

Расчет токов однофазного к. з. при питании от энергосистемы. *Расчет однофазного металлического к. з.* При большой мощности питающей энергосистемы ($x_с < 0{,}1\, x_т$) ток однофазного металлического к. з. находится по выражению, рекомендованному Инструктивными материалами Главгосэнергонадзора:

$$I^{(1)}_к = \frac{U_ф}{\frac{z^{(1)}_т}{3} + z_{пт}}, \qquad (19)$$

где $U_ф$ — фазное напряжение сети, В; $z_{пт}$ — полное сопротивление петли фаза — нуль от трансформатора до точки к. з., измеренное при испытаниях или найденное из расчета, мОм; $z^{(1)}_т$ — полное сопротивление поиижающего трансформатора токам однофазного к. з., принимается по данным табл. 1 или находится по выражению

$$z^{(1)}_т = \sqrt{(x_{1т}+x_{2т}+x_{0т})^2+(r_{1т}+r_{2т}+r_{0т})^2}, \qquad (20)$$

где $x_{1т}$ и $r_{1т}$ — индуктивное и активное сопротивления трансформатора токам прямой последовательности, мОм; $x_{2т}$ и $r_{2т}$ — то же обратной последовательности, мОм; $x_{0т}$ и $r_{0т}$ — то же нулевой последовательности, мОм.

Если питающая энергосистема имеет ограниченную мощность, то значения $z^{(1)}_т$ увеличиваются с учетом сопротивления энергосистемы:

$$z^{(1)}_т = \sqrt{(x_{1т}+x_{2т}+x_{0т}+2x_с)^2+(r_{1т}+r_{2т}+r_{0т}+2r_с)^2}. \qquad (20а)$$

Приближенно $z^{(1)}_т$ с учетом сопротивления энергосистемы можно принимать по табл. 6.

Таблица 6. Значения $z^{(1)}_т/3$ для расчета металлических однофазных к. з. при различной электрической удаленности трансформаторов от источников питания

Схема соединений обмоток	Трансформатор		Значения $z^{(1)}_т/3$, мОм		
	$S_{н.т}$, кВ·А	$u_к$, %	$x_с = 0{,}1\, x_т$	$x_с = x_т$	$x_с = 2x_т$
Y/Y	400	4,5	65,96	75,7	86,66
	630	5,5	43,77	51,65	60,5
	1000	5,5	27,53	32,46	38
	1600	5,5	16,9	19,73	22,92
Δ/Y	400	4,5	19,07	28,94	40,1
	630	5,5	14,8	22,76	31,68
	1000	5,5	9,39	14,47	20,17
	1600	5,5	5,86	9,07	12,65

Примечание. Активное сопротивление энергосистемы не учитывалось.

Таблица 7. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза — нуль для кабеля или пучка проводов с алюминиевыми жилами при температуре жилы 65°С, мОм/м [14]**

Сечение фазного провода, мм²	Значения $z_{пт.уд}$, мОм/м, при сечении нулевого провода, мм², равном										
	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
2,5	29,64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	24,08	18,52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	15,43	12,34	9,88	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	9,88	7,41	5,92	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	5,92	4,43	3,7	3,35	—	—	—	—
25	—	—	—	5,19	3,7	2,96	2,54	2,22	—	—	—
35	—	—	—	4,77	3,35	2,54	2,12	1,8	1,59	—	—
50	—	—	—	—	3,06	2,22	1,8	1,48	1,27	1,13	—
70	—	—	—	—	—	2,01	1,59	1,27	1,06	0,92	—
95	—	—	—	—	—	—	1,45	1,13	0,92	0,78	—
120	—	—	—	—	—	—	1,37	1,05	0,84	0,7	0,62
150	—	—	—	—	—	—	—	0,99	0,82	0,67	0,52
185	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,73	0,59	0,51

Примечание. При применении кабелей с медными жилами табличные значения $z_{пт.уд}$ уменьшить в 1,7 раза.

Сопротивление петли фаза — нуль

$$z_{пт} = z_{пт.уд1} l_1 + z_{пт.уд2} l_2 + ..., \qquad (21)$$

где $z_{пт.уд}$ — удельное сопротивление петли фаза—нуль каждого из последовательно включенных участков цепи от трансформатора до точки к. з., принимается по данным табл. 7—12 или работы [14], мОм/м; l — длина этого участка, м.

Таблица 8. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза — алюминиевая оболочка трехжильных кабелей с бумажной изоляцией (без нулевой жилы), мОм/м [14]**

Число и сечение жил, мм²	Значение $z_{пт.уд}$ для кабелей			
	медных АГ, АБ	алюминиевых ААГ, ААБ	медных АШв	алюминиевых ААШв
3×6	5,02	7,71	4,98	7,67
3×10	3,33	4,95	3,31	4,92
3×16	2,35	3,36	2,31	3,33
3×25	1,81	2,46	1,79	2,44
3×35	1,39	1,85	1,37	1,83
3×50	1,09	1,42	1,07	1,4
3×70	0,84	1,07	0,83	1,06
3×95	0,67	0,84	0,66	0,83
3×120	0,57	0,71	0,56	0,7
3×150	0,42	0,53	0,44	0,54
3×185	0,36	0,45	0,36	0,45
3×240	0,31	0,37	0,29	0,36

Таблица 9. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза — нуль с учетом проводимости алюминиевой оболочки четырехжильного кабеля с бумажной изоляцией, мОм/м [14]**

Число и сечение жил, мм²	Значения $z_{пт.уд}$ для кабелей		Число и сечение жил, мм²	Значения $z_{пт.уд}$ для кабелей	
	медных АГ, АБ	алюминиевых ААГ, ААБ		медных АГ, АБ	алюминиевых ААГ, ААБ
3×6 +1×4	4,74	7,49	3×70 +1×25	0,61	0,87
3×10+1×6	3,06	4,73	3×95 +1×25	0,48	0,69
3×16+1×10	2,01	3,08	3×120+1×35	0,41	0,58
3×25+1×16	1,38	2,1	3×150+1×50	0,31	0,45
3×35+1×16	1,06	1,57	3×185+1×50	0,27	0,37
3×50+1×25	0,78	1,16			

Сопротивление контактов шин, аппаратов, трансформаторов тока не учитывается, поскольку расчет по выражению (19) дает некоторый запас по току вследствие арифметического сложения $z_т^{(1)}/3$ и $z_{пт}$.

При расчетах однофазных к. з. во взрывоопасных помещениях вспомогательные проводники зануления (алюминиевые оболочки кабелей, стальные полосы) в расчет-

Таблица 10. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза трехжильного кабеля с алюминиевыми жилами — стальная полоса 40×4, уложенная на расстоянии 0,8 м от кабеля, мОм/м [14]**

Число и сечение жил, мм²	Значения $z_{пт.уд}$, мОм/м, при токе однофазного к.з., А			Число и сечение жил, мм²	Значения $z_{пт.уд}$, мОм/м, при токе однофазного к.з., А		
	200	400	2500		200	400	2500
3×6	8,8	8,37	—	3×70	3,25	2,79	2,34
3×10	6,29	5,87	—	3×95	3,12	2,67	2,22
3×16	4,92	4,47	4,02	3×120	3,05	2,6	2,15
3×25	4,12	3,66	3,21	3×150	2,99	2,54	2,09
3×35	3,73	3,27	2,81	3×185	2,95	2,5	2,05
3×50	3,44	2,98	2,52	3×240	2,91	2,45	2,01

Таблица 11. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ цепи фаза — нуль закрытых шинопроводов в стальном кожухе, мОм/м [14]**

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Размер алюминиевых шин в одной фазе, мм	Значения $z_{пт.уд}$, мОм/м, при токе однофазного к.з., А, равном					
			300	400	500	600	800	1000, 3000
Шинопровод с нулевой шиной (четырехпроводный)								
ШМАХ-65	600	80×8	0,3	0,33	—	0,3	0,28	—
ШРА-64-250	250	30×4	0,9	0,91	—	0,93	1,05	
ШРА-64-400	400	40×5	0,65	0,66	—	0,67	0,76	
ШРА-84-600	600	60×6	0,6	0,61	—	0,62	0,7	
ШОС-67	25	см. примечание	7,22					
Шинопровод без нулевой шины (трехпроводный)								
ШМА-59С	4000	2 (160×12)	—	—	—	—	—	0,45
ШМА-59С	2500	2 (120×10)						0,5
ШМА-IX-1600	1600	120×10						0,5
ШМА-65	1600	2 (100×10)						0,49
ШМА-58	1500	2 (80×8)						0,51
ШМА-IX-1000	1000	80×8			0,6	0,6		0,55
ШМАХ-65	1000	120×10			0,58	0,58		0,53
ШРА-2-Ф	250	30×5	1,43		1,38	1,38		1,28
ШРА-4Ф	400	50×5	1,25		1,2	1,2		1,15
ШРА-6Ф	600	60×6	1,1		1,05	1,06		1,0

Примечание. Шинопровод ШОС-67 выполнен медным проводом сечением 6 мм².

Таблица 12. **Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ цепи фаза — нуль четырехпроводной воздушной линии с алюминиевыми проводами, мОм/м [14]**

Фазный привод	Расстояние фаза—нуль, м	Значения $z_{пт.уд}$, мОм/м, при нулевом проводе						
		А-16	А-25	А-35	А-50	А-70	А-95	А-120
А-16	0,4	4,86	—	—	—	—	—	—
	1	4,87	—	—	—	—	—	—
	2	4,88	—	—	—	—	—	—
А-25	0,4	4,01	3,18	2,76	2,43	—	—	—
	1	4,04	3,21	2,79	2,46	—	—	—
	2	4,05	3,23	2,81	2,49	—	—	—
А-35	0,4	3,59	2,76	2,53	2,01	1,78	—	—
	1	3,62	2,79	2,57	2,05	1,82	—	—
	2	3,63	2,81	2,59	2,08	1,86	—	—
А-50	0,4	3,25	2,43	2,01	1,69	1,47	1,35	—
	1	3,28	2,46	2,05	1,73	1,53	1,40	—
	2	3,30	2,49	2,08	1,77	1,58	1,45	—
А-70	0,4	—	2,21	1,78	1,47	1,28	1,15	1,08
	1	—	2,25	1,82	1,53	1,34	1,21	1,14
	2	—	2,28	1,86	1,58	1,39	1,27	1,20
А-95	0,4	—	2,07	1,66	1,35	1,15	1,02	0,96
	1	—	2,11	1,71	1,40	1,21	1,09	1,03
	2	—	2,14	1,75	1,45	1,27	1,15	1,09
А-120	0,4	—	—	1,58	1,27	1,08	0,95	0,85
	1	—	—	1,63	1,33	1,14	1,03	0,93
	2	—	—	1,67	1,38	1,20	1,09	1,00

ную схему не включаются. Свинцовые оболочки кабелей не включаются в расчетную схему в любом случае, так как их не разрешается использовать в качестве заземляющих проводников.

Расчет однофазного к. з. через переходные сопротивления. Ток однофазного к. з. при любой мощности питающей энергосистемы и с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения определяется по выражению

$$I_{кR}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{z_Σ^{(1)}}{3} + z_{дт}}, \qquad (22)$$

где $z_{пт}$ — то же, что в выражении (19); $z_{\Sigma}^{(1)}$ — условная величина, численно равная геометрической сумме полных сопротивлений току однофазного к. з. питающей энергосистемы, трансформатора, а также переходных сопротивлений $R_п$, определяется в миллиомах по выражению

$$z_{\Sigma}^{(1)}=\sqrt{(x_{1т}+x_{2т}+x_{0т}+2x_с)^2+(r_{1т}+r_{2т}+r_{0т}+2r_с+3R_п)^2}. \quad (23)$$

Значения $z_{\Sigma}^{(1)}/3$ с учетом $R_п=15$ мОм и в зависимости от соотношения сопротивлений питающей энергосистемы $x_с$ и трансформатора $x_т$ (прямой последовательности) приведены в табл. 13.

Таблица 13. **Значения $z_{\Sigma}^{(1)}/3$ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения ($R_п=15$ мОм) при различной электрической удаленности трансформаторов от источников питания**

Схема соединений обмоток	Трансформатор		Значения $z_{\Sigma}^{(1)}/3$, мОм		
	$S_{н.т}$, кВ·А	$u_к$, %	$x_с=0{,}1x_т$	$x_с=x_т$	$x_с=2x_т$
Y/Y	400	4,5	72,4	81,37	91,66
	630	5,5	50	57,08	65,2
	1000	5,5	34,84	38,85	43,58
	1600	5,5	25,6	27,56	29,92
Δ/Y	400	4,5	27,67	35,21	44,84
	630	5,5	23,36	29,07	36,48
	1000	5,5	19,32	22,24	26,3
	1600	5,5	17,1	18,44	20,44

Полезно запомнить, что для всех трансформаторов с одинаковыми схемой соединения обмоток и напряжением $u_к$ произведение $S_{н.т}(z_т^{(1)}/3)=\beta\approx\text{const}$ (с учетом сопротивления питающей энергосистемы — при сопоставимом отношении сопротивлений $x_с/x_т$). Отсюда можно найти значение $z_т^{(1)}/3$ для трансформатора другой мощности, в том числе старого типа. Например, для трансформаторов, имеющих $u_к=5{,}5$ % и схему соединения обмоток Y/Y при $x_с/x_т=0{,}1$, $\beta\approx 27\,000$. Следовательно, для трансформатора мощностью 750 кВ·А (при прочих равных условиях) $z_т^{(1)}/3\approx 27\,000/750=36$ мОм.

Пример 2. Вычислить ток однофазного к. з. с учетом переходных сопротивлений на зажимах трансформатора мощностью 400 кВ·А, $u_к=5{,}5$ %, соединение обмоток Y/Y, присоединенного к энергосистеме сопротивлением $x_с=0{,}1\,x_т$.

Решение. Значение $z_{\Sigma}^{(1)}/3$ можно принять по табл. 13, однако в учебных целях покажем ход его вычисления. По табл. 1 для данного трансформатора $x_{1т}=x_{2т}=17{,}1$ мОм; $r_{1т}=r_{2т}=5{,}5$ мОм; $x_{0т}=148{,}7$ мОм; $r_{0т}=55{,}6$ мОм. Сопротивление системы $x_с=1{,}71$ мОм; $r_с\approx 0$, $R_п=15$ мОм. С учетом (23) имеем

$$z_{\Sigma}^{(1)}/3=\sqrt{(2\cdot 17{,}1+148{,}7+2\cdot 1{,}71)^2+(2\cdot 5{,}5+55{,}6+3\cdot 15)^2}/3=$$
$$=72{,}4 \text{ мОм}.$$

По формуле (22), приняв $z_п=0$, имеем $I_{кR}^{(1)}=231/72{,}4=3{,}2$ кА.

Для сравнения найдем этот ток по кривым на рис. П1, *в*. Вначале вычисляем отношение сопротивлений (прямой последовательности) системы и трансформатора: $x_с/x_т=1{,}71/17{,}1=0{,}1$. По сплошной кривой на рис. П1, *в* находим, что при этом отношении для трансформатора Y/Y мощностью 400 кВ·А, $I_{кR}^{(1)}=3{,}2$ кА, т. е. получаем тот же результат.

Определение токов к. з. по расчетным кривым. В приложении приведены расчетные кривые, по которым можно найти значения токов к. з. на шинах КТП (рис. П1) и в сети 0,4 кВ (рис. П2—П10) после трансформаторов напряжением 6(10)/0,4 кВ, мощностью 1600 кВ·А ($u_к=5{,}5$ %), 1000 кВ·А ($u_к=5{,}5$ %), 630 кВ·А ($u_к=5{,}5$ %) и 400 кВ·А ($u_к=4{,}5$ %) в зависимости от соотношения сопротивлений питающей системы и трансформатора, длины, конструкции и сечения кабелей 0,4 кВ с учетом и без учета токоограничивающего действия дуги в месте повреждения. Кривые на рис. П1—П10 построены по приведенным выше выражениям с использованием данных, приведенных выше в таблицах. Штриховыми линиями показаны токи металлического к. з., сплошными — с учетом переходных сопротивлений, равных 15 мОм. Активное сопротивление энергосистемы и сопротивление шин 0,4 кВ не учитывалось. Все кривые даны для кабелей с алюминиевыми жилами. Для нахождения тока к. з. за кабелем с медными жилами по этим кривым необходимо уменьшить его расчетную длину в 1,7 раза.

Для пользования кривыми предварительно необходимо определить соотношение сопротивлений питающей системы и трансформатора: индуктивных $x_с/x_т$ или полных $z_с/z_т$, последнее — при значительном активном сопротивлении системы (например, наличии протяженных воздушных или кабельных линий 6 или 10 кВ).

Если кабель питает сборку, а от сборки питается двигатель через кабель другого сечения, то ток к. з. на зажимах двигателя можно определить, пользуясь этими же кривыми по условной расчетной длине кабеля, имеющего такое же сечение, как кабель питания двигателя:

$$l_р = l_{к.дв} + l_{к.сб}\frac{s_{к.дв}}{s_{к.сб}} \qquad (24)$$

где $l_{к.дв}$ — длина кабеля, питающего двигатель; $l_{к.сб}$ — длина кабеля, питающего сборку; $s_{к.дв}$ и $s_{к.сб}$ — соответствующие сечения кабелей.

Можно найти ток к. з. без вычисления $l_р$ непосредственно по графику, как показано на рис. П2, *а*. Сначала находится ток к. з. в конце кабеля, питающего сборку (точка *А*). Через точку *А* проводится горизонтальная прямая до пересечения с кривой, соответствующей сечению питающего двигатель кабеля (точка *Б*). Прибавив к координате $l_Б$ длину питающего двигатель кабеля $l_{к.дв}$, по кривой, соответствующей сечению этого кабеля, находим ток к. з. на зажимах двигателя (точка *С*).

Если напряжение к. з. или мощность установленного трансформатора отличается от принятых при построении кривых, то следует подобрать ближайший трансформатор, исходя из равенства их сопротивлений. Например, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А $u_к = 8$ %, $z_т = 0{,}013$ Ом (0,4 кВ). Следовательно, можно пользоваться графиками для трансформатора 630 кВ·А, $u_к = 5{,}5$ %, имеющего $z_т = 0{,}014$ Ом.

Кривые токов однофазных к. з. построены для соотношения сопротивления (прямой последовательности) системы и трансформатора $x_с/x_т = 0{,}1$. Стрелками обозначена область, в которой можно по этим кривым находить токи при $x_с \leqslant 2x_т$, при этом погрешность в определении тока к. з. не превосходит 15 % при малых длинах и больших сечениях кабелей и 5 % — для больших длин или малых сечений кабелей.

Приближенные значения токов однофазных к. з. для трехжильных кабелей с алюминиевой оболочкой можно находить по кривым для четырехжильных кабелей с алюминиевой оболочкой, при этом полученное по кривым значение тока следует уменьшить на 15 % для больших и на 5 % для малых сечений кабелей.

Если при определении токов однофазных к. з. при совпадении сечений фазных жил сечение нулевой жилы кабеля меньше приведенного на графиках, то ток к. з. следует находить для кабеля, имеющего меньшее сечение нулевой жилы, независимо от сечений фазных жил. При этом погрешность в нахождении тока будет наименьшей и идет в запас расчета чувствительности защиты.

Расчет токов к. з. при питании аварийных генераторов. Аварийные генераторы предназначены для электроснабжения при потере основных источников питания и обычно имеют небольшую мощность. Они подключаются либо непосредственно к шинам 0,4 кВ, либо через понижающие трансформаторы 6/0,4 кВ. Расчет токов к. з. выполняется только с целью выбора уставок и проверки чувствительности и селективности действия защит, так как по отключающей способности аппаратура рассчитана на работу от более мощных основных источников питания.

В зависимости от расчетных условий максимальным может оказаться ток однофазного или трехфазного к. з., минимальным — ток трех-, двух- или однофазного к. з. Например, ток однофазного к. з. может оказаться максимальным (по сравнению с другими видами к. з.) на зажимах генератора и минимальным — в удаленных точках сети.

Расчет токов при междуфазных к. з. При близких к. з. в генераторе возникает переходный процесс, сопровождающийся изменением во времени периодической составляющей тока. С удалением точки к. з. от генератора это явление становится незаметным (как при питании от энергосистемы). Электрическую удаленность однозначно характеризует расчетное результирующее сопротивление цепи до точки к. з. в относительных единицах $z_{*р}$, приведенное к суммарной мощности параллельно работающих генераторов

$$z_{*р} = z_Σ \frac{S_{н.гΣ}}{U^2_{ср}}, \qquad (25)$$

где $z_Σ$ — суммарное сопротивление всех элементов цепи к. з., включая генераторы, мОм; $S_{н.гΣ}$ — суммарная мощность параллельно работающих генераторов, кВ·А; $U_{ср}$ — среднее напряжение той ступени, к которой отнесено $z_Σ$, В.

Обобщенные кривые зависимости периодической составляющей тока к. з., отнесенной к номинальному току генератора $I_{к*t} = I_{кt}/I_{н.г}$, от расчетного сопротивления

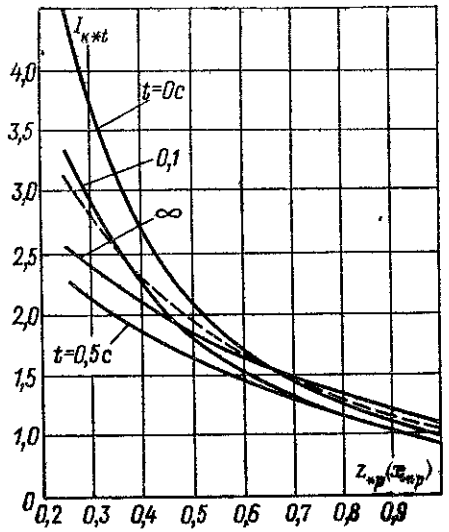


Рис. 7. Расчетные кривые изменения токов к. з. для генераторов малой мощности с АРВ (сплошные линии—трехфазное к. з., штриховая—двухфазное при $t=\infty$, время t — в секундах)

$z_{*р}$ ($x_{*р}$) и времени от начала к. з. t для маломощных генераторов приведены на рис. 7. Кривые учитывают действие при к. з. устройств автоматического регулирования (АРВ) и форсировки (ФВ) возбуждения генераторов. Эти устройства должны быть постоянно в работе.

Сопротивление $z_{*р}=0{,}65$ называется критическим.

Если $z_{*р}<0{,}65$, то электрическая удаленность к. з. считается небольшой. Такое соотношение характерно для к. з. на зажимах генераторов, шинах КТП и основных сборках 0,4 кВ.

Упрощенную картину процессов, происходящих при к. з. в этих точках, рассмотрим на примере внезапного трехфазного к. з. В начальный момент к. з. индуктивное сопротивление генератора резко уменьшается до сверхпереходного (начального) значения x''_d, а затем постепенно увеличивается до переходного x'_d и, наконец, до установившегося x_d. Это вызвано соответствующим изменением магнитных потоков в генераторе. Наряду с этим при снижении напряжения (вследствие к. з.) вступают в действие устройства АРВ и ФВ генератора, которые стремятся восстановить напряжение на его зажимах увеличением тока возбуждения и, следовательно, ЭДС.

Однако вследствие небольшой электрической удаленности к. з. устройства АРВ и ФВ не могут восстановить напряжение на зажимах генератора до номинального, несмотря на увеличение тока возбуждения до предельного. На изменение тока к. з. во времени больше влияет увеличение сопротивления генератора, чем увеличение его ЭДС. Происходит снижение (затухание) тока к. з. с течением времени от сверхпереходного (начального) $I_{к0}$ ($t=0$) до установившегося $I_{к\infty}$ ($t=\infty$).

Например, при к. з. в точке, соответствующей $z_{*р}=0{,}3$, ток к. з. $I^{(3)}_{к*0}=3{,}7$; $I^{(3)}_{к*0{,}5}=2{,}12$; $I^{(3)}_{к*\infty}=2{,}35$ (рис. 7). Заметим, что вследствие инерционности устройств АРВ и ФВ они не влияют на начальное значение тока, их действие будет заметно спустя примерно 0,2 с после начала к. з. и особенно — в установившемся режиме к. з. Поэтому при к. з. в рассмотренной точке значение тока при $t=\infty$ несколько больше, чем при $t=0{,}5$ с.

Минимальным значением тока оказывается установившийся ток трехфазного к. з. — его значение всегда меньше установившегося тока двухфазного к. з., а при к. з. на зажимах генератора — меньше тока однофазного к. з. Это объясняется тем, что индуктивные сопротивления генератора обратной x_2 и нулевой x_0 последовательностей, которые учитывают при расчете несимметричных к. з., не изменяются в процессе к. з., а по значению они значительно меньше индуктивного сопротивления генератора прямой последовательности в установившемся режиме x_d.

Кривые изменения токов при трехфазных к. з. на рис 7 взяты из работы [7]. Кривая токов при двухфазном к. з. при $t=\infty$ и всех значениях $z_{*р}$ располагается между кривыми токов трехфазных к. з. $I^{(3)}_{к*0}$ и $I^{(3)}_{к*\infty}$. Ее можно получить, воспользовавшись кривыми для трехфазных к. з., правилом эквивалентности прямой последовательности [18] и известным выражением

$$I^{(n)}_{к}=m^{(n)}\,I^{(n)}_{к_1},$$

где $I^{(n)}_{к}$ — ток любого (n) несимметричного к. з.; $m^{(n)}$ — коэффициент, соответствующий этому виду к. з., для двухфазного к. з. $m^{(n)}=m^{(2)}=\sqrt{3}$; $I^{(n)}_{к1}$ — соответствующий ток прямой последовательности.

Например, в точке сети, для которой $z_{*р}=0{,}3$, относительные значения токов трехфазного к. з. $I^{(3)}_{к*0}=3{,}7$; $I^{(3)}_{к*\infty}=2{,}35$. При двухфазном к. з. в той же точке расчетное сопротивление слагается из

суммы сопротивлений прямой и обратной последовательности, и составит $z_{*р}=0{,}3+0{,}3=0{,}6$. По кривым трехфазных к. з. для $t=\infty$ $z_{*р}=0{,}6$ соответствует относительное значение тока прямой последовательности $I^{(2)}_{к*1\infty}=1{,}65$, таким образом, относительное значение установившегося тока двухфазного к. з. составляет $I^{(2)}_{к_*\infty}=\sqrt{3}\cdot 1{,}65=2{,}85$.

В точке сети, для которой $z_{*р}=0{,}65$, имеем $I^{(3)}_{к0}\approx I^{(3)}_{к\infty}\approx I^{(2)}_{к\infty}$, если же $z_{*р}>0{,}65$, то $I^{(3)}_{к0}<I^{(2)}_{к\infty}<I^{(3)}_{к\infty}$.

Установившийся режим для маломощных генераторов может наступить менее чем за 0,5—1 с. Это время соизмеримо с временем действия максимальных токовых защит генератора и прилегающей сети 0,4 кВ, к моменту срабатывания выходных реле которых ток к. з. становится равным установившемуся. Поэтому для предотвращения отказов чувствительность действующих с выдержкой времени защит, в зоне действия которых расчетное сопротивление до места повреждения $z_{*р}<0{,}65$, должна проверяться по установившемуся току трехфазного к. з. $I^{(3)}_{к\infty}$.

Если $z_{*р}\geqslant 0{,}65$, то к. з. считается удаленным. Обычно это соотношение соответствует к. з. на зажимах отдаленных электроприемников, при питании длинными кабелями с большим сопротивлением. В этих случаях АРВ и ФВ способны восстановить напряжение на зажимах генератора до номинального (при очень удаленных к. з. вообще не вступают в работу), а изменение сопротивления генератора в процессе к. з. почти не влияет на значение тока к. з. Установившийся ток трехфазного к. з. оказывается равным или несколько большим сверхпереходного (см. рис. 7). Ввиду небольшого различия этих токов можно находить только ток $I^{(3)}_{к0}$, принимая с целью упрощения $I^{(3)}_{к0}\approx I^{(3)}_{к\infty}$ и $I^{(2)}_{к0}\approx I^{(2)}_{к\infty}\approx 0{,}867\, I^{(3)}_{к0}$. Таким образом, при к. з. в этих точках чувствительность защит от междуфазных к. з., действующих с выдержкой времени, можно проверять при начальном токе двухфазного к. з. $I^{(2)}_{к0}=0{,}867\, I^{(3)}_{к0}$.

Для защит, действующих без выдержки времени, чувствительность при междуфазных к. з. проверяется при токе $I^{(2)}_{к0}=0{,}867\, I^{(3)}_{к0}$ независимо от электрической удаленности точки к. з.

Таким образом, для расчетов защит следует определить значения токов $I^{(3)}_{к0}$ и $I^{(2)}_{к0}$ (при $t=0$), а для защит, имеющих выдержку времени и действующих в зоне $z_{*р}<0{,}65$, — дополнительно и значение тока $I^{(3)}_{к\infty}$ (при $t=\infty$). Для других моментов времени токи к. з. определять не требуется.

Ток к. з. $I^{(3)}_{кt}$ (в килоамперах) для момента времени t определяется по выражению

$$I^{(3)}_{кt}=\frac{E_t}{\sqrt{3}z_\Sigma}=\frac{E_t}{\sqrt{3}\sqrt{x_\Sigma^2+(r_\Sigma+R_п)^2}}, \qquad (26)$$

где E_t — линейная ЭДС генератора для момента времени t, В; x_Σ и r_Σ — результирующее индуктивное и активное сопротивление цепи к. з. соответственно, включая сопротивление генератора, мОм; $R_п$ — переходное сопротивление в месте к. з., учитывается только при расчета в сети 0,4 кВ, мОм.

Для момента времени $t=0$ ЭДС нагруженного генератора $E_0=U_{н.г}(1+x''_d\sin\varphi_{н.г})$; при $\cos\varphi_{н.г}=0{,}8$ имеем $\varphi_{н.г}=37°$ и $\sin\varphi_{н.г}=0{,}6$, тогда $E_0=U_{н.г}(1+x''_d 0{,}6)$. Учитывая, что номинальное напряжение генератора на 5 % выше номинального напряжения сети, а также, что к. з. может возникнуть и при ненагруженном генераторе, обычно можно принять $E_0\approx(1\div 1{,}05)\,U_{н.г}$.

Индуктивное сопротивление генератора (в миллиомах) для момента $t=0$ определяется по выражению

$$x_г=x''_d U^2_{н.г}/S_{н.г}, \qquad (27)$$

где $S_{н.г}=P_{н.г}/\cos\varphi_{н.г}$ — номинальная полная мощность генератора, кВ·А; x''_d — сверхпереходная реактивность генератора в относительных единицах; $U_{н.г}$ — номинальное напряжение генератора, В.

Параметры генераторов приведены в табл. 14.

Сопротивление понижающего трансформатора и кабелей 0,4 кВ вычисляют по выражениям (3) и (6). При наличии трансформатора в цепи к. з. все сопротивления приводят к одному базисному напряжению по выражению (1). В данном случае за базисное принимается напряжение 0,4 кВ, где находится большинство расчетных точек к. з. Переходные сопротивления принимают $R_п=15$ мОм. Далее вычисляют результирующие сопротивления x_Σ и r_Σ, находят полное результирующее сопротивление цепи к. з. z_Σ, а по формуле (26) — начальный ток трехфазного к. з. $I^{(3)}_{к0}$.

Таблица 14. **Параметры маломощных генераторов**

Параметры	Для генератора типа					
	ГСД-17-08-8	СГД-15-41-16	СГС-14-100-6	СГДМ-11-46-4	СГДМ-12-42-4	СГД-16-63
$P_{н.г}$, кВт	1000	630	2500	500	630	3500
$U_{н.г}$, кВ	6,3	6,3	6,3	0,4	0,4	6,3
$I_{н.г}$, А	115	72	287	903	1138	404
$n_н$, об/мин	750	375	1000	1500	1500	1000
$\cos\varphi_{н.г}$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ОКЗ	1,15*	1,1	0,8	0,6*	0,63*	—
КПД, %	94,56	93	95	94	—	96
x''_d, о. е.	0,192*	0,18	0,16	0,14*	0,167*	0,17
x'_d, о. е.	0,282	0,281	—	0,191*	0,214*	0,21
x_d, о. е.	1,018	1,172	—	1,92*	1,9*	0,82
x_2, о. е.	0,171*	—	—	0,15*	0,174*	—
x_0, о. е.	0,0763*	—	—	0,047*	0,054	—
$r_{ст}$, мОм**	—	—	—	2,8	2,18	—
$I_{*в.пред}$, о. е.	—	—	—	9*	10*	—

* Опытные данные. $I_{*в.пред}$ указано для системы самовозбуждения.

** Активное сопротивление фазы статора при температуре 15 °С.

Для момента времени $t=\infty$ ЭДС и сопротивление генератора будут уже другими, они зависят от удаленности к. з. Для расчетов используют так называемый метод спрямленных характеристик [18, 19].

Вначале определяют уточненное значение критического сопротивления

$$z_{кр} \approx \frac{x_{г\infty} U_{г.н}}{E_{г\infty} - U_{г.н}}. \qquad (28)$$

В этом выражении сопротивление генератора $x_{г\infty}$ принимают равным величине, обратной относительному короткого замыкания ОКЗ (ОКЗ — отношение установившегося тока к. з. на зажимах генератора при токе возбуждения холостого хода к номинальному току генератора). Аналогично формуле (27) $x_{г\infty}$ (в миллиомах) равно

$$x_{г\infty} = U^2_{н.г} / (ОКЗ S_{н.г}). \qquad (29)$$

ЭДС генератора $E_{г\infty}$ (в вольтах) принимают увеличенной пропорционально относительному предельному току возбуждения $I_{*в.пред}$ (отношение тока возбуждения при форсировке к току возбуждения холостого хода генератора):

$$E_{г\infty} = U_{г.н} I_{*в.пред}. \qquad (30)$$

Если внешнее сопротивление участка от зажимов генератора до точки к. з. $z_{вн} < z_{кр}$ (близкое к. з.), то имеет место режим предельного возбуждения, и значение тока к. з. $I^{(3)}_{к\infty}$ определяют по формуле (26), где принимают $E_t = E_{г\infty}$ и $x_т = x_{г\infty}$.

Если внешнее сопротивление до точки к. з. $z_{вн} \geqslant z_{кр}$ (удаленное к. з.), то имеет место режим нормального напряжения и значение тока $I^{(3)}_{к\infty}$ определяют по формуле (26), где принимают $E_t = U_{н.г}$, а $x_г = 0$. Обычно при к. з. в этих точках значение $I^{(3)}_{к\infty}$ не рассчитывают, принимая $I^{(3)}_{к\infty} \approx I^{(3)}_{к0}$ (кроме особых случаев, например проверки чувствительности пусковых органов напряжения). При этом учитывают, что возможное увеличение тока $I^{(3)}_{к\infty}$ по сравнению с $I^{(3)}_{к0}$ (оно не превышает 10—20 %) идет в запас чувствительности максимальных токовых защит, а также компенсирует влияние другой подключенной к генератору нагрузки, сопротивление которой шунтирует к. з., несколько уменьшая ток в месте повреждения и увеличивая ток генератора [18, 19].

При отсутствии паспортных значений $I_{*в.пред}$ и ОКЗ их рекомендуется определять опытным путем [19].

Для приближенных расчетов можно использовать метод расчетных кривых [7, 18], позволяющий определять относительное значение тока к. з. для любого момента времени в зависимости от расчетного сопротивления $z_{*р}$. Для этого по приведенным выше выражениям определяют $z_Σ$, а затем по выражению (25) — расчетное сопротивление до точки к. з. $z_{*р}$ в относительных единицах. По расчетным кривым на рис. 7 и значению $z_{*р}$ находят относительные значения тока к. з. $I_{к*t}$ для соответствующего момента времени. Значение тока трехфазного к. з. для этого момента времени определяют по выражению

$$I^{(3)}_{кt} = I_{к*t} I_{нΣ}, \qquad (31)$$

где $I_{нΣ} = S_{н.гΣ} / (\sqrt{3} U_{ср})$ — суммарный номинальный ток работающих генераторов, приведенный к напряже-

нию $U_{ср}$ ступени, где рассматривается к. з., т. е. к напряжению 0,4 кВ.

Расчетные кривые на рис. 7 учитывают шунтирующее влияние нагрузки, подключеиной к генераторным шинам. Следует иметь в виду, что этот метод можно нспользовать, если относнтельный предельный ток возбуждения не превышает 3—4, при бо́льших значениях он может дать существениую погрешность вычислений установнвшихся токов к. з. (см. далее пример 3).

При расчетах токов к. з. в сетн 0,4 кВ, питающейся от генераторов мощностью менее 400 кВт, переходные сопротивления $R_п$ можно не учитывать, в этом случае оин почти не влияют на значения токов к. з.

При питании от генераторов напряжением 6(10) кВ через понижающне трансформаторы 6(10)/0,4 кВ расчетные кривые на рнс. П1, *а*, П2—П4 для определения токов трехфазиых к. з. можно использовать лишь при $z_{*р} \geqslant 0{,}65$. Отиошеине $x_с/x_т$ определяют, как указаио ранее, но при этом $x_с$ заменяют на $x_г$, вычнсленное по формуле (27) и приведенное к напряжению 0,4 кВ.

Пример 3. Определить сверхпереходный и установившийся токи к. з. с учетом переходиых сопротивлений $R_п=15$ мОм за кабелем $3\times95\times1\times50$ длиной 100 м с алюминиевымн жилами при питании от генератора, нмеющего следующие данные: $P_{н\,г}=630$ кВт; $S_{н\,г}=787$ кВ·А; $U_{н.г}=0{,}4$ кВ; $I_{в.г}=1138$ А; $x''_d=0{,}16$ о.е.; ОКЗ=0,63; $I_{*в\ пред}=10$; $r_г \approx 0$.

Р е ш е н и е. Индуктивное сопротивление генератора по формуле (27) $x_г=0{,}16\cdot400^2/787=32{,}5$ мОм. Сопротивление кабеля по формуле (6) $x_к=0{,}057\cdot100=5{,}7$ мОм; $r_к=0{,}405\cdot100=40{,}5$ мОм. Результирующее сопротивление до точки к. з. $z_Σ=\sqrt{(32{,}5+5{,}7)^2+(40{,}5+15)^2}=67{,}4$ мОм. Ток к. з. при $t=0$ по формуле (26) $I^{(3)}_{к0R}=1{,}05\cdot400/(\sqrt{3}\cdot67{,}4)=3{,}6$ кА

Ток к. з. при $t=\infty$ определяем методом спрямленных характеристнк. Внешнее сопротивление $z_{вн}=\sqrt{5{,}7^2+(40{,}5+15)^2}=55{,}8$ мОм Сопротивление и ЭДС генератора по формулам (29) и (30) $x_{г\infty}=400^2/(0{,}63\cdot787)=322{,}7$ мОм; $E_{г\infty}=400\cdot10=4000$ В. Критическое сопротивление по формуле (28) $z_{кр}\approx322{,}7\cdot400/(4000-400)=35{,}9$ мОм. Поскольку $z_{вн}>z_{кр}$, то имеем режим нормального напряжения. Принимая в формуле (26) $E_t=U_{н.г}$, $x_г=0$, имеем $I^{(3)}_{к\infty R}=400/(\sqrt{3}\cdot55{,}8)=4{,}14$ кА. Однако из-за шунтирующего влияния нагрузки значение тока к. з. будет несколько меньше, поэтому можно прннять $I^{(3)}_{к\infty R}\approx I^{(3)}_{к0R}=3{,}6$ кА.

Вычислим значения тока к. з. по методу расчетных кривых Расчетное сопротивление по формуле (25) $z_{*р}=67{,}4\cdot787/400^2=0{,}33$ По кривым на рнс. 7 находим относительные значения тока к. з. $I_{к*0}=3{,}2$; $I_{к*\infty}=2{,}25$. Токи к. з. по формуле (31): $I^{(3)}_{к0R}=3{,}2\cdot1{,}138=3{,}6$ кА; $I^{(3)}_{к\infty R}=2{,}25\cdot1{,}138=2{,}6$ кА, что значительно меньше рассчитанного ранее.

Очевидно, что для генератора, имеющего $I_{*в.пред}=10$, определение установившегося тока к. з. по расчетным кривым на рис. 7 недопустнмо, и ими пользоваться не следует. Если бы генератор имел, например, $I_{*в\ пред}=4$, то $E_{г\infty}=1600$ В; $z_{кр}=107{,}6$ мОм; $z_{вн}<z_{кр}$ (режим предельного возбуждения) и $I^{(3)}_{к\infty R}=1600/[\sqrt{3}\sqrt{(322{,}7+5{,}7)^2+(40{,}5+15)^2}]=2{,}77$ кА, что близко к значению, определенному по расчетным кривым.

Расчет токов однофазных к. з. Однофазные к. з. в сетн 0,4 кВ при пнтании от генераторов характернзуются большой электрической удаленностью, поэтому обычно можно не счнтаться с изменением тока во временн.

Ток одиофазного к. з. при питанин от генераторов иапряжением 6,3 кВ можно определить по выраженням (22) и (23), нли по кривым на рис. П1, *б, в*, П5—П10 приложения, прн этом сопротивление системы заменяется сопротивленнем генератора, определенным по формуле (27) и прнведенным к иапряжеиию 0,4 кВ.

Ток однофазиого к. з. (в килоамперах) при питанни от генератора напряжением 0,4 кВ с глухозаземлениой иейтралью можно определнть по выражениям:

$$I^{(1)}_{кR}=\frac{U_ф}{\frac{z^{(1)}_{Σг}}{3}+z_{пт}};\qquad z^{(1)}_{Σг}=\sqrt{(r_{1г}+r_{2г}+r_{0г}+3R_п)^2+(x_{1г}+x_{2г}+x_{0г})^2}, \tag{32}$$

где $U_ф$ — фазное напряженне, В; $r_{1г}$, $x_{1г}$ — актнвное и индуктивное сопротнвлення геиератора токам прямой последовательности, мОм; $r_{2г}$, $x_{2г}$ — то же обратиой последовательностн; $r_{0г}$, $x_{0г}$ — то же иулевой последовательности; $z_{пт}$ — сопротнвлеиие петли фаза — нуль от генератора до места к. з., мОм.

Активиое сопротивление фазы статора геиератора с глухозаземленной нейтралью $r_{ст}=r_{1г}=r_{2г}=r_{0г}$.

Выражение (32) удобно тем, что позволяет нспользовать практические нзмеренія н справочные данные по сопротивлению петли фаза—нуль.

При однофазном к. з. непосредственно иа зажимах генератора возможно некоторое умеиьшение тока с тече-

нием временн, однако оно мало сказывается на чувствительностн защиты, так как компенснруется запасами в коэффнциентах чувствнтельности н возврата защнты (защита возвращается прн меньшем токе, чем срабатывает).

Пример 4 Определить ток однофазного к. з. иа зажимах генератора н за кабелем для условий примера 3. Дополнительные параметры генератора: $x_2=0{,}171$ о. е.; $x_0=0{,}054$ о. е. Кабель нмеет непроводящую оболочку.

Решение. Индуктивное сопротивление генератора токам прямой, обратной и нулевой последовательностей по формуле (27): $x_{1г}=0{,}16\cdot400^2/787=32{,}5$ мОм; $x_{2г}=0{,}171\cdot400^2/787=34{,}8$ мОм; $x_{0г}=0{,}054\cdot400^2/787=11$ мОм; $r_{1г}=r_{2г}=r_{0г}=2{,}18$ мОм. По формуле (32) нмеем $z^{(1)}_{\Sigma г}=\sqrt{(3\cdot2{,}18+3\cdot15)^2+(32{,}5+34{,}8+11)^2}=93{,}7$ мОм. Сопротивление петли фаза — нуль кабеля по формуле (21) $z_{пт}=1{,}13\cdot100=113$ мОм.

Ток однофазного к. з. иа зажимах генератора с учетом переходных сопротивлений по формуле (32)

$$I^{(1)}_{кR}=\frac{400}{\sqrt{3}\,(93{,}7/3)}=7{,}4\text{ кА}.$$

Для металлического к. з. ($R_п=0$) $z^{(1)}_{\Sigma г}=78{,}6$ мОм и $I^{(1)}_к=8{,}8$ кА.

Ток однофазного к. з. за кабелем с учетом переходных сопротивлений $I^{(1)}_{кR}=\dfrac{400}{\sqrt{3}\left(\dfrac{93{,}7}{3}+113\right)}=1{,}6$ кА и для металлнческого к. з. $I^{(1)}_к=\dfrac{400}{\sqrt{3}\left(\dfrac{78{,}6}{3}+113\right)}=1{,}66$ кА почти одинаковы.

3. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ АППАРАТУРЫ, ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ

В сетн 0,4 кВ выбор коммутацнонной аппаратуры, защит н кабелей взанмосвязан. Для любого прнсоединеиия должны быть обеспечены:

1. Нормальный режнм работы. Номннальные напряжения и токи аппаратов н допустнмые токи кабелей должны соответствовать номннальному напряжеиию и длительному расчетному току нагрузкн. Исполнение аппаратов и типы кабелей должны соответствовать условиям их эксплуатацин.

2. Стойкость при к. з. Аппараты н кабелн должны быть стойкимн при к. з., а аппараты защнты — надежно отключать расчетные токн к. з.

3. Защита от всех видов к. з. Параметры аппаратов защиты и кабелей должны обеспечнвать достаточную чувствительность защнты ко всем вндам к. з. в конце защищаемой зоиы. Рекомендуется применять автоматические выключатели с комбннированным расцепителем, элемент с зависимой характеристикой которого является резервной защитой. Должны обеспечнваться селективность (отключенне только поврежденного участка), надежность (срабатывание прн появлеиии условнй на срабатываиие и несрабатыванне при нх отсутствни), быстродействне защиты. Быстрое отключение к. з. обеспечивает стойкость аппаратов н кабелей к термическому действию токов к. з., снижает длительность перерывов пнтання электропрнеминков, облегчает последующнй самозапуск электродвнгателей, обеспечнвает безопасность обслуживающего персонала, предотвращает возможность нарушення снихронной параллельной работы маломощных аварийных генераторов, а также синхронных электродвигателей.

4. Защнта от ненормальных режимов — длительной перегрузкн электродвигателей, подверженных перегрузкам по техиологическим прнчниам, а также проводов и кабелей в случаях, предусмотренных Правнламн [13]. При нуске и самозапуске электродвигателей аппараты защнты не должны отключать цепь, а сечение кабелей должно обеспечнвать достаточный для разворота электродвнгателей уровень иапряжения на их зажимах.

Кроме того, набор аппаратуры и ее конструктивное исполненне в цепн любого прнсоединення должны обеспечивать возможность вывода в ремонт присоединения или аппарата защиты без остановки основного технологнческого процесса.

Выбор аппаратуры, защнты и кабелей данного присоедннения выполняют в следующем порядке.

Определяют нагрузки присоединеиня, место подключеиия, составляют предварительную схему присоедннення и ближайшего участка питающей сети.

Предварнтельно выбирают сеченне кабеля присоедн нения по условням нагрева в нормальном режнме, проверяют его достаточность по условиям потери напряжеиия в иормальном режнме н прн пуске электродвигателей, рассчнтывают токн к. з.

Предварнтельно выбнрают тнп и номннальные параметры защнтного аппарата присоедниеиня по условиям

нормальиого режима, стойкости и селективности при к. з.

Рассчитывают уставки защиты, по результатам расчета уточняют тнп и номинальные параметры аппарата защиты. Проверяют чувствительность защиты. При недостаточной чувствительности осуществляют специальные описаиные в последующих главах мероприятия, после которых может изменнться сеченне нли конструкция кабеля, схема присоединения, иоминальный ток автоматического выключателя. При этом все расчеты выполняются заново.

Если присоединение предиазначено для защиты сборкн, то проверяют стойкость прн к. з. аппаратов, установленных на этой сборке.

Проверяют защиту электродвигателя н кабеля от перегрузкн (ири иеобходнмости) с возможным уточненнем уставок защиты или сечения кабеля.

Проверяют селектнвность защиты с выше- и нижестоящими защнтными аппаратами с помощью построения карты селектнвностн.

4. ВЫБОР СЕЧЕНИЙ И ДЛИН КАБЕЛЕЙ

Условия выбора сечений и длни кабелей. Выбор сечений и длин кабелей выполияется по рассматриваемым ннже условням. Окоичательно принимаются те параметры кабеля, которые удовлетворяют всем этим условиям.

Условие допустимого нагрева. В иормальиом режиме иагрев кабеля ие должен превышать допустимого. Для этого выбор сечения кабелей пронзводят по таблицам ПУЭ [13], в которых приводятся значения сечений и соответствующие им допустимые длнтельные токи иагрузки для кабелей разлнчных конструкций. Значения допустнмых длнтельных токов указаны для определениых (иормальных) условнй работы кабелей и их прокладки. Прн отклонеини от этнх условий значеиия допустимых длнтельных токов, приведеиные в таблицах, должиы быть умножены иа приводнмые в ПУЭ поправочные коэффициеиты, учнтывающие характер нагрузкн (при повторнократковременном и кратковремением режиме работы электропрнемиików), отклонение температуры окружающей кабель среды от расчетной, количество совместно проложенных кабелей и тепловые характеристики грунта, в котором проложеи кабель.

Условия обеспечения нормального напряжения на зажимах электродвигателей и других электроприемников. В нормальиом режнме сечение н длина кабеля должны обеспечивать отклонение напряжения на зажимах электродвнгателей ие более $\pm 0{,}05\,U_{н.дв}$. Падение напряжеиия в кабеле определяется по выражению

$$\Delta U = 10^{-3}\sqrt{3}\,I\,(r_{уд}\cos\varphi + x_{уд}\sin\varphi), \qquad (33)$$

где I — ток иагрузки, А; φ — угол иагрузки, ...°; остальные обозначения такие же, как в выражеиии (6).

Поскольку иа шннах 0,4 кВ должно поддерживаться напряжение $1{,}05\,U_{н.дв}$ (т. е. 400 В), то при напряжеиии на зажимах электродвнгателя 0,95 % $U_{н.дв} = 0{,}95 \cdot 380 = 361$ В общее паденне напряжения в сетн может составить 10 %. Учнтывая это обстоятельство, из выражеиня (33) можно найтн предельиую длину кабеля для любого конкретиого случая или уточнить его сеченне.

Условия пуска электродвигателя. Сечение и длина кабеля должны обеспечивать нормальиый пуск электродвигателей. Пусковые токн создают увеличенную по сравкению с нормальным режимом потерю напряжения в питающем кабеле, в результате чего иапряженне на зажимах двигателя снижается. Возможность разворота двигателя определяется значением остаточиого напряжения $U_{ост}$ на его зажимах. Считается, что пуск электродвигателей механизмов с веитнляторным моментом сопротивления и легкимн условнями пуска (длительность пуска 0,5—2 с) обеспечнвается при

$$U_{ост} \geqslant 0{,}7U_{н.дв}. \qquad (34)$$

Это условие выполияется, если (что удобно для практнческой проверкн) $I^{(3)}_{к.мин}/I_{пуск.дв} \geqslant 2$, где $I^{(3)}_{к.мин}$ — ток трехфазного металлического к. з. на зажимах электродвигателя прн миннмальном режнме работы питающей системы; $I_{пуск.дв}$ — пусковой ток электродвнгателя (каталожное значение).

Пуск электродвнгателей механизмов с постояиным моментом сопротивления нли тяжелыми условиями пуска (длительиость пуска 5—10 с) обеспечивается при

$$U_{ост} \geqslant 0{,}8U_{н.дв}. \qquad (35)$$

Это условие выполняется, если (что удобно для практической проверки) $I^{(3)}_{к.мин}/I_{пуск.дв} \geqslant 3{,}5$.

Условия работы при к. з. Кабели должны обладать

Таблица 15. **Постоянная C для кабелей [16]**

Изоляция и конструкция кабеля	Материал жилы	Постоянная C, $А \cdot с^{0,5}/мм^2$
Кабели со сплошными жилами и бумажной пропитанной изоляцией	алюминий	92
	медь	140
Кабели с многопроволочными жилами и бумажной пропитанной изоляцией	алюминий	98
	медь	147
Кабели с поливинилхлоридной изоляцией	алюминий	75
	медь	114
Кабели с полиэтиленовой изоляцией	алюминий	62
	медь	94

Примечание. Ввиду отсутствия точных данных при напряжении 0,4 кВ значения постоянной C приняты такими же, как при напряжении 6 кВ.

достаточной термической стойкостью при к. з. в начале кабеля, что обеспечивается как быстродействием защит, так и соответствующим сечением кабеля. Практика эксплуатации показывает, что целесообразно выполнять соответствующую проверку термической стойкости кабелей, хотя по ПУЭ для сетей 0,4 кВ этого в настоящее время не требуется. Минимальное допустимое сечение кабелей (в квадратных миллиметрах) по этому условию составляет

$$s_{мин} = \frac{\sqrt{B_к}}{C} \cdot 1000 \approx \frac{I^{(3)}_{к.р}}{C} \cdot 1000 \sqrt{t_{откл} + T_{а.ср}}, \quad (36)$$

где C — постоянная, принимается по табл. 15, $А \cdot с^{0,5}/мм^2$; остальные обозначения такие же, как в выражении (18).

Кроме того, при построении схемы учитывают, что токи к. з. в конце кабеля 0,4 кВ значительно снижаются. Поэтому, с одной стороны, при питании сборок подбором сечения кабеля можно обеспечить уровень токов к. з., соответствующий стойкости установленных на сборках выключателей. С другой стороны, при недостаточной чувствительности защитных аппаратов сборок, электродвигателей и других электроприемников к токам к. з. в конце кабеля ее увеличение часто достигается увеличением сечения кабеля (но не более чем на 1—2 ступени), так как это приводит к увеличению тока к. з.

Обеспечение защиты кабелей от перегрузок. Защиты от перегрузки требуют все сети 0,4 кВ, выполненные проложенными открыто незащищенными изолированными проводами с горючей оболочкой внутри любых помещений; все осветительные сети независимо от конструкции и способа прокладки проводов или кабелей в жилых и общественных зданиях, в служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, в пожароопасных зонах, все сети для питания бытовых и переносных электроприборов; все силовые сети в промышленных предприятиях, в жилых и общественных помещениях, если по условиям технологического процесса может возникнуть длительная перегрузка проводов и кабелей; все сети всех видов во взрывоопасных помещениях и взрывоопасных наружных установках независимо от режима работы и назначения сети.

Например, защиту от перегрузки требуют кабели питания двигателей транспортеров, так как эти механизмы подвержены перегрузкам; не требуют защиты от перегрузки кабели питания центробежных насосов с легкими условиями пуска (установленные в невзрывоопасных помещениях), так как по технологическим причинам эти механизмы не перегружаются.

Для защиты проводников и кабелей от перегрузки должны быть обеспечены следующие соотношения между допустимым током проводника $I_{доп.пров}$ (определяется по таблицам ПУЭ) и током срабатывания защиты.

При применении выключателей только с электромагнитными расцепителями и током срабатывания отсечки $I_{с.о}$:

для проводников с поливинилхлоридной, резиновой и другой аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией внутри помещений

$$I_{с.о} \leqslant 0{,}8 I_{доп.пров}, \quad (37)$$

для невзрывоопасных производственных помещений, а также кабелей с бумажной изоляцией допускается

$$I_{с.о} \leqslant I_{доп.пров}. \quad (38)$$

При применении выключателей с нерегулируемой об-

ратно-зависимой от тока характеристикой для проводников всех марок

$$I_{\text{н.расц}} \leqslant I_{\text{доп.пров}}, \qquad (39)$$

где $I_{\text{н.расц}}$ — номинальный ток расцепителя.

При применении выключателей с регулируемой зависимой от тока характеристикой и током срабатывания защиты от перегрузки $I_{\text{с.п}}$:

для проводников с резиновой, поливинилхлоридной и аналогичной изоляцией

$$I_{\text{с.п}} \leqslant I_{\text{доп.пров}}; \qquad (40)$$

для кабелей с бумажной изоляцией или изоляцией из вулканизированного полиэтилена

$$I_{\text{с.п}} \leqslant 1{,}25 I_{\text{доп.пров}}. \qquad (41)$$

При применении предохранителей с номинальным током плавкой вставки $I_{\text{н.вс}}$:

$$I_{\text{н.вс}} \leqslant k I_{\text{доп.пров}}, \qquad (42)$$

где k — коэффициент, для проводников с резиновой, поливинилхлоридной и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией, прокладываемых внутри помещений, принимается равным 0,8. Для всех проводников, прокладываемых в невзрывоопасных производственных помещениях, а также для кабелей с бумажной изоляцией в любых помещениях $k = 1$.

5. ВЫБОР АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Параметры и характеристики, по которым выбирают автоматические выключатели. Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для автоматического отключения электрических цепей при к. з. или ненормальных режимах (перегрузках, исчезновении или снижении напряжения), а также для нечастого включения и отключения токов нагрузки. Отключение выключателя при перегрузках и к. з. выполняется встроенным в выключатель автоматическим устройством, которое называется максимальным расцепителем тока, или сокращенно — расцепителем. Выключатели по заказу могут поставляться со следующими дополнительными устройствами: нулевым или минимальным расцепителем, отключающим выключатель при снижении напряжения соответственно до

(0,1—0,35) $U_{\text{н}}$ и до (0,35—0,7) $U_{\text{н}}$ (напряжение срабатывания не регулируется); независимым расцепителем (электромагнитом отключения) для дистанционного отключения выключателя; электродвигательным или электромеханическим приводом для дистанционного управления выключателем; свободными вспомогательными контактами, а выключатели серии ВА — также сигнальными контактами автоматического отключения; выдвижным устройством с вставными контактами главных и вспомогательных цепей — для выключателей выдвижного исполнения.

Различают нетокоограничивающие и токоограничивающие выключатели.

Нетокоограничивающие выключатели не ограничивают ток к. з. в цепи, и он достигает максимального ожидаемого значения.

Токоограничивающие выключатели ограничивают значение тока к. з. с помощью быстрого введения в цепь дополнительного сопротивления электрической дуги (в первый же полупериод, до того, как ток к. з. значительно возрастет) и последующего быстрого отключения к. з., при этом ток к. з. не достигает ожидаемого расчетного максимального значения. Токоограничение начинается с некоторого значения тока, определяемого характеристикой токоограничения. Например, в токоограничивающих автоматических выключателях серий А3700Б при больших ожидаемых токах к. з. контакты, имеющие специальную конструкцию, сразу же отбрасываются электродинамическими силами, вводя в цепь сопротивление дуги, и затем уже не соприкасаются, так как своевременно срабатывает электромагнитный расцепитель. При малых токах к. з. контакты не отбрасываются, а отключение производится также электромагнитным расцепителем.

Номинальным током $I_{\text{н.в}}$ и напряжением $U_{\text{н.в}}$ выключателя называют значения тока и напряжения, которые способны выдерживать главные токоведущие части выключателя в длительном режиме. Номинальный ток расцепителя $I_{\text{н.расц}}$ может отличаться от номинального тока выключателя, поскольку в выключатель могут быть встроены расцепители с меньшим номинальным током. Например, выключатель АВМ-4 с номинальным током 400 А может иметь катушки расцепителя на номинальные токи 120, 150, 200, 250, 300, 400 А.

Предельной коммутационной способностью выключа-

теля (ПКС) называют максимальное значение тока к. з., которое выключатель способен включить и отключить несколько раз, оставаясь в исправном состоянии. Обычно заводские испытания на ПКС выполняют в цикле О—пауза—ВО—пауза—ВО, где О — операция отключения цепи к. з. данным выключателем после ее включения вспомогательным аппаратом, ВО — операция включения и отключения цепи к. з. данным выключателем. Некоторые аппараты дополнительно испытывают на наибольшую включающую способность. Испытания выполняют в цикле В, что означает включение цепи данным выключателем и автоматическое отключение вспомогательным.

Одноразовой ПКС (ОПКС) называют наибольшее значение тока, которое выключатель может отключить один раз. После этого дальнейшая работа выключателя не гарантируется, может потребоваться его капитальный ремонт или замена. Например, для выключателей серии А3100 значение ОПКС принимают равным значению ПКС выключателя данного типа с расцепителем, имеющим наибольший номинальный ток. Так, выключатели А3110 имеют номинальный ток расцепителей от 15 до 100 А, а значение ПКС — от 3,2 до 12 кА (амплитуда). Однако значение ОПКС принимают равным 12 кА для всех выключателей А3110. Аналогично ОПКС принимается равным для выключателей А3120 — 23 кА, А3130 — 30 кА, А3140 — 50 кА. При отключении этих токов может повредиться тепловой элемент или изменяться его уставка, однако отключение к. з. безусловно обеспечивается, так как электромагнитный расцепитель имеет малое время срабатывания и успевает дать импульс на отключение, а собственно контактная система способна отключить предельный для своего типоисполнения ток к. з.

Значения ПКС и ОПКС соответствуют ожидаемому току к. з., который возникает в цепи при отсутствии данного выключателя и токоограничения.

Понятия ПКС и ОПКС относятся к процессу отключения. Однако выключатель во включенном состоянии должен пропускать протекающий по нему ток к. з., оставаясь в исправном состоянии, независимо от того, должен ли он или другой аппарат отключить этот ток. Это свойство выключателя характеризуется понятием электродинамической и термической стойкости.

Электродинамическая стойкость характеризуется амплитудой ударного тока к. з., который способен пропустить выключатель без остаточных деформаций деталей или недопустимого отброса контактов, приводящего к их приварванию или выгоранию. Если значение электродинамической стойкости в каталоге не приводится, то это означает, что стойкость выключателя определяется его коммутационной способностью.

Термическая стойкость характеризуется допустимым значением так называемого «джоулева интеграла» $\int_0^t i^2\,dt$, отражающего количество тепла, которое может быть выделено в выключателе за время действия тока к. з. В каталогах термическая стойкость задается величиной, измеряемой в $кА^2 \cdot с$. Если термическая стойкость в каталоге отсутствует, то это означает, что выключатель является термически стойким при всех временах отключения, определяемых его защитной характеристикой

Собственное время отключения выключателя — время срабатывания расцепителей и механизма выключателя до начала расхождения силовых контактов (используется при выборе выключателей по предельной коммутационной способности). Полное время отключения выключателя — время срабатывания расцепителей, механизма выключателя, расхождения силовых контактов и окончания гашения дуги в дугогасительных камерах (используется при проверке селективности защиты).

Автоматические выключатели могут иметь следующие защитные характеристики (рис. 8):

зависимую от тока характеристику времени срабатывания; такие выключатели имеют только тепловой расцепитель; применяются редко вследствие недостаточной предельной коммутационной способности и быстродействия;

независимую от тока характеристику времени срабатывания; такие выключатели имеют только токовую отсечку, выполненную с помощью электромагнитного или полупроводникового расцепителя, действующего без выдержки или с выдержкой времени;

ограниченно зависимую от тока двухступенчатую характеристику времени срабатывания; в зоне токов перегрузки выключатель отключается с зависимой от тока выдержкой времени, в зоне токов к. з. выключается токовой отсечкой с не зависимой от тока за-

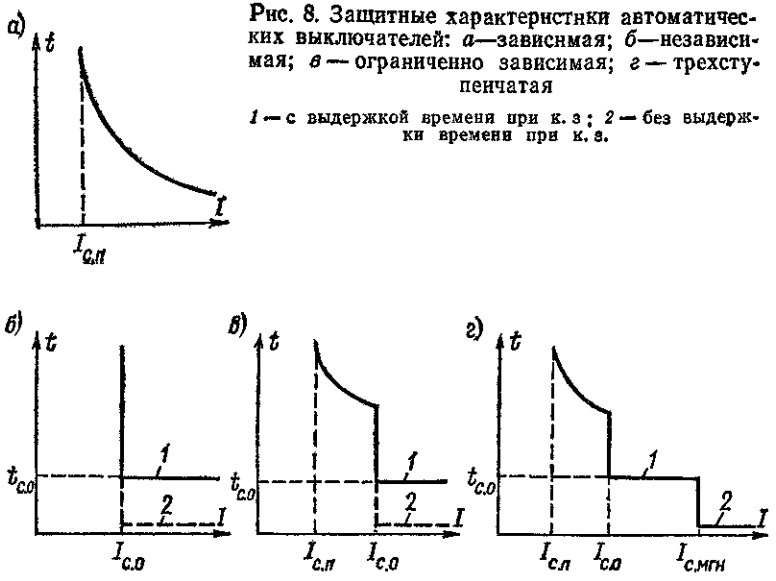


Рис. 8. Защитные характеристнки автоматических выключателей: *а*—зависнмая; *б*—независимая; *в* — ограниченно зависимая; *г* — трехступенчатая

1 — с выдержкой времени при к. з; *2* — без выдержки времени при к. з.

раиее установленной выдержкой времени (для селективных выключателей) нлн без выдержки времени (для неселективиых выключателей); выключатель имеет лнбо тепловой н электромагнитный (комбинированиый) расцепитель, либо двухступенчатый электромагнитный (выключатель АВМ), лнбо полупроводниковый расцепитель; трехступенчатую защитную характеристику. В зоне токов перегрузки выключатель отключается с завнсимой от тока выдержкой времени, в зоне токов к. з.—с независимой, заранее установленной, выдержкой времени (зоиа селектнвиой отсечки), а при близких к. з.—без выдержки времени (зона мгновенного срабатывания); зона мгновеиного срабатывания предназначена для уменьшення длительностн воздействня токов при близких к. з. Такие выключатели имеют полупроводниковый расцепитель н прнменяются для защнты вводов в КТП и отходящнх лнннй.

*Автоматические выключатели серии А3700**. Сокращеиное условное обозначенне А37ХХХ. Расшифровка в порядке напнсания: А — автоматический выключатель; 37 — номер разработки; Х — модификация и велнчнна выключателя: 1 — первая, 2 — вторая, 3 — третья, 4 — четвертая, 9 — модифицированные 3 и 4 величнны; Х — исполненне по внду защиты и числу полюсов, 1 нлн 2 — с электромагнйтнымн расцепителями, 3 или 4 — с электромагнитиымн н полупроводнйковыми расцепителямн (для селективных выключателей — только с полупроводниковымн), 5 нлн 6 — с электромагнитнымн н тепловыми расцепнтелями, 7 илн 8 — без максимальных расцепнтелей, нечетные цнфры — двухполюсные, четные — трехполюсные; Х — дополнительиая характернстика нсполиения; Б — токоограннчивающие или выполнеиные на нх базе, С — селектнвные илн выполиенные на их базе, Ф — нетокоограничивающне неселектнвные в фенопластовом корпусе, Н — неселектнвные нетокоограинчнвающне модернизнрованные. Двухполюсные выключателн перемениого тока имеют такне же характеристики, как трехполюсные.

Выключатели с полупроводнйковым расцепнтелем (табл. 16). Номнналыный ток этнх расцепителей соответствует наибольшему откалиброванному по шкале значению иоминального рабочего тока $I_{н.раб}$. Характеристика защнты огранйченно зависимая, а для выключателей А3790С — трехступенчатая (рис. 9). Полупроводниковое реле (расцепитель серии РП) допускает плавиую регулировку номинальиого рабочего тока расцепителя $I_{н.раб}$ (точка *А* на рисунке соответствует току срабатывания перегрузкн прн прииятом значеини $I_{н.раб}$); тока срабатывання отсечкн $I_{с.о}$ (точки *Б*, *В*, *Г*, *Д*, *Е*); времени срабатываиия защиты от перегрузки $t_{с.п}$ прн токе $6I_{н.раб}$ (точки *Ж*, *И*, *К*); времени срабатывання отсечкн $t_{с.о}$ (точки *Л*, *М*, *Н*) для селективных выключателей. Пунктнрными линиямн обозначена характеристнка неселективных выключателей в зоне токов к. з. Выключатели могут поставляться без защиты в зоне перегрузки.

Для выключателей перемениого тока (с полупроводниковым расцепнтелем) допускается увеличеиие времени срабатывання отсечки, еслн до возникновения к. з. ток в главной цепн был менее 0,7 $I_{н.раб}$. Для неселективиого токоограничивающего выключателя увелнчеине времени возможно в зоне значенй токов к. з. от $I_{с.о}$ полупроводинкового расцепителя до уставки срабатываиия электромагнитного расцепителя. При этом время отключеиия определяется кривыми *1*, *2*, *3* (рис. 9), соответствующими

* Здесь и далее технические данные приведены по техническим условиям на автоматические выключатели соответствующих типов.

Таблица 16. Трехполюсные автоматические выключатели А3700 с полупроводниковым расцепителем на напряжение до 660 В

Тип	Номинальный ток выключателя $I_{н.в}$, А	Базовый номинальный ток $I_{н.б}$, А	Уставки полупроводникового расцепителя РП: Регулируемые на шкалах РП значения: $I_{н.раб}$, А	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.раб}}$	$t^*_{с.о}$, с	$t_{с.п}$, с, при токе $6I_{н.раб}$	$\frac{I_{с.п}}{I_{н.раб}}$	Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А	ПКС** в цепи 380 В, кА	ОПКС** в цепи 380 В, кА
А3734С	250	200	160; 200; 250	2; 3; 5; 7; 10	0,1; 0,25; 0,4	4; 8; 16	1,25	—	50	—
	400	320	250; 320; 400							
А3744С	400	320	250; 320; 400					—	60	—
	630	500	400; 500; 630							
А3794С	250	200	160; 200; 250					—	$\frac{111,1}{50,5}$	$\frac{125}{57}$
	400	320	250; 320; 400							
	630	500	400; 500; 630							
А3714Б	160	32	20; 25; 32; 40		—			1600	18	—
		63	40; 50; 63; 80						36	—
		125	80; 100; 125; 160						75	125

Продолжение табл. 16

Тип	Номинальный ток выключателя $I_{н.в}$, А	Базовый номинальный ток $I_{н.б}$, А	Уставки полупроводникового расцепителя РП: Регулируемые на шкалах РП значения: $I_{н.раб}$, А	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.раб}}$	$t^*_{с.о}$, с	$t_{с.п}$, с, при токе $6I_{н.раб}$	$\frac{I_{с.п}}{I_{н.раб}}$	Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А	ПКС** в цепи 380 В, кА	ОПКС** в цепи 380 В, кА
А3724Б	250	200	160; 200; 250	2; 3; 5; 7; 10	—	4; 8; 16	1,25	2500	80	150
А3734Б	250	200	160; 200; 250		—			4000	100	150
	400	320	250; 320; 400							
А3744Б	400	320	250; 320; 400		—			6300	100	150
	630	500	400; 500; 630							
А3794Б	250	200	160; 200; 250		—			4000	$\frac{111,1}{50,5}$	$\frac{150}{68}$
	400	320	250; 320; 400					4000		
	630	500	400; 500; 630					6300		

* Выключатели А3790С при токе более 20 кА (действующее значение) отключаются без выдержки времени.

** ПКС и ОПКС выражены для всех выключателей (кроме А3790) мгновенным значением ударного тока, для А3790 указаны дробью, в числителе которой — наибольшая включающая способность (ударный ток), в знаменателе — наибольшая отключающая способность (действующее значение).

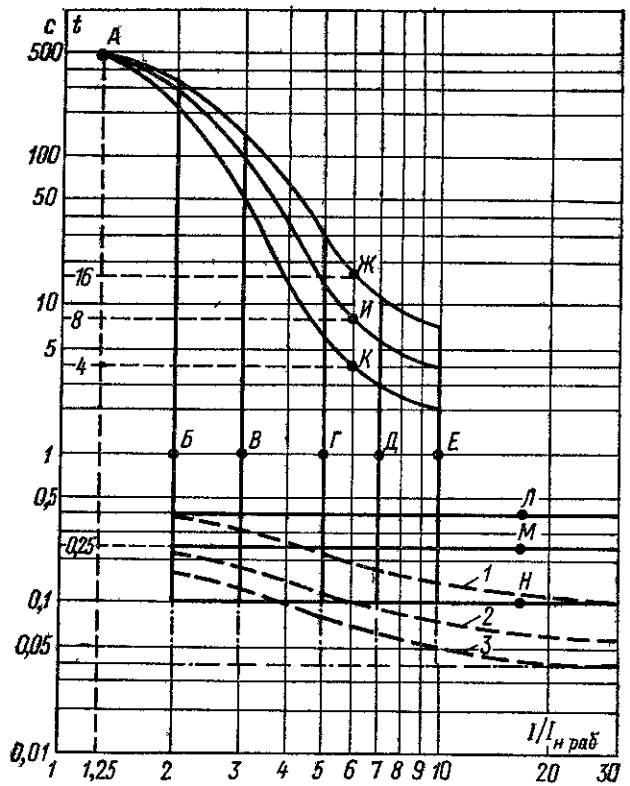


Рис. 9 Защитные характеристики автоматических выключателей А3700 переменного тока с полупроводниковым расцепителем

Селективные выключатели А3794С при токе более 20 кА (действующее значение) отключаются без выдержки времени

протекаиию тока к. з. по одиому, двум или трем полюсам выключателя. Для определения времени срабатывания селективного выключателя нужно время, определенное по кривым *1, 2, 3,* сравнить со значеннем $t_{с.о}$ по шкале и принять бо́льшее нз них.

Полупроводниковое реле (расцепнтель РП) не реагирует на апериодическую составляющую пускового тока электродвигателей в течение одиого периода. Коэффициент возврата реле составляет 0,97—0,98. Разброс по току срабатываиия зависнт от температуры окружающего вовдуха, уставки по шкале, внда к. з. илн перегрузки (одно-,

двух-, трехполюсное), но не превышает ±30 % для $I_{с.о}$ и ±20 % для $I_{с.п}$. Разброс по времени срабатывания при к. з. для селектнвных выключателей составляет ±0,02 с. Длнтельность протеканни тока к. з., прн которой еще ие срабатывает селективиая отсечка, составляет при уставках по шкале 0,1; 0,25 и 0,4 с соответственно 0,05; 0,17 н 0,32 с.

Источнником оперативного тока полупроводникового реле, обеспечивающим отключение выключателя прн к. з., являются встроеиные трансформаторы тока. Нельзя эксплуатировать нли налажнвать выключатель с расцепителем серни РП при параллельном соединеннн полюсов, прн последовательном соединении двух нлн трех полюсов трехполюсного выключателя, а также со снятым блоком управлення РП н незакорочеиной внлкой соединнтеля выводов измернтельных элементов.

Выключатели с электромагнитнымн и тепловыми расцепителямн (табл. 17—19). Характеристика защиты — ограинченно завнсимая. Эти расцепители имеют нерегулируемые уставки срабатываинн. Тепловые расцепители откалнброваны при температуре окружающего воздуха 40 °С и одновременном протеканни тока по всем трем полюсам. Они ие вызывают срабатывания прн номинальном токе расцепителя; могут вызвать срабатываннe прн токе 1,05 $I_{н\,расц}$ ие менее чем за 2 ч при начале отсчета от холодного состояння выключателя; вызывают срабатываннe при токе 1,25 $I_{н\,расц}$ меиее чем за 2 ч при отсчете от нагретого состояиня. Разброс по току срабатывания электромагнитиых расцепнтелей составляет для новых выключателей ±15 %; для выключателей, бывшнх в эксплуатации, ±30 %.

Собственное время отключения выключателя электромагнитным расцепителем завнсит от значеиия тока к. з. и велнчины выключателя, прн токах, близкнх к предельным, оно менее 10 см. Полное время отключеиия токоограничивающнх выключателей при отключеиии предельных токов составляет около 10 мс; в начале характеристики токоограннчения — около 15 мс. Для иетокоограничнвающих выключателей прн значении тока, близком к $I_{с.о}$, полное время отключення не превышает 40 мс, при увеличенни тока оно уменьшается.

Данные неавтоматических выключателей приведены в табл 20.

Автоматические выключатели серии «Электрон». Ус-

Таблица 17. Трехполюсные автоматические выключатели А3700 переменного тока с электромагнитными и тепловыми расцепителями

Тип выключателя	$I_{н.в}$, А	Номинальный ток теплового расцепителя $I_{н.расц}$, А	$\frac{I_{с.п}}{I_{н.расц}}$	$I_{с.о}$, А	ПКС в цепи 380 В	ОПКС в цепи 380 В
					Ударный ток, кА	
Выключатели на напряжение до 660 В						
А3716Б	160	16 20 25	1,15	630	5,5 10 15	—
		32; 40 50; 63 80 100; 125		630; 1600	20 30 45 60	—
		160			75	125
А3726Б	250	160 200; 250	1,15	2500	65 75	150
А3736Б	400	250 320 400	1,15	2500 3200 4000	65 100 100	150
А3796Н	630	250 320 400 500 630	1,15	2500 3200 4000 5000 6300	65 70 70 70 70	150
Выключатели на напряжение до 380 В						
А3716Ф	160	16 20 25	1,15	630	5,5 10 15	—
		32; 40 50; 63; 80 100; 125; 160		630; 1600	20 25 25	28
А3726Ф	250	160; 200; 250	1,15	2500	35	38
А3736Ф	630	250 320 400 500 630	1,15	2500 3200 4000 5000 6300	50	53

Таблица 18. Трехполюсные автоматические выключатели А3700 переменного тока с электромагнитными расцепителями

Тип выключателя	$I_{н.в}$, А	$I_{н\ расп}$, А	$I_{с.о}$, А	ПКС в цепи 380 В	ОПКС в цепи 380 В
				Ударный ток, кА	
Выключатели на напряжение до 660 В					
А3712Б	160	80 160	400 630; 1000; 1600	36 75	— 125
А3722Б	250	250	1600; 2000; 2500	80	150
А3732Б	400	400	2500; 3200; 4000	100	150
А3742Б	630	630	4000; 5000; 6300	100	150
А3792Б	630	630	2500; 3200, 4000; 5000; 6300	111,1	150
Выключатели на напряжение до 380 В					
А3712Ф	160	80 160	400 630; 1000; 1600	25	28
А3722Ф	250	250	1600; 2000; 2500	35	38
А3732Ф	630	400 630	2500; 3200; 4000 4000; 5000; 6300	50	53

ловное обозначение ЭХХХ. Расшифровка в порядке написания: Э — обозначение серии «Электрон»; ХХ — условное обозначение номинального тока; 06—1000 А, 16 — 1600 А, 25—2500 А, 40—4000 А; Х — способ установки; С — стационарные, В — выдвижные.

Выключатели с полупроводниковым реле максимального тока типа РМТ (табл. 21). По заказу выключатель может поставляться без реле РМТ. Реле РМТ допускает плавную регулировку номинального тока максимальной токовой защиты МТЗ (защиты от перегрузки) $I_{н\ мтз}$ относительно базового номинального тока $I_{н.б}$, времени срабатывания защиты от перегрузки $t_{с.п}$ при

Таблица 19. **Ориентировочные характеристики токоограничения автоматических выключателей А3700Б в цепи 380 В**

Тип выключателя	Ограниченный ток к.з. (амплитуда), кА, при ожидаемом токе к.з. (амплитуда), кА, равном										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
А3730Б А3740Б А3790Б	10	20	27	32	36	40	44	48	52	55	60
А3720Б	10	15	22	27	30	31	32	—	—	—	—
А3710Б	8	12	17	20	23	25	26	—	—	—	—

Таблица 20. **Трехполюсные неавтоматические выключатели А3700 переменного тока (без максимальных расцепителей)**

Тип	$I_{н.в}$, А	Термическая стойкость, кА²·с	Электродинамическая стойкость (амплитуда)*, кА
А3718Б; А3718Ф	160	6	2,5
А3728Б; А3728Ф	250	15	3
А3738С	400	250	50
А3748С	630	360	60
А3798С	630	130	40

* Для всех выключателей, кроме А8798С, указано значение тока электродинамического отброса (дребезга) контактов, при превышении которого может возникнуть их приваривание (механизм выключателя остается включенным). Для А3798С указано значение тока электродинамического расцепления (выключатель отключается).

токе 6 $I_{н.мтз}$, тока $I_{с.о}$ и времени $t_{с.о}$ срабатывания отсечки. Реле имеют два переключателя *S1* и *S2* выбора защитной характеристики, с помощью которых можно получить независимую, ограниченно зависимую и трехступенчатую характеристику (рис. 10).

При установке переключателя *S1* в обозначенное на лицевой панели реле положение *6* выключатель имеет

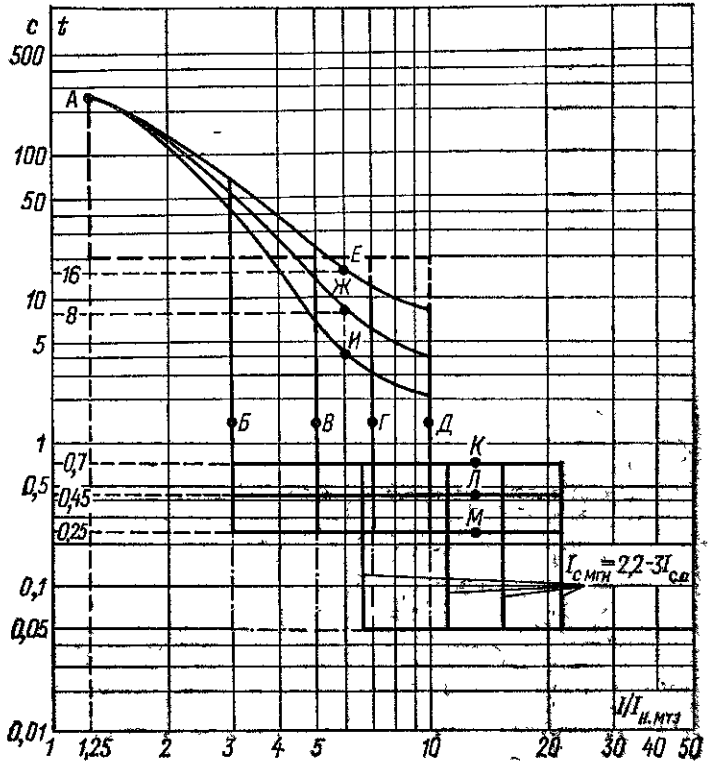


Рис. 10. Защитные характеристики выключателя «Электрон» с полупроводниковым реле серии РМТ

Наличие регулировки в точках *Г* и *Д* зависит от номинального тока выключателя

селективную отсечку с регулируемыми уставками по току (точки *Б, В, Г, Д*) и времени (точки *К, Л, М*), причем для выключателей переменного тока при токе более 2,2—3,0 $I_{с.о}$ отсечка срабатывает без выдержки времени; в положении *7* выключатель имеет неселективную отсечку (штрихпунктирные линии) с регулировкой по току (точки *Б, В, Г, Д*); в положении *8* выключатель срабатывает неселективно при токе, превышающем ток срабатывания перегрузки независимо от положения переключателя *S2* (характеристика на рисунке не показана). При установке переключателя *S2*

Таблица 21. Выключатели «Электрон» с полупроводниковым реле РМТ на напряжение до 660 В

Тип	Исполнение*	Номинальный ток выключателя $I_{н.в}$, А	Номинальный базовый ток МТЗ $I_{н.б}$, А	Уставки полупроводникового реле РМТ: регулируемые на шкалах РМТ значения: $\frac{I_{н.мтз}}{I_{н.б}}$	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.мтз}}$	$t_{с.о}$, с	$t_{с.п}$, с, при токе $6I_{н.мтз}$	$\frac{I_{с.п}}{I_{н.мтз}}$	ПКС** в цепи 380 В, действующее значение, кА
Э06	Стационарное и выдвижное, кроме Т	1000	630; 800 1000	0,8; 1,0; 1,25	3,5; 7; 10 3; 5; 7	0,25; 0,45; 0,7	4; 8; 16	1,25	40
	Стационарное и выдвижное Т	800	630; 800	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7; 10				
Э16	Выдвижное, кроме Т	1600	630 1000; 1600	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7; 10 3; 5; 7				45
	Выдвижное Т	1250	1000	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7				
Э25	Стационарное, кроме Т	4000	1000; 1600; 2500 4000	0,8; 1,0; 1,25 0,8; 1,0	3; 5; 7 3; 5				65
	Стационарное Т	3200	1000; 1600; 2500	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7				
Э25	Выдвижное, кроме Т	2500	1600; 2500	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7	0,25; 0,45; 0,7	4; 8; 16	1,25	50
	Выдвижное Т	2000	1600	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7				
Э40	Стационарное кроме Т	6300	4000 6300	0,8; 1,0; 1,25 0,8; 1,0	3; 5 3				115
	Стационарное Т	5000	4000	0,8; 1,0; 1,25	3; 5				
	Выдвижное, кроме Т	5000	2500 4000	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7 3; 5				70
	Выдвижное Т	4000	2500 4000	0,8; 1,0; 1,25	3; 5; 7 3; 5				

* Т — тропическое исполнение.

** Значение ОПКС составляет 110 % указанного в таблице значения ПКС.

Таблица 22. Выключатели «Электрон» с полупроводниковым реле МТЗ на напряжение до 660 В

Тип	Исполнение	Номинальный ток выключателя $I_{н.в}$, А	Номинальный ток МТЗ $I_{н.мтз}$, А	Регулируемые уставки полупроводникового реле МТЗ					ПКС* в цепи 380 В, кА
				$\frac{I_{с.п}}{I_{н.мтз}}$	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.мтз}}$	$t_{с.п}$, с, при токе $I_{н.мтз}$	$t_{с.п}$, с, при токе $6I_{н.мтз}$	$t_{с.о}$, с	
Э06	Стационарное, кроме Т	800	250; 400; 630; 800	0,8; 1,25; 2	3; 5; 7; 10	100; 150; 200	4; 8; 16	0,25; 0,45; 0,7	$\frac{60}{28}$
	Стационарное Т и выдвижное	630	250; 400; 630						
Э16	Выдвижное, кроме Т	1600	630 1000; 1250; 1600		3; 5; 7; 10 3; 5; 7				$\frac{84}{40}$
	Выдвижное Т	1250	630 1000; 1250		3; 5; 7; 10 3; 5; 7				
Э25	Стационарное, кроме Т	3200	800		3; 5; 7; 10				$\frac{120}{55}$
			1000; 1250; 1600; 2000; 2500		3; 5; 7				
			3200		3; 5				
Э40	Стационарное Т	2500	630; 800	0,8; 1,25; 2	3; 5; 7; 10	100; 150; 200	4; 8; 16	0,25; 0,45; 0,7	$\frac{120}{55}$
			1000; 1250; 1500; 2000; 2500		3; 5; 7				
	Выдвижное, кроме Т	2500	1600; 2000; 2500		3; 5; 7				$\frac{100}{45}$
	Выдвижное Т	2000	1250; 1600; 2000		3; 5; 7				
	Стационарное, кроме Т	6300	3200; 4000 6300		3; 5 3				$\frac{230}{105}$
	Стационарное Т	5000	2500; 3200; 4000 5000		3; 5 3				
	Выдвижное, кроме Т	5000	2500 3200; 4000; 5000		3; 5; 7 3; 5				$\frac{160}{65}$
	Выдвижное Т	4000	2000; 2500 3200; 4000		3; 5; 7 3; 5				

* Значение ПКС указано дробью, в числителе — наибольшая включающая способность (ударный ток), в знаменателе — наибольшая отключающая способность (действующее значение).

в положение *11* выключатель имеет зависимую от тока характеристику защиты от перегрузки с регулируемой при токе 6 $I_{в.мтз}$ выдержки времени (точки *Е*, *Ж*, *И*); в положении *12* выключатель имеет независимую от тока характеристику защиты от перегрузки (показана штриховой линией). Точка *А* на рис. 10 соответствует току срабатывания защиты от перегрузки при принятом номинальном токе реле РМТ.

Реле РМТ не реагирует на апериодическую составляющую пусковых токов электродвигателей в течение одного периода. Коэффициент возврата реле составляет 0,75. Источником оперативного тока, обеспечивающим отключение выключателя при к. з., являются встроенные трансформаторы тока.

Выключатели с полупроводниковым реле типа МТЗ (табл. 22). Выпускались до 1982 г. Реле МТЗ допускает плавную регулировку тока срабатывания защиты от перегрузки $I_{с.п}$, времени срабатывания перегрузки $t_{с.п}$ при однократном и шестикратном номинальном токе МТЗ $I_{н.мтз}$, тока $I_{с.о}$ и времени $t_{с.о}$ срабатывания отсечки. Реле имеет переключатель выбора защитной характеристики, с помощью которого можно получить независимую, ограниченно зависимую и трехступенчатую характеристику (рис. 11).

При установке переключателя в положение *Н* (нижнее) реле имеет зависимую от тока характеристику защиты от перегрузки с регулируемыми уставками тока срабатывания (точки *А*, *Б*, *В*), времени срабатывания при токе $I_{н.мтз}$ (точки *Г*, *Д*, *Е*) и токе $6I_{н.мтз}$ (точки *Ж*, *И*, *К*); селективную отсечку с регулируемыми уставками тока срабатывания (точки *Л*, *М*, *Н*, *П*) и времени срабатывания (точки *Р*, *С*, *Т*), причем для выключателей переменного тока при токе более 2,2—3,0 $I_{с.о}$ отсечка срабатывает без выдержки времени. Регулировкой можно получить любую в пределах указанных точек характеристику (например, *АГКНТ*). При установке переключателя в положение *С* (среднее) выключатель имеет аналогичную характеристику, но без выдержки времени при срабатывании отсечки (показано штрихпунктиром). При установке переключателя в положение *В* (верхнее) выключатель имеет независимую от тока характеристику срабатывания без выдержки времени при токе, равном току срабатывания защиты от перегрузки (на рисунке не показано).

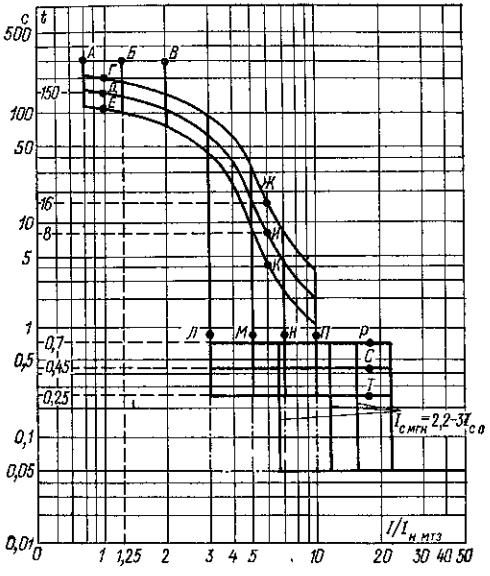


Рис 11. Защитные характеристики выключателя «Электрон» с полупроводниковым реле серии МТЗ

Наличие регулировки в точках *Н* и *П* зависит от номинального тока выключателя

Реле реагирует на апериодическую составляющую пусковых токов электродвигателей и тока к. з. Коэффициент возврата реле 0,75.

Разбросы тока срабатывания реле РМТ и МТЗ зависят от температуры окружающего воздуха, вида к. з. или перегрузки, уставки номинального тока по шкале, но не превышают ±35 % от уставки по шкале.

Собственное время отключения выключателя для Э06 не превышает 20—35 мс, для остальных типов — 45—60 мс. Полное время отключения не более 100—150 мс.

Автоматические выключатели серий АЕ20 и АЕ20М.

Сокращенное условное обозначение АЕ20ХХХ. Расшифровка в порядке написания: АЕ — выключатель автоматический; 20— номер разработки; Х — условное обозначение номинального тока: 2 — 16 А, 4—63 А, 5—100 А, 6—160 А; Х — число полюсов в комбинации с максимальными расцепителями тока, 3 — трехполюсные с электромагнитными расцепителями, 4 или 6 — соответственно одно- или трехполюсные с электромагнитными и тепловыми расцепителями; наличие буквы М — модернизированные выключатели.

Технические данные приведены в табл. 23 и 24. Характеристика защиты — ограниченно зависимая.

Тепловые расцепители без температурной компенсации откалиброваны при температуре 40 °С, с температурной компенсацией — при 20 °С. Тепловые расцепители при нагрузке всех полюсов из холодного состояния не срабатывают при токе 1,05 $I_{н.расц}$ в течение 2 ч; срабатывают при токе 1,25 $I_{н.расц}$ в течение не более 20 мин при наличии температурной компенсации и не более 30 мин при ее отсутствии; срабатывают при токе 7$I_{н.расц}$ в течение 3—15 с при наличии температурной компенсации и 1—15 с при ее отсутствии; однополюсные выключатели на номинальный ток 63 А срабатывают при токе 1,35 $I_{н.расц}$ в течение менее 1 ч.

Регулировка тока срабатывания тепловых расцепителей — (0,9—1,15) $I_{н.расц}$, а для тепловых расцепителей, номинальный ток которых равен номинальному току выключателя — (0,9—1,0) $I_{н\,расц}$.

Разброс тока срабатывания электромагнитных расцепителей ±20 %, после испытаний допускается дополнительное отклонение уставок на ±15 %.

Собственное время отключения выключателя не превышает 0,04 с при токах, близких к $I_{с.о}$, при увеличении тока оно уменьшается. Минимальное собственное время отключения — около 0,01 с.

Автоматические выключатели серии ВА. Сокращенное обозначение ВАХХ-ХХ. Расшифровка в порядке написания: ВА — выключатель автоматический; ХХ — номер унифицированной серии, 51—нетокоограничивающие с электромагнитными и тепловыми расцепителями или только с электромагнитными расцепителями, 52 — токоограничивающие с электромагнитными и тепловыми или только с электромагнитными расцепителями, 53 — токоограничивающие неселективные с полу-

Таблица 23. Автоматические выключатели серий АЕ20 и АЕ20М на напряжение до 660 В

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Вид расцепителя	$I_{н\,расц}$, А	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.расц}}$	Уставка или пределы регулирования, $I_{с.п}/I_{н.расц}$
АЕ2023	16	Электромагнитный	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16	12	—
АЕ2026		Комбинированный			0,9—1,15
АЕ2043	63	Электромагнитный	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	12	—
АЕ2044					1,15
АЕ2046*		Комбинированный			0,9—1,15**
АЕ2043М	63	Электромагнитный	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	12	—
АЕ2046М*		Комбинированный			0,9—1,15**
АЕ2053М	100	Электромагнитный	10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80, 100	12	—
АЕ2056М*		Комбинированный			1,15
АЕ2063	160	Электромагнитный	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160	12	—
АЕ2066		Комбинированный			1,15

*При наличии независимого расцепителя не устанавливается електромагнитный расцепитель в одном из полюсов.

** Тепловой расцепитель имеет температурную компенсацию. Возможно исполнение без регулировки $I_{с.п}$ и температурной компенсации с уставкой $I_{с.п}$=1,15 $I_{н\,расц}$.

Таблица 24. **Предельная коммутационная способность выключателей АЕ20 и АЕ20М**

Тип выключателя	Вид максимального расцепителя	$I_{н\,расц}$, А	ПКС*, действующее значение, кА, при напряжении	
			220 В**	380 В
АЕ2020	Комбинированный Электромагнитный Комбинированный или электромагнитный	0,3—1,6 0,3—1,6 2—6 8—16	—	4 (12) 0,7 (4) 1 (4) 2 (4)
АЕ2040	Комбинированный или электромагнитный	10—12,5 16—25 31,5—63	2 (6) 3 (6) 6 (7)	2 (6) 3 (6) 6 (7)
АЕ2040М	Комбинированный или электромагнитный	0,6—1,6 2—12,5 16—63		5*** (6,5) 1,5 (6,5) 4,5*** (6,5)
АЕ2050М	Комбинированный или электромагнитный	10—12,5 16—25 31,5—100	—	2,4 (6) 3,5 (6) 6*** (7)
АЕ2060	Комбинированный или электромагнитный	16—25 31,5—40 50—100 125—160		3,5 (6) 6 (15) 9*** (15) 11,5*** (17)

* В скобках указано значение ОПКС.
** Для однополюсных выключателей.
*** Для пыле- и брызгозащищенных выключателей (со степенью защиты IP54) ПКС меньше указанной, см каталожные данные.

проводниковыми и электромагнитными расцепителями, 54 — токоограничивающие высокой коммутационной способности с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями, 55 и 75 — селективные с полупроводниковыми расцепителями, 56 — без максимальных расцепителей; ХХ—условное обозначение номинального тока: 25—25 А, 29—63 А, 30—80 А, 31—100 А, 32—125 А, 33—160 А, 35—250 А, 37—400 А, 39—630 А, 41—1000 А, 43—1600 А, 45—2500 А, 47—4000 А.

В обозначении выключателей с номинальным током до 160 А вместо разделительного знака «—» может указываться буква «Г», что означает, что выключатель предназначен специально для защиты электродвигателей.

Выключатели с полупроводниковым расцепителем серии БПР (табл. 25). Характеристика защиты — ограниченно зависимая, а для селективных выключателей — трехступенчатая.

Защитная характеристика выключателей переменного тока приведена на рис. 12. Полупроводниковый расцепитель (реле БПР) допускает ступенчатую регулировку номинального тока расцепителя $I_{н.расц}$ (ток срабатывания защиты от перегрузки соответствует току $1{,}25I_{н.расц}$); тока срабатывания отсечки $I_{с.о}$ (точки *А, Б, В, Г, Д*); времени срабатывания защиты от перегрузки $t_{с.п}$ при токе $6I_{н.расц}$ (точки *Е, Ж, И*); времени срабатывания отсечки $t_{с.о}$ (точки *К, Л, М*) для селективных выключателей. Начало зоны токов мгновенного срабатывания (третьей ступени защитной характеристики) на рисунке показано условно, значение тока мгновенного срабатывания $I_{с\,мгн}$ зависит от номинального тока выключателя. Штрихпунктиром обозначена характеристика срабатывания отсечки неселективных выключателей.

Реле БПР не реагирует на апериодическую составляющую пусковых токов электродвигателей в течение одного периода. Коэффициент возврата реле 0,97—0,98. Разброс тока срабатывания с учетом всех влияющих факторов составляет ориентировочно ±30 % для $I_{с.о}$ и ±20 % для $I_{с.п}$. Разброс тока срабатывания третьей ступени защиты $I_{с.мгн}$ допускается только в сторону его увеличения. Разброс времени срабатывания селективных выключателей при к. з составляет ±0,02 с. Длительность протекания тока к. з., при которой еще не срабатывает селективная отсечка, составляет при уставках по шкале 0,1; 0,2; 0,3 с соответственно 0,05; 0,15 и 0,25 с. Нельзя эксплуатировать выключатель переменного тока с реле БПР при последовательном соединении полюсов. Источником оперативного тока полупроводникового реле, обеспечивающим отключение выключателя при к. з., являются встроенные трансформаторы тока.

Реле БПР может быть выполнено по заказу без за-

Таблица 25. **Выключатели типа ВА53, ВА54, ВА55, ВА75 переменного тока на напряжение до 660 В**

Тип	Номинальный ток выключателя $I_{н.в}$, А	Регулируемые уставки полупроводникового расцепителя: $\frac{I_{н.расц}}{I_{н.в}}$	$\frac{I_{с.о}}{I_{н.расц}}$	$t_{с.о}$, с	$t_{с.п}$, с, при токе $6I_{н.расц}$	$\frac{I_{с.п}}{I_{н.расц}}$	$\frac{I_{о.в}}{I_{н.расц}}$ при однофазных к.з.	Ток срабатывания третьей ступени защиты $I_{с.мгн}$, кА	ПКС* в цепи 380 В, кА	ОПКС* в цепи 380 В, кА
ВА53-37	160; 250; 400	0,63; 0,8; 1,0	2; 3; 5; 7; 10**	—	4; 8; 16	1,25	0,5÷1	—	47,5	53
ВА53-39	160; 250; 400; 630								55	60
ВА53-41	1000		2; 3; 5; 7**						135	140
ВА53-43	1600								135	140
ВА54-37	160; 250; 400		2; 3; 5; 7; 10**						87	—
ВА54-39	400; 500; 630								100	—
ВА54-41	1000	0,63; 0,8; 1,0	2; 3; 5; 7**	—	4; 8; 16	1,25	0,5—1	—	150	160
ВА55-37	160; 250; 400		2; 3; 5; 7; 10	0,1; 0,2; 0,3				20	32,5	38
ВА55-39	160; 250; 400; 630							25	47,5	53
ВА55-41	1000		2; 3; 5; 7					25	55	60
ВА55-43	1600							31	80	85
ВА75-45	2500							38	60	65
ВА75-47	2500							38	70	75
	4000		2, 3; 5					45		

* Действующее значение тока.

** Ток срабатывания электромагнитного расцепителя равен 120 % наибольшей уставки отсечки полупроводникового расцепителя.

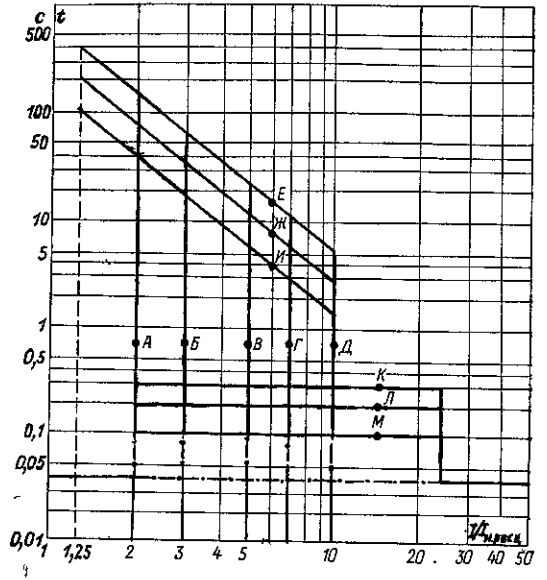


Рис. 12. Защитные характеристики выключателей переменного тока серий ВА53, ВА54, ВА55, ВА75 с полупроводниковым расцепителем

Наличие регулировки в точках *Г, Д, К, Л, М* зависит от типа и номинального тока выключателя

щиты от перегрузки, а также с защитой от однофазных к. з., срабатывающей при токе однофазного к. з. не менее 0,5 $I_{н.расц}$ и не более $I_{н.расц}$ (ток срабатывания не регулируется), с установленной выдержкой времени — для селективных и без выдержки времени — для неселективных выключателей. Характеристика защиты от однофазных к. з. ограниченно зависит от тока (рис. 13).

Выключатели с электромагнитными и тепловыми расцепителями (табл. 26—29). Характеристика защиты — ограниченно зависимая для выключателей с комбинированными расцепителями и независимая — для выключателей с электромагнитными расцепителями.

Таблица 26. Трехполюсные автоматические выключатели ВА51 и ВА52 с номинальным током до 160 А, напряжением до 660 В

Тип выключателя	$I_{н.в}$, А	$I_{н.расц}$, А	$I_{с.о}/I_{н.расц}$	$I_{с.д}/I_{н.расц}$	ПКС* в цепи 380 В, действующее значение, кА		ОПКС в цепи 380 В, действующее значение, кА	
					ВА51	ВА52	ВА51	ВА52
ВА51-25	25	6,3; 8,0	7; 10	1,35	2	—	5	—
		10; 12,5			2,5			
		16; 20; 25			3,8**			
ВА51Г25	25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6	14	1,2	3	—	5	—
		2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0			1,5			
		10, 12,5			2			
		16; 20; 25			3**			
ВА51-31 ВА52-31	100	16	3; 7; 10	1,35	4,5	13	6	30
		20; 25			5	13		
		31,5; 40			6	16		
		50; 63			6	20		
		80; 100		1,25	6	28		
ВА51Г31 ВА52Г31	100	16, 20, 25	14	1,2	3,6	13	6	30
		31,5; 40			6	16		
		50; 63			6	20		
		80, 100			6	28		
ВА51-33 ВА52-33	160	60; 100	10	1,25	12,5	30	15	38
		125; 160				38		
ВА51Г33 ВА52Г33	160	80; 100	14	1,2	12,5	30	15	38
		125, 160				38		

* Значения ПКС указаны в цикле О—ВО. В цикле О—ВО—ВО значения ПКС могут быть меньше и принимаются по каталожным данным Все значения ориентировочные и будут уточняться по результатам испытаний.

** Для выключателей со степенью защиты 1Р54 ПКС=2,0 кА.

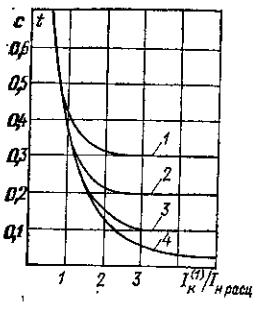


Рис. 13. Характеристика защиты от однофазных к. з. выключателей с полупроводниковым расцепителем селективных ВА55 и ВА75 с уставками времени срабатывания отсечки 0,3 с (кривая *1*); 0,2 с (кривая *2*); 0,1 с (кривая *3*) и неселективных ВА53, ВА54 (кривая *4*)

Разброс тока срабатывания отсечки для новых выключателей ±20 %, для выключателей, бывших в эксплуатации, ±30 %.

Тепловые реле откалиброваны при температуре 40 °С.

Тепловые реле выключателей, имеющих в обозначении букву «Г» и предназначенных для защиты электродвигателей, при одновременной нагрузке всех полюсов не срабатывают при токе 1,05 $I_{н.расц}$ в течение менее 2 ч; срабатывают из нагретого состояния при токе 1,2 $I_{н.расц}$ в течение не более 30 мин и при токе 1,5 $I_{н.расц}$ менее чем за 2 мин; срабатывают при токе $7I_{н.расц}$ в течение 3—15 с из холодного состояния.

Тепловые реле остальных выключателей с номинальным током до 63 А не срабатывают в течение 1 ч из холодного состояния при токе 1,05 $I_{н.расц}$, срабатывают в течение менее 1 ч из нагретого состояния при токе 1,35 $I_{н.расц}$; с номинальным током более 63 А не срабатывают в течение менее 2 ч из холодного состояния при токе 1,05 $I_{н.расц}$ и срабатывают в течение менее 2 ч из нагретого состояния при токе 1,25 $I_{н.расц}$.

При нагрузке не всех полюсов ток срабатывания тепловых расцепителей увеличивается на 10 % при двухполюсной и на 20 % при однополюсной нагрузке. Выключатели, кроме предназначенных для защиты электродвигателей (имеющих в обозначении букву «Г»), могут поставляться без тепловых расцепителей. Выключатели с номинальным током до 100 А включительно имеют регулировку номинального тока тепловых расцепителей в пределах (0,8—1) $I_{н.расц}$, двухполюсные выключатели могут поставляться без этой регулировки.

Токоограничивающие выключатели серии ВА52 (кроме ВА52-37 и ВА52-39) состоят из базового ието-

Таблица 27. **Трехполюсные автоматические выключатели ВА51 и ВА52 с номинальным током 250—630 А, напряжением до 660 В**

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальный ток теплового расцепителя $I_{н.расц}$, А	$I_{с.о}/I_{н.расц}$	$I_{с.о}$ для исполнения без тепловых расцепителей, А	ПКС в цепи 380 В, действующее значение**, кА	ОПКС в цепи 380 В, амплитудное значение, кА
ВА51-35	250	100	12	1000; 1250; 1600; 2000; 2500	12/12	14
		125			15/15	18
		160; 200; 250			18/15	22
ВА51-37	400	250; 320; 400	10	1600; 2000; 2500; 3200; 4000	25/25	30
ВА51-39	630	400; 500; 630	10	2500; 3200; 4000; 5000; 6300	35/35	40
ВА52-35	250	100	12	1000; 1250; 1600; 2000; 2500	30/30	32
		125			40/30	42
		160; 200; 250			40/30	45
ВА52-37	400	250; 320; 400	10	1600; 2000; 2500; 3200; 4000	35/30	40
ВА52-39	630	250; 320;	10	2500; 3200; 4000; 5000; 6300	40/40	45
		400			50/40	55
		500; 630			55/40	60

* Кратность тока срабатывания тепловых расцепителей — 1,25.
** В числителе — в цикле О—ВО, в знаменателе — в цикле О—ВО—ВО.

Таблица 28. **Ориентировочные характеристики токоограничения автоматических выключателей ВА в цепи 380 В при cos φ=0,2 и $k_у$=1,57**

Тип выключателя	Ограниченный ок к. з. (амплитуда), кА, при действующем значении ожидаемого тока к. з., А, равном					
	20	40	60	80	100	120
ВА53-37, ВА53-39	32	53	70	84	—	—
ВА54-37; ВА54-39	28	47	64	80	95	104
ВА53-41	28	41	55	65	75	82
ВА54-41	28	41	51	58	63	66
ВА53-43	40	61	80	97	113	130

коограничивающего выключателя серии ВА51 и специального пристраиваемого токоограничивающего блока. Последний состоит из контактной системы, размыкающейся при отключении предельных токов, дугогасительных камер и механизма фиксации контактов в отключенном положении. Для последующего замыкания этих контактов необходимо нажать расположенные на блоке кнопки.

Собственное время отключения выключателей (кроме ВА75) при токах к. з., близких к предельным, менее 10 мс, полное время отключения не более 15 мс. При токах, близких к току срабатывания электромагнитной отсечки полное время отключения не превышает 40 мс. Для выключателей ВА75 собственное время отключения при токах, близких к предельным, составляет 30—40 мс, полное время отключения — 50 мс.

Таблица 29. **Неавтоматические выключатели ВА56 (без максимальных расцепителей)**

Тип	Номинальный ток, А	Термическая стойкость, $кА^2 \cdot с$	Ток электродинамического расцепления, действующее значение, кА	ПКС, кА	ОПКС, кА
ВА56-37	400	125	20	32,5	38
ВА56-39	630	380	25	47,5	53
ВА56-41	1000	450	25	55	60
ВА56-43	1600	900	31	60	85

Выбор по условиям нормального режима. Выключатель выбирается исходя из следующих условий:

соответствия номинального напряжения выключателя $U_{н.в}$ номинальному напряжению сети $U_{ср.н}$

$$U_{н.в} \geqslant U_{ср.н}, \quad (43)$$

соответствия номинальному току электродвигателя $I_{н.дв}$ (для индивидуальных выключателей электродвигателей)

$$I_{н.расц} \geqslant I_{н.дв}, \quad (44)$$

соответствия максимальному рабочему току $I_{раб.макс}$ группы электроприемников (для выключателей питания сборок и щитов) в длительном режиме

$$I_{н.расц} \geqslant I_{раб.макс} \quad (45)$$

Для выключателей, устанавливаемых в закрытых шкафах, длительный допустимый ток обычно снижают против номинального и принимают по соответствующим каталожным данным.

Завышение номинального тока расцепителя по отношению к номинальному току присоединения может потребоваться при необходимости обеспечения стойкости выключателя при к. з., например, при подключении электродвигателя с небольшим номинальным током непосредственно к основному щиту 0,4 кВ; обеспечения отстройки отсечки автоматического выключателя или возврата встроенной защиты от перегрузки (кроме тепловой) при пуске или самозапуске электродвигателей (см. § 6).

В указанных случаях следует проверить, требуется ли защита кабеля от перегрузки в соответствии с Правилами [13]. При ее необходимости следует подобрать другой тип автоматического выключателя, пересмотреть первичную схему, осуществить защиту от перегрузки с помощью дополнительных тепловых реле или выносной релейной защиты, и лишь в крайнем случае увеличить сечение кабеля.

Выбор по условиям стойкости при к. з. Выключатели выбирают так, чтобы значения ПКС, электродинамической и термической стойкости выключателей были не менее соответствующих параметров к. з. в месте их установки.

Условие предельной коммутационной способности. Каталожное значение ПКС должно быть не менее зна-

чения тока к. з., протекающего в цепи в момент расхождения контактов выключателя. Разные типы выключателей имеют разное собственное время отключения при предельных токах. Для этого момента времени и определяют значение тока к. з.

Для неселективных выключателей с малым (менее одного периода) собственным временем отключения при предельных токах (А3100, А3700, ВА51, АЕ20), токоограничивающих (А3700Б, ВА52, ВА53, ВА54), а также селективных с трехступенчатой защитной характеристикой и устройством для электродинамического расцепления (ВА55, А3790С), каталожное значение ПКС сопоставляется с ожидаемым значением тока к. з. в цепи, вычисленным с учетом подпитки от электродвигателей 380 В (токоограничивающая способность выключателей не учитывается).

Для неселективных выключателей с большим (более одного периода) собственным временем отключения при предельных токах (АВМ, «Электрон») и всех селективных (кроме ВА55 и А3790С) подпитка от асинхронных электродвигателей не учитывается, так как их влияние на значение тока к. з. продолжается не более одного периода. Исключение составляют выключатели, ПКС которых задана амплитудным значением ударного тока к. з. (А3744С, А3734С), при выборе этих выключателей требуется учет подпитки от электродвигателей.

Иногда в каталоге наряду с отключающей способностью задано также и значение включающей способности. Последнее необходимо сопоставлять с ожидаемым значением тока к. з., вычисленным с учетом подпитки от электродвигателей.

Аппараты, расположенные за токоограничивающими выключателями, выбирают с учетом токоограничения. Например, если в цепи с ожидаемым ударным током 60 кА установлен выключатель А3726Б, то расположенные за ним аппараты выбирают по значению тока 31 кА (амплитуда), до которого ограничивается ток к. з.

Допускается выбирать автоматические выключатели по значению тока ОПКС. После отключения этого тока выключатель или его тепловой элемент может выйти из строя. Однако это возможно только при весьма редких повреждениях участков кабеля, расположенных близко от выключателя, причем за время ремонта кабеля можно заменить выключатель или его расцепитель.

Допускается установка нестойких при к. з. выключателей или группы выключателей, если они защищены расположенным ближе к источнику питания стойким при к. з. выключателем, обеспечивающим мгновенное отключение всех к. з. с током, равным или большим тока ОПКС указанных нестойких выключателей.

Условие электродинамической стойкости. Значение электродинамической стойкости выключателя должно быть не менее амплитудного значения ударного тока к. з. в месте установки выключателя, с учетом подпитки от электродвигателей 380 В. Эта проверка необходима, как правило, для неавтоматических выключателей, а также некоторых выключателей с большим временем отключения (АВМ). Проверку на электродинамическую стойкость не выполняют, если значение электродинамической стойкости в каталоге отсутствует (это означает, что стойкость выключателя определяется его ПКС).

Условие термической стойкости. Тепловой импульс тока к. з. в данной цепи не должен превышать указанное в каталоге значение термической стойкости выключателя. Эта проверка обычно необходима для неавтоматических выключателей, если они защищаются селективными автоматическими выключателями, а также для селективных выключателей АВМ. Проверку на термическую стойкость не выполняют, если ее значение в каталоге отсутствует (это означает, что выключатель является термически стойким при всех временах отключения, определяемых его защитной характеристикой).

Значения токов к. з. и теплового импульса для выбора выключателей рассчитывают по выражениям, приведенным в § 2. Подпитку от электродвигателей 0,4 кВ учитывают только при выборе аппаратуры на главном щите КТП 0,4 кВ, за исключением вводных выключателей, через которые ток подпитки не проходит. Через секционный выключатель главного щита проходит половина тока подпитки, но из-за относительно малого значения его можно не учитывать.

По указанным параметрам в табл. 30 и 31 можно выбрать автоматические выключатели, установленные на главном щите КТП 0,4 кВ в зависимости от мощности трансформаторов, имеющих напряжение к. з. $u_к = 5{,}5\ \%$ (для трансформатора 400 кВ·А — 4,5 %) и питающихся от мощной энергосистемы, сопротивление которой $x_с = 0{,}1x_т$. Вводные и секционный выключатели

Таблица 30. Расчетные параметры сети для к. з. и при к. з. с учетом токоограничивающего

Мощность трансформатора, кВ · А	Металлическое					
	Для вводных выключателей			Для выключателей		
	$I_к^{(3)}$, кА	$i_у$, кА	$B_к$, кА² · с	$I_к^{(3)}$, кА	$I_{к\Sigma}^{(3)}$, кА	$i_{у\Sigma}$, кА
2500	59,5	126,2	2400	59,5	67,8	137,8
1600	38,2	81	1000	38,2	43,5	88,4
1000	24	50,9	400	24	27,3	55,5
630	15	32	155	15	17,1	34,7
400	11,8	25	96	11,8	13,1	26,9

Примечание. Значения $I_{к\Sigma}^{(3)}$, $i_{у\Sigma}$ и $B_к$ определены с учетом по времени срабатывания отсечки вводного выключателя 0,6 с, выключ

выбора выключателей КТП при металлических действия дуги

к з	К. з с учетом дуги				
отходящих линий	Для выключателей отходящих линий				
$B_к$, кА² с				$B_к$, кА² · с	
«Электрон», АВМ	А3700С	$I_{к\,ср}^{(3)}$, кА	$I_{к\Sigma}^{(3)}$, кА	$i_{у\Sigma}$, кА	«Электрон», АВМ	А3700С
1266	558	39,2	47,5	83,5	564,5	257
522	230	25,8	31,1	54,7	244	111
206	90,6	18	21,3	37,6	117,8	53
80,5	35,5	12,4	14,5	25,7	55,6	24,8
49,3	21,4	10	11,3	20,2	35,7	15,7

дпятки от электродвигателей. Значение $B_к$ определено при выдержке ателей отходящих линий «Электрон» и АВМ—0,25 с, А3700С—0,1 с.

выбраны по стойкости при металлических к. з., выключатели отходящих линий — как при металлических к. з., так и с учетом токоограничивающего действия дуги в месте к. з.

В случае отказа выключателя отходящей линии, выбранного с учетом токоограничивающего действия дуги, при маловероятных металлических к. з. на его зажимах, авария локализуется в пределах одной секции стойкими при металлических к. з. вводным и секционным выключателями. Такая авария не приводит к остановке производства, так как вторая секция остается в работе, а ответственные электроприемники либо имеют резервирование в технологической части, либо могут питаться от любой из секций.

Выбор по условию селективности. Селективность должна быть обеспечена между последовательно включенными выключателями в сети 0,4 кВ, между защитой со стороны высокого напряжения ВН питающего трансформатора 6/0,4 или 10/0,4 кВ и выключателями 0,4 кВ, а также между выключателем и магнитным пускателем (или контактором) данного присоединения.

Селективность между последовательно включенными автоматическими выключателями. Обеспечивается применением селективных выключателей, имеющих выдержку времени при срабатывании отсечки. Выбор работочих установок будет рассмотрен в § 7. Невозможно обеспечить селективную работу последовательно включенных неселективных автоматических выключателей, так как время их отключения, несмотря на различие номинальных токов, примерно одинаково. Селективность автоматических выключателей проверяется сопоставлением их характеристик на карте селективности. Защитные характеристики, построенные с учетом разбросов по току и времени срабатывания, не должны накладываться или пересекаться. Следует стремиться к схемам сетей с одной ступенью селективности, например, выключатель питания двигателя — неселективный, выключатель питания сборки, от которой питается двигатель, — селективный, а в качестве отключающих аппаратов на вводах в сборку применять неавтоматические выключатели.

Селективность релейной защиты со стороны ВН питающего трансформатора и автоматических выключателей НН. Селективность защиты трансформатора следует обеспечивать с вводным или хотя бы с секционным автоматическим выключателем КТП-0,4 кВ, а если это невозможно — то с отходящими линиями 0,4 кВ. Селективность достигается согласованием тока и времени срабатывания максимальной токовой защиты трансформатора с отсечками выключателей НН. Это выполняет-

Таблица 31 Выбор автоматических выключателей по токам металлического к. з. и по «средним» токам с учетом токоограничивающего действия дуги

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя или расцепителя, А	Выбор выключателей при мощности трансформатора кВ · А									
		Вводов КТП и отходящих линий по токам металлического к. з.					Отходящих линий по токам к. з. с учетом дуги				
		2500	1600	1000	630	400	2500	1600	1000	630	400
Э40	4000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Э25; Э16,	2500, 1600;		+	+	+	+	+	+	+	+	+
Э06	1000		+	+	+	+	+	+	+	+	+
АВМ20;	1500;			+	+	+		+	+	+	+
АВМ15	1150			+	+	+		+	+	+	+
АВМ10;	800;				+	+			+	+	+
АВМ4	400*				+	+			+	+	+
АВМ4С	150					+					+
АВМ4С	120										
А3794С;	250—630;		+	+	+	+	+	+	+	+	+
А3794Б	250—630										
А3744С	630			+	+	+		+	+	+	+
А3734С	400				+	+			+	+	+
А3738Б	400		+	+	+	+	+	+	+	+	+
А3726Б;	250;			+	+	+			+	+	+
А3716Б	160			+	+	+			+	+	+
А3144	250—600				+	+			+	+	+
А3134	120—200					+				+	+
А3124	60—100										+
ВА55	1600, 4000	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА55	1000		+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА55	160—400			+	+	+			+	+	+
ВА54;	160—1000,	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА53	1000—1600	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА53;	160—630;		+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА52	400—630		+	+	+	+	+	+	+	+	+
ВА52;	100—400;			+	+	+			+	+	+
ВА51	400—630			+	+	+			+	+	+
ВА51	250—400			+	+	+			+	+	+
ВА51	120—250				+	+				+	+
ВА51	100										+

* Для всех выключателей кроме селективных с номинальным током расцепителя 150 А и менее.

Примечание. Данные для выключателей серий Э и АВМ — только выдвижного исполнения. Знак «+» обозначает, что выключатель является стойким при к. з.

ся при выборе рабочих уставок защит (см. § 8). При выборе автоматических выключателей следует предварительно убедиться, что такое согласование будет возможно. Для этого автоматические выключатели должны иметь защитную характеристику, не превосходящую предельную допустимую, которая определяется условиями согласования с предельной по чувствительности характеристикой защиты трансформатора.

По условию чувствительности ток срабатывания максимальной токовой защиты трансформатора $I_{с.з}$ не должен превосходить меньшего из двух значений, определяемых из условий отключения как металлического к. з., так и к. з. через переходные сопротивления

при соединении обмоток трансформатора Y/Y

$$I_{с.з} \leqslant 0{,}867 I^{(3)}_{к.мин}/1{,}5, \quad I_{с.з} \leqslant 0{,}867 I^{(3)}_{кR}/1{,}2; \qquad (46)$$

при соединении обмоток трансформатора Δ/Y (и трехрелейной схеме защиты)

$$I_{с.з} \leqslant I^{(3)}_{к.мин}/1{,}5, \quad I_{с.з} \leqslant I^{(3)}_{кR}/1{,}2, \qquad (47)$$

где 1,5 и 1,2 — наименьшие допустимые значения коэффициента чувствительности максимальной токовой защиты трансформатора при металлическом к. з. и к. з. через переходные сопротивления соответственно.

По условию селективности с максимальной токовой защитой трансформатора (ВН) ток срабатывания отсечки автоматических выключателей (НН) не должен превосходить значения

$$I_{с.о} \leqslant I_{с.з}/k_{н.с}, \qquad (48)$$

где $k_{н.с}$ — коэффициент надежности согласования, принимается по табл. 32 или выражению (49)

$$k_{н.с} = k_{р.б}\, k_{н.б}/(k_{р.м}\, k_{и.м}\, k_{ступ.м}), \qquad (49)$$

где $k_{р.б}$ — коэффициент, учитывающий разбросы срабатывания отсечки автоматического выключателя в сторону увеличения, принимается по справочным данным, $k_{р.м}$ — коэффициент, учитывающий разброс срабатывания реле защиты трансформа-

Таблица 32 Рекомендуемые значения $k_{н.с}$

Тип автоматического выключателя	Реле защиты трансформатора		
	РТ 40	РТ 80	РТВ
АВМ	1,2	1,25	1,35
А3100	1,25	1,3	1,4
А3700, ВА «Электрон»	1,4	1,5	1,55
	1,45	1,5	1,6

тора в сторону уменьшения, принимается равным 0,96; $k_{н.б}$ и $k_{н.м}$ — коэффициенты, учитывающие неточности измерений при наладке ниже и вышестоящей защиты, принимаются соответственно равными 1,02 и 0,98; $k_{ступ.м}$ — коэффициент, учитывающий погрешность тока срабатывания реле защиты трансформатора относительно уставки по шкале, учитывается только для реле РТ-80 и РТВ со ступенчатой регулировкой, принимается равным 0,95 и 0,9 соответственно.

Следует отметить, что для автоматических выключателей отходящих линий в условии (48) не учитывается, что при к. з. в сети 0,4 кВ через защиту трансформатора протекает сумма токов к. з. и нагрузки неповрежденных линий 0,4 кВ $I_{нагр}$. Это может вызвать излишнее отключение трансформатора при редких особо неблагоприятных случаях, когда ток к. з. настолько мал, что защита отходящей поврежденной линии находится на грани срабатывания, а значение $I_{нагр}$ достаточно велико. Чтобы учесть этот режим, из правой части неравенства (48) следовало бы вычесть значение $I_{нагр}$. Однако ввиду малой вероятности такого режима, неопределенности значения $I_{нагр}$ и наличия некоторых запасов в коэффициенте $k_{н.с}$ в правилах [13] при выборе уставок защит не предусмотрено учитывать влияние тока нагрузки.

По условию селективности с максимальной токовой защитой нулевой последовательности, устанавливаемой в цепи нейтрали трансформатора с низшим напряжением 0,4 кВ, ток срабатывания отсечки автоматических выключателей отходящих линий 0,4 кВ не должен превышать значения

$$I_{с.о} \leqslant I^{(1)}_{кR}/(k_ч\, k_{н.с}), \qquad (50)$$

где $I^{(1)}_{кR}$ — минимальный ток однофазного к. з. после трансформатора с учетом токоограничивающего действия электрической дуги в месте к. з. (переходных сопротивлений $R_д = 15$ мОм); $k_ч$ — наименьший коэффициент чувствительности защиты, для фильтровых защит принимается равным 1,5; $k_{н.с}$ — то же, что в выражении (48).

Если требуется применить автоматический выключатель, у которого $I_{с.о}$ больше, чем определяется условием (50), то для обеспечения селективности с токовой защитой нулевой последовательности трансформатора этот выключатель должен иметь либо выносную релейную, либо встроенную защиту от однофазных к. з. По условиям дальнего резервирования такими защитами предпочтительно оборудовать автоматические выключатели всех отходящих от шин КТП-0,4 кВ линий, при этом условие (50) не учитывается.

При наличии маломощного аварийного генератора 0,4 кВ также следует обеспечить селективность защиты отходящих линий 0,4 кВ и максимальной токовой защиты генератора. Максимальный допустимый ток срабатывания отсечек автоматических выключателей отходящих линий можно определить из условия их согласования с предельной по чувствительности характеристикой защиты генератора.

Пример 5. Для условий примера 1 определить, какие из автоматических выключателей серии А3700 и ВА отходящих от главных шин 0,4 кВ линий будут селективны с защитой трансформатора со стороны ВН, выполненной с помощью реле РТ-40.

Решение. Значения токов к. з. на шинах 0,4 кВ для проверки чувствительности защиты трансформатора: $I^{(3)}_{к\,мин} = 22{,}7$ кА, $I^{(3)}_{кR} = 12$ кА.

При соединении обмоток трансформатора Y/Y ток срабатывания его максимальной токовой защиты не должен превышать меньшего из значений, определяемых условием (46): $I_{с.з} \leqslant 0{,}867 \cdot 22{,}7/1{,}5 = 13{,}1$ кА; $I_{с.з} \leqslant 0{,}867 \cdot 11{,}7/1{,}2 = 8{,}45$ кА, окончательно $I_{с.з} \leqslant 8{,}45$ кА. Следовательно, можно применить автоматические выключатели, ток срабатывания отсечки которых не превышает значения $I_{с.о} \leqslant 8{,}45/1{,}4 = 6$ кА. При этом по условию (50) селективности с токовой защитой нулевой последовательности трансформатора все выключатели, имеющие $I_{с.о} \geqslant 6{,}6/(1{,}5 \cdot 1{,}4) = 3{,}1$ кА следует применять с встроенной или выносной защитой от однофазных к. з. (6,6 кА — ток однофазного к. з. за трансформатором, см. рис. П1, *в*).

При соединении обмоток трансформатора Δ/Y ток срабатывания его защиты не должен превышать значений, определяемых по формуле (47): $I_{с.з} \leqslant 22{,}7/1{,}5 = 15$ кА; $I_{с.з} \leqslant 11{,}7/1{,}2 = 9{,}75$ кА, окончательно $I_{с.з} \leqslant 9{,}75$ кА. Следовательно, можно применить автоматические выключатели, ток срабатывания отсечки которых не превышает $I_{с.о} \leqslant 9{,}75/1{,}4 = 7$ кА. По условию селективности с токовой защитой нулевой последовательности трансформатора встроенную или выносную защиту от однофазных к. з. должны иметь выключатели, у которых $I_{с.о} \geqslant 11{,}7/(1{,}5 \cdot 1{,}4) = 5{,}57$ кА (11,7 — ток однофазного к. з. за трансформатором, кА, см. рис. П1, *б*).

Пример 6. Определить, какие выключатели серий А3700 и ВА отходящих линий селективны с защитой аварийного генератора 0,4 кВ, параметры которого приведены в примере 3. Генератор имеет максимальную токовую защиту с независимой характеристикой, выполненную с помощью вторичных реле типа РТ-40.

Решение. Определяем установившийся ток трехфазного к. з. на зажимах генератора. К. з. на зажимах соответствует режиму предельного возбуждения. Для этого случая в примере 3 определены

значения ЭДС и сопротивление генератора: $E_{г\infty}=4000$ В, $x_{г\infty}=22{,}7$ мОм. Установившийся ток трехфазного к. з. по формуле (26): $I^{(3)}_{к\infty}=4000/(\sqrt{3}\cdot 322{,}7)=7{,}16$ кА. Его можно определить также по известному выражению, которое получается после подстановки (29) и (30) в (26) и соответствующих преобразований: $I^{(3)}_{к\infty}=ОКЗ\times I_{в\,пред}\cdot I_{н\,г}=0{,}63\cdot 10\cdot 1{,}138=7{,}16$ кА.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты генератора не может превышать значения $I_{с.з}\leqslant 7{,}16/1{,}5=4{,}77$ кА. Следовательно, для защиты отходящих линий можно применить выключатели, ток срабатывания отсечки которых не превышает $I_{о.п}\leqslant 4{,}77/1{,}4=3{,}4$ кА. Влияние переходных сопротивлений на значение тока к. з. здесь не учтено, поскольку оно несущественно.

Селективность автоматического выключателя и магнитного пускателя (контактора) присоединения. При к. з. в цепи данного присоединения начинают одновременно действовать защита выключателя и отключаться пускатель (контактор) вследствие исчезновения напряжения на втягивающей катушке. Во избежание приваривания контактов пускателя раньше должен отключиться выключатель. Такое селективное отключение обеспечивается для всех выключателей, имеющих малое время отключения (АП, А3100, А3700Б, А3700Ф, ВА51, ВА52, ВА53, ВА54). Для неселективных выключателей АВМ, полное время отключения которых составляет 0,06 с, а также для выключателей «Электрон» эта селективность обеспечивается только в случае применения пускателей (контакторов) IV и V величин.

6. ВЫБОР УСТАВОК АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Токовая отсечка. Токовую отсечку выключателя отстраивают от пускового тока электродвигателя, который состоит из периодической составляющей, почти неизменной в течение всего времени пуска, и апериодической составляющей, затухающей в течение нескольких периодов. В каталогах приводится только значение периодической составляющей пускового тока $I_{пуск.дв}$. Несрабатывание отсечки при пуске электродвигателя обеспечивается выбором тока срабатывания по выражению

$$I_{с.о}\geqslant 1{,}05 k_в k_а k_р I_{пуск.дв}=k_з I_{пуск.дв}, \qquad (51)$$

где $k_н=1{,}05\,k_в k_а k_р$ — коэффициент надежности отстройки отсечки от пускового тока электродвигателя; 1,05 — коэффициент, учитывающий, что в нормальном режиме напряжение может быть на 5 % выше номинального напряжения электродвигателя; $k_з$ — коэффициент запаса; $k_а$ — коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в пусковом токе электродвигателя; $k_р$ — коэффициент, учитывающий возможный разброс тока срабатывания отсечки относительно уставки.

Для приближенных расчетов принимают значение пускового тока электродвигателя, равным каталожному, а коэффициентов — по табл. 33.

Электромагнитные расцепители выключателей серий А3100, А3700, ВА, АП-50, АЕ20 имеют собственное время срабатывания примерно 5—10 мс и поэтому реагируют на апериодическую составляющую пускового тока электродвигателя. Собственное время срабатывания расцепителей выключателей серии АВМ составляет 20—40 мс, однако их массивный якорь приходит в движение при кратковременном броске апериодического тока и по инерции может отключить выключатель, даже если длительность броска тока меньше собственного времени срабатывания расцепителя. Полупроводниковый расце-

Таблица 33. Значения коэффициентов для расчета тока срабатывания отсечки автоматических выключателей, устанавливаемых в цепях электродвигателей

Автоматический выключатель	Расцепитель		$k_з$	$k_а$	$k_р$	$k_н$
А3700; А3790	Полупроводниковый	РП	1,1	1,0	1,3	1,5
ВА		БПР				
«Электрон»		РМТ			1,35	1,6
		МТЗ-1		1,4		2,2
АВМ	Электромагнитный			1,4	1,1	1,8
А3110; АП-50; А3700; ВА; АЕ20					1,3	2,1
А3120; А3130; А3140					1,15	1,9

питель серии МТЗ-1 также реагирует на апериодическую составляющую пускового тока. Соответственно значение $k_а$ для этих расцепителей принимают равным 1,4.

Полупроводниковые расцепители серий РП, БПР и РМТ не реагируют на апериодическую составляющую пускового тока в течение одного периода, причем за это время она почти полностью затухает. Соответственно значение $k_а$ принимают равным 1.

Токоограничивающие выключатели с полупроводниковым расцепителем имеют две отсечки: одну — с регулируемой на полупроводниковом реле уставкой; другую — электромагнитную с нерегулируемой уставкой. Первая — выбирается, а вторая — проверяется по условию (51).

Для точных расчетов следует определить значения $I_{пуск.дв}$ и $k_а$ с учетом влияния сопротивления внешней сети, что позволяет уменьшить значение $I_{с.о}$. Определяется суммарное индуктивное и активное сопротивление всей цепи, включая электродвигатель:

$$x_\Sigma = x_{вн} + x_{дв}; \quad r_\Sigma = r_{вн} + r_{дв}. \tag{52}$$

Определение составляющих сопротивления внешней сети (энергосистемы, понижающего трансформатора, кабелей) до зажимов электродвигателя $x_{вн}$ и $r_{вн}$ приведено в гл. 2. Индуктивное сопротивление двигателя при пуске $x_{дв}$ находят исходя из каталожного значения пускового тока двигателя $I_{пуск.кат}$ по выражениям

$$z_{дв} = U_{н.дв}/(\sqrt{3} I_{пуск.кат}); \tag{53}$$

$$x_{дв} = \sqrt{z_{дв}^2 - r_{дв}^2}. \tag{54}$$

Активное сопротивление двигателя $r_{дв}$ определяют ориентировочно по выражению

$$r_{дв} \approx (0{,}2 \div 0{,}3)\, z_{дв}. \tag{55}$$

Определяют отношение

$$\frac{x_\Sigma}{r_\Sigma} = \frac{x_{вн} + x_{дв}}{r_{вн} + r_{дв}}, \tag{56}$$

по которому находят значение $k_а$ так же, как значение ударного коэффициента при расчетах токов к.з. (см. § 2, стр. 23).

Определяют значение пускового тока электродвигателя с учетом влияния внешней сети

$$I_{пуск.дв} = I_{пуск.кат} \frac{z_{дв}}{\sqrt{(r_{вн} + r_{дв})^2 + (x_{вн} + x_{дв})^2}}. \tag{57}$$

В производственных условиях значение $I_{пуск.дв}$ рекомендуется определять опытным путем, а значение $k_а$ — как указано выше, учитывая в выражении (53) опытные значения $I_{пуск.дв}$ и напряжения на зажимах двигателя.

Коэффициент чувствительности отсечки при к.з. на выводах электродвигателя должен быть

$$k_ч^{(2)} = \frac{I_{кR}^{(2)}}{I_{с.о}} = \frac{0{,}867 I_{кR}^{(3)}}{I_{с.о}} \geqslant 1{,}1 k_р; \tag{58}$$

$$k_ч^{(1)} = I_{кR}^{(1)}/I_{с.о} \geqslant 1{,}1 k_р, \tag{59}$$

где $I_{кR}^{(2)}$ и $I_{кR}^{(1)}$ — соответственно минимальный ток двухфазного и однофазного к.з. на выводах электродвигателя с учетом токоограничивающего действия электрической дуги (переходных сопротивлений $R_п = 15$ мОм); 1,1 — коэффициент запаса; $k_р$ — коэффициент разброса срабатывания отсечки по току (см. табл. 33).

При отсутствии данных о разбросе произведение 1,1 $k_р$ (нормируемый коэффициент чувствительности) рекомендуется принимать не менее 1,4—1,5.

При недостаточной чувствительности к междуфазным к.з. выполняют одно из следующих мероприятий: уточняют значение $I_{с.о}$ с учетом влияния сопротивления внешней сети на пусковой ток электродвигателя; применяют другой тип автоматического выключателя; увеличивают сечение кабеля, но не более чем на 1—2 ступени; пересматривают первичную схему и место подключения электродвигателя; применяют выносную релейную защиту.

При недостаточной чувствительности к однофазным к.з. дополнительно к указанным выполняют следующие мероприятия: применяют другую конструкцию кабеля (с нулевой жилой, алюминиевой оболочкой); прокладывают дополнительные зануляющие металлические связи; применяют автоматический выключатель со встроенной защитой от однофазных к.з.; устанавливают специальную выносную релейную защиту от однофазных к.з.; возлагают отключение однофазных к.з. на защиту электродвигателя от перегрузки (зависимый элемент расцепителя). Последнее хоть и допускается ПУЭ, однако наименее предпочтительно, так как существенно затягивает

отключение к.з. Ток срабатывания встроенной или выносной защиты от однофазных к.з. принимают равным 0,5—1 номинального тока электродвигателя, коэффициент чувствительности этих защит должен быть не менее 1,5 [13].

Защита от перегрузки. Ток срабатывания защиты от перегрузки определяется из условия возврата защиты после окончания пуска или самозапуска электродвигателя:

$$I_{с.п} = \frac{k_в'}{k_в} I_{н.дв}, \qquad (60)$$

где $k_в$ — коэффициент надежности, учитывающий некоторый запас по току, неточности наладки и разброс срабатывания защиты; $k_в$ — коэффициент возврата защиты

Защита от перегрузки считается эффективной, если

$$I_{с.п} = (1{,}2 \div 1{,}4)\, I_{н.дв}. \qquad (61)$$

Для выключателей с тепловым и электромагнитным (комбинированным) расцепителем условие (60) обеспечивается автоматически при выборе номинального тока расцепителя по условию (44). Наилучшая защита от перегрузки обеспечивается, если удается подобрать выключатель, имеющий $I_{н.расц} = I_{н.дв}$. В этом случае, имея в виду, что для термобиметаллических тепловых реле $k_в = 1$, ток срабатывания защиты (пограничный ток) составит

$$I_{с.п} = k_н I_{н.расц} = k_н I_{н.дв},$$

где $k_н$ равен кратности тока $I_{с.п}/I_{н.расц}$ (1,15 для АЕ20, А3700; 1,25 для А3100, АП-50; 1,2 — 1,35 для ВА51 в зависимости от типа).

Номинальный ток теплового расцепителя и ток срабатывания защиты от перегрузки при температуре воздуха, отличной от нормированной, определяется по выражениям:

$$I_{н\,расц\,t} = I_{н\,расц}[1 + k_t (t_н - t)]; \qquad (62)$$

$$I_{с\,п\,t} = I_{с.п}[1 + k_t (t_н - t)], \qquad (63)$$

где k_t — температурный коэффициент, для А3700 равен 0,005, для А3100 — 0,0065; $t_н$ — нормированная температура окружающей среды, для А3700 принимается 40 °С, для А3100 — 25 °С; t — действительная температура окружающей среды, °С.

Для автоматических выключателей А3134 и А3144 условие (61) обычно не выполняется, защита от перегрузки не эффективна. Это вызвано тем, что кратность тока срабатывания отсечки этих выключателей недостаточна для отстройки от пусковых токов двигателей, поэтому приходится увеличивать номинальный ток расцепителя. Ток срабатывания отсечки по условию (51) с учетом кратности пускового тока 6—7 должен быть не менее $I_{с.о} = 1{,}9 \cdot (6 \div 7)\, I_{н.дв} = (11{,}4 \div 13{,}3)\, I_{н.дв}$. Учитывая, что $I_{с.о} = 7 I_{н.расц}$, следует выбирать выключатель, имеющий $I_{н.расц} = I_{с.о}/7 = (11{,}4 \div 13{,}3)\, I_{н\,дв}/7 = (1{,}6 \div 1{,}9)\, I_{н\,дв}$, при этом $I_{с.п} = 1{,}25 \cdot (1{,}6 \div 1{,}9)\, I_{н.дв} = (2 \div 2{,}4)\, I_{н.дв}$.

Все другие выключатели с комбинированным расцепителем, применяемые для защиты электродвигателей, имеют кратность срабатывания отсечки по отношению к номинальному току теплового расцепителя, равную 10 или более, поэтому для них отстройка от пусковых токов обычно не вызывает загрубления защиты от перегрузки.

Для автоматических выключателей АВМ и «Электрон» разбросы тока срабатывания и низкий коэффициент возврата защиты от перегрузки также приводят к ее загрублению и необходимости увеличивать номинальный ток расцепителя по отношению к номинальному току двигателя.

Для выключателей АВМ с электромагнитными расцепителями $k_н = k_з k_р' = 1{,}1 \cdot 1{,}1 = 1{,}2$ ($k_з$ и $k_р'$ — соответственно коэффициенты запаса и разброса срабатывания защиты от перегрузки), $k_в = 0{,}5 \div 0{,}6$, ток срабатывания защиты от перегрузки по формуле (60): $I_{с.п} = (2 \div 2{,}4)\, I_{н.дв}$. Учитывая, что ток срабатывания этой защиты регулируется в пределах $(1{,}25 \div 2{,}00)\, I_{н.расц}$, чтобы иметь возможность выставить любую уставку тока, вплоть до максимальной, следует выбирать выключатели, имеющие $I_{н.расц} \geqslant 1{,}2\, I_{н.дв}$.

Для выключателей «Электрон» с полупроводниковыми расцепителями МТЗ-1 и РМТ имеем $k_в = 0{,}75$; $k_р'$ в зависимости от сочетания влияющих на разброс факторов составляет 1,15—1,35. Соответственно $k_н = 1{,}1 \times (1 \cdot 1{,}15 \div 1{,}35) = 1{,}27 \div 1{,}49$, по формуле (60) находим $I_{с.п} = (1{,}69 \div 1{,}99)\, I_{н.дв}$.

Для выключателей «Электрон» с реле МТЗ-1 на шка-

ле регулировки выставляется ток срабатывания в относительных единицах, кратных номинальному току реле МТЗ $I_{\text{с.о}}=I_{\text{с.п}}/I_{\text{н.мтз}}$. Ток срабатывания регулируется в пределах $(0{,}8\div2)\ I_{\text{н.мтз}}$. Поэтому выключатель можно выбирать из условия $I_{\text{н.мтз}}\geqslant I_{\text{н.дв}}$.

Для выключателей «Электрон» с реле РМТ на шкале регулировки выставляется номинальный ток максимальной токовой защиты МТЗ. Его значение в 1,25 раза меньше тока срабатывания и может регулироваться в пределах $(0{,}80\div1{,}25)\ I_{\text{н.б}}$. Поскольку шкала откалибрована в относительных единицах, кратных номинальному базовому току, то с учетом полученного значения $I_{\text{с.п}}$ выставляется уставка $I_{\text{с.п}}/(1{,}25\ I_{\text{н.б}})$. Выключатель следует выбирать так, чтобы $I_{\text{н.б}}\geqslant 1{,}99\ I_{\text{н.дв}}/(1{,}25\cdot1{,}25)=1{,}27\ I_{\text{н.дв}}$.

Поскольку зависимые расцепители автоматических выключателей А3134, А3144, АВМ и «Электрон» не могут эффективно защищать электродвигатель от перегрузки, их используют как резервную защиту. Защита от перегрузки осуществляется либо с помощью тепловых реле, устаиавливаемых в двух фазах (при наличии магнитных пускателей или контакторов), либо с помощью выносной релейной защиты.

Для автоматических выключателей серии А3700 с полупроводниковым расцепителем РП $k_{\text{в}}=0{,}97\div0{,}98$; $k_{\text{р}}=1{,}15\div1{,}2$. Соответственно $k_{\text{н}}=1{,}1\cdot(1{,}15\div1{,}2)=1{,}27\div1{,}32$; по формуле (60) определяем $I_{\text{с.п}}=(1{,}3\div1{,}36)\ I_{\text{н.дв}}$. На шкале регулировки выставляется номинальный рабочий ток расцепителя $I_{\text{н.раб}}$. Его значение в 1,25 раза меньше $I_{\text{с.п}}$ и может регулироваться в пределах 0,8—1,25 базового номинального тока $I_{\text{н.б}}$. Чтобы иметь возможность защиты при любом полученном значении $I_{\text{с.п}}$, следует выбрать выключатель с базовым номинальным током в пределах от $I_{\text{н.б}}=1{,}36\ I_{\text{н.дв}}/(1{,}25\times1{,}25)=0{,}87\ I_{\text{н.дв}}$ до $I_{\text{н.б}}=1{,}3\ I_{\text{н.дв}}/(0{,}8\cdot1{,}25)=1{,}3\ I_{\text{н.дв}}$. При этом номинальный ток расцепителя (им считается наибольшее значение $I_{\text{н.раб}}$ по шкале) $I_{\text{н.расц}}=(1{,}09\div1{,}6)\ I_{\text{н.дв}}$.

Для автоматических выключателей серии ВА с полупроводниковым расцепителем БПР $k_{\text{в}}=0{,}97\div0{,}98$; $k_{\text{р}}=1{,}08—1{,}2$. Соответственно $k_{\text{н}}=1{,}1\cdot(1{,}08\div1{,}2)=1{,}19\div1{,}32$; по формуле (60) находим $I_{\text{с.п}}=(1{,}23\div1{,}36)\ I_{\text{н.дв}}$. На шкале регулировки выставляется номинальный

ток расцепителя. Его значение в 1,25 раза меньше $I_{\text{с.п}}$ и может регулироваться в пределах $(0{,}63\div1{,}0)\ I_{\text{н.в}}$. Чтобы иметь возможность защиты при любом полученном значении $I_{\text{с.п}}$, следует выбрать выключатель с номинальным током в пределах от $I_{\text{н.в}}=1{,}36\ I_{\text{н.дв}}/(1{,}0\times1{,}25)\approx1{,}09\ I_{\text{н.дв}}$ до $I_{\text{н.в}}=1{,}23\ I_{\text{н.дв}}/(0{,}63\cdot1{,}25)\approx1{,}6\ I_{\text{н.дв}}$.

При выборе уставки $I_{\text{н.расц}}$ для выключателей со ступенчатой регулировкой расчетное значение $I_{\text{н.расц}}=I_{\text{с.п}}/1{,}25$ может получиться несколько большим ближайшего меньшего имеющегося на шкале значения. В этих случаях во избежание чрезмерного загрубления тока срабатывания защиты от перегрузки следует исходить из того, что при определении $I_{\text{с.п}}$ по формуле (60) можно несколько уменьшить значение $k_{\text{н}}$. При определении $k_{\text{н}}=k_{\text{з}}k_{\text{р}}'$ можно значение $k_{\text{з}}$ принять от 1 до 1,1, имея в виду, что приведенные выше значения коэффициента разброса $k_{\text{р}}'$ указаны для наиболее неблагоприятных и достаточно редких сочетаний влияющих на разброс факторов.

Если кабели питания требуют защиты от перегрузки, то дополнительно учитывают условия (37)—(41).

Выбор времени срабатывания. Время срабатывания защиты от перегрузки принимается из условия несрабатывания защиты при пуске или самозапуске электродвигателя:

$$t_{\text{с.п}}\geqslant(1{,}5\div2)\,t_{\text{пуск}},\qquad(64)$$

где $t_{\text{с.п}}$ — время срабатывания защиты при токе, равном пусковому; $t_{\text{пуск}}$ — длительность пуска или самозапуска.

Время срабатывания защиты от перегрузки при токе $6I_{\text{н.расц}}$ регулируется для автоматических выключателей с полупроводниковыми расцепителями А3700, ВА53, ВА54, «Электрон» в пределах от 4 до 16 с, для АВМ — от 2 до 4 с. Для выключателей с комбинированным расцепителем оно не регулируется и составляет 8—20 с в зависимости от $I_{\text{н.расц}}$. Длительность пуска электродвигателей при легких условиях пуска составляет 0,5—2 с, при тяжелых — 5—10 с. Таким образом, несрабатывание защиты от перегрузки обеспечивается для всех выключателей, кроме АВМ, если он установлен в цепи двигателя с тяжелым пуском. В этом случае требуется во избежание излишних отключений выключателя загрублять защиту от перегрузки по току, принимая $I_{\text{с.п}}=2I_{\text{н.расц}}$, а иногда вообще выводить ее из работы за-

клинированием анкерной скобки часового механизма, предварительно проверив чувствительность отсечки при однофазных к. з.

Для особо ответственных электродвигателей, отключение которых при перегрузках недопустимо, защита от перегрузки (если она требуется) выполняется с действием на сигнал.

Проверка чувствительности при однофазных к. з. Если для отключения однофазных к. з. используется защита от перегрузки, то проверяется ее чувствительность. Значение коэффициента чувствительности при однофазном к. з. на зажимах электродвигателя должно быть:

для невзрывоопасной среды и выключателей с регулируемой защитной характеристикой

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = I_{\text{кR}}^{(1)} / I_{\text{с п}} \geqslant 3; \qquad (65)$$

для невзрывоопасной среды и выключателей с нерегулируемой защитной характеристикой

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = I_{\text{кR}}^{(1)} / I_{\text{н.расц}} \geqslant 3; \qquad (66)$$

для взрывоопасной среды

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = I_{\text{кR}}^{(1)} / I_{\text{н расц}} \geqslant 6. \qquad (67)$$

Пример 7. Шины 0,4 кВ питаются от трансформатора мощностью 630 кВ·А (Δ/Y, $u_{\text{к}}=5{,}5$ %), подключенного к мощной системе ($x_{\text{с}}=0{,}1\ x_{\text{т}}$). К шинам через автомат серии А3100 трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке сечением 3×95 мм² длиной 110 м подключен двигатель мощностью 75 кВт, с номинальным током 135 А и пусковым 865 А. Определить ток срабатывания отсечки автомата и уточнить его тип.

Решение. По формуле (51) имеем $I_{\text{с о}}=1{,}9\cdot 865=1650$ А, принимаем автомат А3144 с номинальным током комбинированного расцепителя 250 А и уставкой отсечки 1750 А. По графикам рис. П2, *в* приложения находим ток к. з. на зажимах двигателя $I_{\text{кR}}^{(3)}=3{,}5$ кА, ток однофазного к. з определяем по кривым рис. П9, *в* для четырехжильных кабелей в алюминиевой оболочке с учетом поправочного коэффициента 1,15: $I_{\text{кR}}^{(1)}=2{,}3/1{,}15=2$ кА. Нормируемый коэффициент чувствительности отсечки $k_{\text{ч}}=1{,}1\cdot 1{,}15=1{,}27$, фактический коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}^{(2)}=0{,}87\cdot 3{,}5/1{,}75=1{,}74$ — достаточен, $k_{\text{ч}}^{(1)}=2/1{,}75=1{,}14$ — недостаточен.

Уточним ток срабатывания отсечки с учетом влияния внешней сети. По табл. 1 $x_{\text{т}}=13{,}5$ мОм; $r_{\text{т}}=3{,}4$ мОм; $x_{\text{с}}=0{,}1\ x_{\text{т}}=1{,}35$ мОм. По формуле (6) имеем: $x_{\text{к}}=0{,}057\cdot 110=6{,}25$ мОм; $r_{\text{к}}=0{,}405\cdot 110=44{,}55$ мОм По (53)—(55) имеем: $z_{\text{дв}}=380/(\sqrt{3}\cdot 865)=0{,}253$ Ом $=253$ мОм; $r_{\text{дв}}=0{,}25\cdot 253=63$ мОм; $x_{\text{дв}}=\sqrt{253^2-63^2}=245$ мОм. Суммарное сопротивление цепи: $x_{\Sigma}=1{,}35+13{,}5+6{,}25+245=266$ мОм; $r_{\Sigma}=3{,}4+44{,}55+63=111$ мОм. По соотношению $x_{\Sigma}/r_{\Sigma}=266/111=2{,}4$ находим $k_{\text{а}}=1{,}27$. По формуле (57) $I_{\text{пуск дв}}=865\cdot 253/\sqrt{111^2+266^2}=760$ А. Уточненное значение тока срабатывания отсечки по формуле (51): $I_{\text{с о}}=1{,}05\cdot 1{,}1\cdot 1{,}27\cdot 1{,}15\cdot 760=1280$ А. Следовательно, можно применить автомат А3134 с комбинированным расцепителем 200 А и уставкой отсечки 1400 А. Тогда $k_{\text{ч}}^{(2)}=0{,}87\cdot 3{,}5/1{,}4=2{,}2$, $k_{\text{ч}}^{(1)}=2/1{,}4=1{,}43$ — достаточно.

7. ВЫБОР УСТАВОК АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПИТАНИЯ СБОРОК И ЩИТОВ

Выбор тока срабатывания отсечки. Выполняется по приводимым ниже условиям, из которых принимается наибольшее полученное значение.

1. Несрабатывание при максимальном рабочем токе $I_{\text{раб.макс}}$ с учетом его увеличения в $k_{\text{сзп}}$ раз при самозапуске электродвигателей:

$$I_{\text{с.о}} \geqslant 1{,}05 k_{\text{а}} k_{\text{в}} k_{\text{сзп}} I_{\text{раб.макс}} = k_{\text{н}} k_{\text{сзп}} I_{\text{раб.макс}}, \qquad (68)$$

где $k_{\text{н}}=1{,}05 k_{\text{а}} k_{\text{в}} k_{\text{т}}$ — коэффициент надежности, принимается по табл. 33.

Ток самозапуска $I_{\text{сзп}}=k_{\text{сзп}} I_{\text{раб макс}}$ определяется из расчетов самозапуска. Для секционного выключателя главного щита 0,4 кВ значение $I_{\text{сзп}}$ принимается 0,6—0,8 полного тока самозапуска через ввод; для отдельных сборок $I_{\text{сзп}}$ принимается приближенно равным сумме пусковых токов электродвигателей и другой нагрузки сборки, участвующих в самозапуске; для питающего трансформатора $I_{\text{раб макс}}=I_{\text{н.т}}$.

При отсутствии самозапуска электродвигателей или для нагрузки без пусковых токов (электрическое отопление, печи) $k_{\text{сзп}}=1$, $k_{\text{а}}=1$ ток срабатывания

$$I_{\text{с.о}} \geqslant k_{\text{н}} I_{\text{раб.макс}}, \qquad (68а)$$

где $k_{\text{н}}$ принимается для выключателей А3700, ВА, А3110, АП50, АЕ20 равным 1,5; «Электрон» — 1,6; для А3120, А3130, А3140, АВМ — 1,35.

2. Несрабатывание при полной нагрузке щита (сборки) и пуске наиболее мощного электродвигателя:

$$I_{\text{с.о}} \geqslant k_{\text{н}} \left(\sum_{1}^{n-1} I_{\text{раб.макс}i} + I_{\text{пуск макс}} \right), \qquad (69)$$

где $k_н$ — то же, что в (68); $\sum_{1}^{n-1} I_{раб.макс}$ — сумма максимальных рабочих токов электроприемников, питающихся от щита или сборки, кроме двигателя с наибольшим пусковым током $I_{пуск\ макс}$.

3 Несрабатывание защиты питающего секцию ввода (например, ввода секции *I* на рис. 1) при действии устройства АВР секционного выключателя, подключающего к этой секции или вводу нагрузку другой секции (секции *2* на рис. 1), потерявшей питание:

$$I_{с.о} \geqslant k_н \left(I_{сзп2} + k'_н I_{раб\ макс1}\right), \qquad (70)$$

где $k_н$ — то же, что в (68); $I_{сзп2}$ — максимальный ток самозапуска секции, потерявшей питание и включающейся от АВР; $I_{раб\ макс1}$ — максимальный рабочий ток не терявшей питание секции; $k'_н$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока двигателей не терявшей питание секции при снижении напряжения вследствие подключения самозапускающейся нагрузки другой секции, при преимущественно двигательной нагрузке принимается равным 1,5, при небольшой доле двигательной нагрузки принимается равным 1,0.

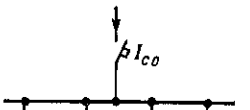
4. Согласование с отсечками выключателей отходящих от щита (сборки) линий, с целью предотвращения отключения автоматического выключателя питания щита (сборки) при к. з за выключателем отходящей линии, когда обе защиты могут находиться на грани срабатывания (в целях упрощения ток нагрузки сборки не учитывается):

$$I_{с.о} \geqslant k_{н.с} I_{с.о.л}, \qquad (71)$$

где $k_{н.с}$ — коэффициент надежности согласования, принимается равным 1,3—1,5; $I_{с.о.л}$ — наибольший из токов срабатывания отсечек выключателей отходящих линий, при параллельной работе этих линий (*3* и *4* на рис. 14) принимается равным сумме токов срабатывания отсечек их выключателей.

Точное значение $k_{н.с}$ можно определить, учитывая, что из-за разбросов ток срабатывания отсечки выключателя отходящей линии увеличивается в $k_{р.б}$ раз, а выключателя питания сборки — уменьшается в $k_{р.м}$ раз: $k_{н.с} = k_{р.б} k_{и.б} / (k_{р.м} k_{и.м})$, где $k_{и.б}$ и $k_{и.м}$ — то же, что в выражении (49). Например, при согласовании отсечки питающего сборку выключателя серии АВМ (разброс $\pm 10\ \%$, $k_{р.б} = 1 + 0{,}1 = 1{,}1$) с выключателем отходящей линии А3120 (разброс $\pm 15\ \%$, $k_{р.м} = 1 - 0{,}15 = 0{,}85$) $k_{н.с} \approx 1{,}1/0{,}85 = 1{,}3$ (значениями $k_{и.б}$ и $k_{и.м}$ пренебрегаем). Если выполнение условия (71) приводит к недопустимому снижению чувствительности защиты, то принимают пониженные значения $k_{н.с}$.

Рис. 14 К условию согласования токов срабатывания защиты



5. Для селективных выключателей с трехступенчатой защитной характеристикой учитывается дополнительное условие. Для селективного отключения к. з. на отходящей от сборки (щита) линии выключателем этой линии ток мгновенного срабатывания третьей ступени защиты $I_{с.мгн}$ питающего сборку (щит) выключателя должен быть больше максимального расчетного тока к. з. за выключателем отходящей от сборки (щита) линии $I^{(3)}_{к.р}$:

$$I_{с.мгн} > I^{(3)}_{к.р}. \qquad (72)$$

Для обеспечения селективности во всем диапазоне возможных токов к. з. значение $I^{(3)}_{к.р}$ принимают равным максимальному току металлического к. з. $I^{(3)}_{к\ макс}$. Если неселективные отключения при редких металлических к. з можно исключить, то $I^{(3)}_{к.р}$ принимают равным наиболее вероятному (среднему) току к з $I^{(3)}_{к\ ср}$, определяемому по выражению (12). Если условие (72) не выполняется, то вместо выключателя отходящей от сборки (щита) линии (или одновременно с ним) отключится питающий сборку (щит) выключатель.

Для выключателей А3790С $I_{с\ мгн} = 20$ кА (действующее значение), для ВА55 и ВА75 $I_{с.мгн}$ зависит от номинального тока и составляет 20—45 кА (см. табл 25). При проверке селективности необходимо убедиться, что расчетный ток к. з. за нижестоящими выключателями отходящих линий не превосходит указанных значений. Снижение тока до этих значений обычно обеспечивается при построении схемы с помощью сопротивлений пита-

ющих сборку кабелей или с помощью установки на отходящих от сборки (щита) линиях токоограничивающих выключателей. Если условие (72) не выполняется, а неселективные отключения недопустимы, то либо применяют другой тип автоматического выключателя, либо вместо встроенной в выключатель защиты применяют выносную релейную.

Для выключателей серии «Электрон» $I_{с.мгн}=2{,}2\,I_{с.о}$. С учетом условия (72) получаем, что для селективного отключения к. з. ток срабатывания отсечки этих выключателей должен быть не менее

$$I_{с.о} \geqslant k_р\, k_у\, I^{(3)}_{кр}/2{,}2, \qquad (73)$$

где $k_р$ — коэффициент разброса, равен 1,35; $I^{(3)}_{кр}$ — расчетный ток к.з. в точке за нижестоящим автоматическим выключателем, селективно с которым должен работать выключатель «Электрон»; $k_у$ — ударный коэффициент при к. з. в той же точке, учитывается только при применении выключателя «Электрон» с реле МТЗ-1, реагирующим на апериодическую составляющую тока.

Если выбранный по условию (73) ток срабатывания отсечки не обладает достаточной чувствительностью при к. з., то вместо максимального тока металлического к. з. в (73) подставляют значение среднего (наиболее вероятного) тока к з, не считаясь с редкими случаями неселективных отключений при металлических к. з. Если чувствительность при этом все же недостаточна, то следует уменьшить ток срабатывания отсечки, не считаясь с требованием селективности (если это допустимо в данной электроустановке), или выполнить релейную защиту на вторичных реле.

Чувствительность отсечек при к. з. проверяют по выражениям (58) и (59), в которых $I^{(2)}_{кR}$ и $I^{(1)}_{кR}$ — соответственно минимальный ток двух- и однофазного к. з. на защищаемом щите (сборке). При питании от маломощных генераторов и небольшой электрической удаленности точки к. з. ($x_{*расч}<0{,}65$) чувствительность защиты от междуфазных к. з, действующей с выдержкой времени, проверяется при установившемся токе трехфазного к. з.

При недостаточной чувствительности выполняют такие же мероприятия, как и при защите электродвигателей. Кроме того, можно уменьшить номинальный ток питающего сборку автоматического выключателя, отключив от нее часть электродвигателей и подключив их на другие сборки, или разделив сборку на две или более частей с самостоятельными линиями питания; отключать при самозапуске часть электродвигателей или обеспечить их поочередный самозапуск.

Выбор времени срабатывания отсечки. Если выключатели отходящих от сборки (щита) линий неселективные, то на выключателе питания сборки устанавливают минимальную уставку по шкале времени. Если выключатели отходящих линий селективные, то выдержка времени выключателя питания сборки (щита) определяется по выражению:

$$t_{с.о} \geqslant t_{с.о.д} + \Delta t, \qquad (74)$$

где $t_{с.о.д}$ — выдержка времени срабатывания отсечки выключателя отходящей от сборки (щита) линии; Δt — ступень селективности, слагается из времени инерционного выбега (в течение которого еще возможно отключение выключателя после прекращения к.з.), разброса и запаса, принимается для выключателей А3700С, ВА55, ВА75 равной 0,1—0,15 с; для серии «Электрон» — 0,2—0,25 с; для АВМ — 0,15 — 0,2 с.

Защита от перегрузки. Уставки и чувствительность защиты рассчитываются так же, как для электродвигателей, однако вместо $I_{н.дв}$ учитывается $I_{раб.макс}$. Для защиты вводов от трансформаторов принимают $I_{раб.макс}=(1{,}0—1{,}4)I_{н.т}$ с учетом допустимой перегрузки трансформаторов. Время действия защиты $t_{с.з}$ задается при токе самозапуска $I_{сап}$ или токе $\sum_{1}^{n} I_{раб.макс} + I_{сап.наиб}$ и принимается в 1,5—2 раза больше длительности самозапуска или пуска электродвигателей. Если защита от перегрузки используется для отключений однофазных к. з, то необходимо проверить ее чувствительность по выражениям (65), (66), (67), в которых $I^{(2)}_{кR}$ — ток однофазного к з. на защищаемой сборке (щите).

Встроенная защита от однофазных к. з. Встроенной защитой от однофазных к. з. могут снабжаться (по заказу) автоматические выключатели серии ВА с полупроводниковым расцепителем БПР. Ток срабатывания защиты не регулируется и составляет $(0{,}5—1)\,I_{н.расц}$, время срабатывания равно времени срабатывания отсечки и определяется условием (74), отдельная рукоятка регулировки времени отсутствует.

Применение этой встроенной защиты от однофазных к. з. для выключателей питания щита (сборки) не всегда возможно, так как отсутствие регулировки тока срабатывания не позволяет согласовать ее с токовыми защитами нулевой последовательности (при их отсутствии — с отсечками автоматических выключателей) отходящих от щита (сборки) линий и отстроить ее от несимметричной нагрузки (о выборе уставок защиты — см. § 9). Это может приводить к неселективным отключениям щита (сборки) при однофазных к. з. на отходящих линиях, а также и в рабочих режимах. Указанную встроенную защиту от однофазных к. з. для вводных выключателей щитов (сборок) рекомендуется применять в следующих случаях: если ток срабатывания защит нулевой последовательности (при их отсутствии — токовых отсечек выключателей) отходящих от щита (сборки) линий не превышает 0,4 $I_{\text{н.расц}}$ вводного выключателя; на вводных выключателях щитов (сборок) неответственных электроустановок, если неселективные отключения допустимы. В остальных случаях для отключения однофазных к. з. следует использовать выносную токовую релейную защиту нулевой последовательности, токовую отсечку выключателя или зависимый элемент расцепителя.

Пример 8. Шины КТП-0,4 кВ питаются от трансформатора мощностью 630 кВ·А (Δ/Y, $u_к=5{,}5$ %), подключенного к мощной энергосистеме ($x_0=0{,}1\ x_т$) От шин КТП через выключатель А3794С двумя параллельными кабелями сечения 3×185+1×50 с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке длиной 160 м питается сборка, к которой подключены шесть двигателей мощностью по 40 кВт, номинальным током 79,3 А и пусковым 555 А (рис. 15). Двигатели служат для привода центробежных насосов и не подвержены перегрузке. В цепях двигателей установлены выключатели АЕ2056, имеющие номинальный ток 100 А и ток срабатывания отсечки 1200 А. От сборки до двигателей проложены кабели сечением 3×35+1×16 длиной по 10 м. Одновременно могут работать, а также участвовать в самозапуске все двигатели. Рассчитать уставки автомата А3794С и выбрать его параметры.

Решение Определим ток самозапуска двигателей с учетом влияния сопротивления внешней сети Сопротивление элементов схемы: трансформатора $x_т=13{,}5$ мОм, $r_т=3{,}4$ мОм, питающей системы $x_с=1{,}35$ мОм; двух параллельных кабелей питания сборки определяем по формуле (6): $x_{к1}=0{,}056\cdot 160/2=4{,}48$ мОм, $r_{к1}=0{,}208\cdot 160/2=16{,}6$ мОм; шести параллельных кабелей от сборки до двигателей $x_{к2}=0{,}061\cdot 10/6=0{,}1$ мОм, $r_{к2}=1{,}1\cdot 10/6=1{,}83$ мОм; шести самозапускающихся двигателей определяем по формулам (53)—(55): $z_{дв.вка}=380\cdot 10^3/(\sqrt{3}\cdot 555\cdot 6)=66$ мОм; $r_{дв\ вка}=0{,}25\cdot 66=16{,}5$ мОм; $x_{дв\ вка}=\sqrt{66^2-16{,}5^2}=63{,}9$ мОм. Ток самозапуска шести двига-

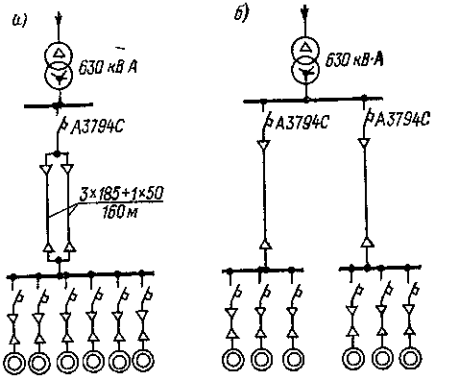


Рис. 15. Схема к примеру 8: *а* — до реконструкции; *б* — после реконструкции

телей найдем по формуле (57): $I_{сзп}=6\cdot 555\cdot 66/\sqrt{(3{,}4+16{,}6+1{,}83+16{,}5)^2+(1{,}35+13{,}5+4{,}48+0{,}1+63{,}9)^2}=2400$ А. Ток срабатывания отсечки выключателя А3794С: по условию (68) $I_{с.о}=1{,}6\cdot 2{,}4=3{,}6$ кА, по условию (71) $I_{с.о}=1{,}5\cdot 1{,}2=1{,}8$ кА, принимаем $I_{с.о}=3{,}6$ кА. Токи трехфазного и однофазного к. з. на сборке с учетом переходных сопротивлений (см. рис. П2, *в* и П9, *в*) составляют соответственно 5,7 и 4,3 кА. Чувствительность отсечки недостаточна: при двухфазном к. з. $k^{(2)}_{чR}=0{,}87\cdot 5{,}7/3{,}6=1{,}38$, т. е. меньше 1,43; при однофазном $k^{(1)}_{чR}=4{,}3/3{,}6=1{,}19$, т. е. меньше 1.43.

Для повышения чувствительности защиты можно выполнить одно из рекомендованных выше мероприятий: пересмотреть схему питания сборки. Разделим эту сборку на две отдельные сборки (от каждой из которой будут питаться по три двигателя), питание каждой из них осуществим по одному из существующих кабелей отдельных выключателей (рис. 16, *б*). Сопротивление каждого питающего кабеля до сборки составит $x_{к1}=8{,}96$ мОм; $r_{к1}=33{,}2$ мОм. Сопротивление трех параллельных кабелей от сборки до двигателей $x_{к2}=0{,}2$ мОм; $r_{к2}=3{,}66$ мОм. Сопротивление трех самозапускающихся двигателей $z_{дв\ вка}=132$ мОм, $r_{дв.вка}=33$ мОм, $x_{дв\ вка}=127{,}8$ мОм. Ток самозапуска трех двигателей составит 1300 А, ток срабатывания отсечки выключателя А3794С — $I_{с.о}=1{,}96$ кА. Токи к. з. на сборке $I^{(3)}_{кR}=4{,}0$ кА $I^{(1)}_{кR}=2{,}8$ кА Коэффициент чувствительности при двухфазном к. з $k^{(2)}_{чR}=0{,}87\cdot 4{,}0/1{,}96=1{,}77$; при однофазном к. з. $k^{(1)}_{чR}=2{,}8/1{,}96=1{,}43$ — достаточен. Ток срабатывания защиты от перегруз-

ки по условию (60) может быть принят $I_{с.р} = (1{,}1 \cdot 1{,}2/0{,}97) \cdot 3 \cdot 79{,}3 = 323$ А, а номинальный рабочий ток полупроводникового расцепителя (уставка по шкале) $I_{н.раб} = 323/1{,}25 = 260$ А.

Выбираем для установки в схему выключатель А3794С с номинальным током расцепителя 400 А, базовым номинальным током 320 А, номинальный рабочий ток которого регулируется в пределах 250—400 А, а ток срабатывания отсечки — в пределах (2—10) $I_{н.раб}$. Рабочие уставки для наладки: ток срабатывания защиты перегрузки 323 А (уставка по шкале номинального рабочего тока 260 А), время срабатывания принимаем 10 с при токе 1300 А из условия отстройки от длительности самозапуска. Ток срабатывания отсечки принимаем 1960 А (уставка по шкале 1960/260 = 7,6), время срабатывания по условию селективности 0,1 с.

Проверяем выполнение условия (72). Ток мгновенного срабатывания выключателя А3794С составляет 20 кА, что больше максимального тока трехфазного металлического к з на сборке, значение которого по кривым рис. П2, *в* составляет 5,3 кА. Таким образом, условие (72) выполняется.

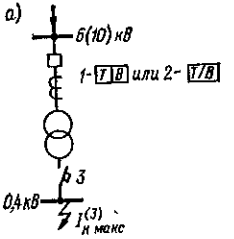
На первый взгляд кажется странным, что с помощью разделения нагрузок удалось обеспечить необходимую чувствительность защиты — ведь суммарное сечение, длина и нагрузка кабелей не изменились! Указанный эффект получился в результате алектрического удаления места к. з. на сборке, при котором уменьшение тока к. з из-за влияния переходных сопротивлений существенно меньше, чем уменьшение тока самозапуска. В самом деле, ток самозапуска уменьшился в 1,85 раза а минимальный ток трехфазного к. з — в 1,42 раза. Этот пример показывает, насколько значительно схемное решение влияет на возможности осуществления защиты сети.

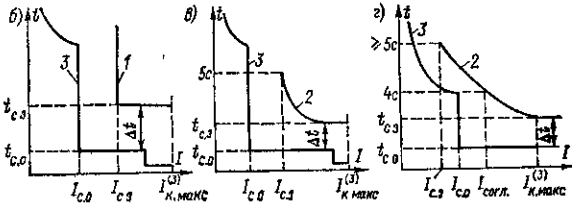
8. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ НА ВВОДНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ КТП

Согласование защит трансформатора и выключателей со стороны 0,4 кВ. Необходимо обеспечить селективность последовательно включенных защит выключателей отходящей от шин КТП линии, секционного и вводного КТП, трансформатора со стороны ВН. Для этого уставки защит выключателей 0,4 кВ согласуются между собой по выражениям (71) и (74). Защиту трансформатора согласуют с вводным или хотя бы с секционным выключателем, а если это невозможно (см. далее) — то с выключателями отходящих линий.

Для наглядности согласования используют карты селективности (рис. 16), на которых в одинаковом масштабе (например, в токе, приведенном к напряжению 0,4 кВ) строят времятоковые характеристики согласуемых защит. Селективность должна быть обеспечена при любых значениях тока вплоть до максимального тока

Рис. 16. Согласование релейной защиты трансформатора с автоматическими выключателями 0,4 кВ: *а* — поясняющая схема; *б* — *г* — карты селективности защит





металлического трехфазного к. з. $I^{(3)}_{к\,макс}$ за нижестоящим защитным аппаратом, или по крайней мере до наиболее вероятного расчетного значения тока к. з., определяемого по формуле (12).

Согласование релейной защиты трансформатора, выполненной с помощью реле типа РТ-40 и ЭВ и имеющей независимую от тока выдержку времени (характеристика 1), с защитными характеристиками автоматических выключателей 0,4 кВ показано на рис. 16, *б*. Максимальная токовая защита трансформатора обычно имеет выдержку времени $t_{с.з}$ примерно 1 с. Как видно из характеристик, согласование возможно только в области токов, превышающих ток срабатывания отсечки выключателя 0,4 кВ.

Согласование релейной защиты трансформатора, выполненной с помощью реле типов РТ-80, РТВ и имеющей зависимую от тока выдержку времени (характеристика *2*) с защитными характеристиками выключателей типов А3790, «Электрон», ВА (характеристика *3*) показано на рис. 16, *в*. Максимальная токовая защита транс-

форматора имеет выдержку времени $t_{с.з}$ на независимой части характеристики не более 1—2 с, что соответствует времени срабатывания реле РТВ и РТ-80, равному 5—10 с при токе срабатывания. За расчетное время принимается 5 с при токе срабатывания. Это время меньше, чем время срабатывания защиты автоматического выключателя в конце зоны перегрузки, которое составляет обычно более 5—10 с. Поэтому, как видно из рис. 16, *в*, согласование также возможно только в области токов, превышающих ток срабатывания отсечки.

В указанных случаях уставки срабатывания релейной защиты трансформатора по условию согласования с защитными характеристиками автоматических выключателей КТП определяют по выражениям:

$$I_{с.з} \geqslant k_{н.с} I_{с.о}; \tag{75}$$

$$t_{с.з} \geqslant t_{с.о} + \Delta t, \tag{76}$$

где $k_{н.с}$ — коэффициент надежности согласования, принимается по табл. 32; $I_{с.о}$ и $t_{с.о}$ — соответственно ток и время срабатывания отсечки автоматического выключателя, с защитой которого производится согласование; Δt — ступень селективности, для защиты с независимой характеристикой принимается 0,4—0,5 с, для защиты с зависимой от тока характеристикой принимается в независимой части характеристики 0,5—0,6 с, в зависимой — не менее 1 с.

В задании на наладку защиты время $t_{с.з}$ задается: для защиты с независимой характеристикой — при токе $I_{с.з}$ (или $2I_{с.з}$); для защиты с зависимой характеристикой — при токе $I^{(3)}_{к.макс}$ или $I^{(3)}_{к.ср}$ за автоматическим выключателем, с защитой которого производится согласование.

Выражение (75) является только одним из условий выбора тока срабатывания защиты трансформатора. О других условиях (отстройки от максимального рабочего тока с учетом самозапуска электродвигателей, обеспечения чувствительности защиты) см. работу [20].

Согласование релейной защиты трансформатора, имеющей зависимую характеристику, с автоматическими выключателями 0,4 кВ серии АВМ показано на рис. 16, *г*. Время срабатывания защиты от перегрузки этих выключателей при токе, близком к току срабатывания отсечки, не превышает 4 с, т. е. меньше, чем время срабатывания защиты трансформатора в начале защитной характеристики. Поэтому ток срабатывания защиты трансформатора может быть принят равным или даже несколько меньше тока срабатывания отсечки автомата, важно лишь обеспечить соответствующие ступени селективности по току и времени в любых точках защитных характеристик.

Пример 9. Со стороны 0,4 кВ трансформатора $Y/Y_н$ мощностью 1000 кВ·А, $u_к$=5,5 % установлен вводный выключатель АВМ-20СВ с номинальным током расцепителя 1600 А и уставками $I_{с.р}=3000$ А, $t_{с.р}=t_{макс}$ (по шкале), $I_{с.о}=8$ кА, $t_{с.о}=0{,}4$ с. Со стороны ВН установлена максимальная токовая защита, выполненная в двух фазах на реле РТ-80. Выбрать уставки ее срабатывания по условию согласования с защитной характеристикой выключателя АВМ.

Решение. Принимаем характеристику реле РТ-80 защиты трансформатора с выдержкой времени 1 с на независимой части характеристики (см. работы [10, 15, 20], справочники по реле защит). Время срабатывания защиты от перегрузки выключателя АВМ при токе 8 кА не превышает 4 с (рис. 16, *г*). Назовем ток, при котором защита трансформатора срабатывает в течение 4 с, током согласования. Для надежного согласования защит ток согласования, с одной стороны, должен быть равен $I_{согл}=k_{в.с}I_{с.о}=1{,}25\ I_{с.о}$. С другой стороны, по принятой защитной характеристике реле РТ-80 устанавливаем, что в течение 4 с защита срабатывает при кратности тока в реле 150 %, таким образом, $I_{сраб}=1{,}5\ I_{с.з}$. Приравнивая правые части полученных уравнений, имеем $I_{с.з}=(1{,}25/1{,}5)\ I_{с.о}=0{,}83\times I_{с.о}=0{,}83\cdot 8=6{,}7$ кА. По защитной характеристике реле строим характеристику защиты трансформатора: при 1,5-кратном токе (1,5·6,7=10 кА) реле сработает за 4 с; при двухкратном токе (2·6,7=13,4 кА) — за 2 с; при трехкратном токе (3·6,7=20 кА) — за 1,2 с; при четырехкратном токе (4·6,7=26,8 кА) — за 1 с. Построив характеристику защиты трансформатора, убеждаемся, что ступени селективности по времени вполне достаточны: при токе 8 кА составляют примерно 6—4=2 с, при максимальном токе к. з. за выключателем АВМ (24 кА) 1—0,4=0,6 с. Контрольные точки для наладки защиты трансформатора: $I_{с.з}=6{,}7$ кА (0,4 кВ); $t_{с.з}=1$ с при токе 24 кА; $t_{с.з}\geqslant 5$ с при токе 8 кА (0,4 кВ); $t_{с.з}\geqslant 4$ с при токе $I_{согл}=1{,}25\cdot 8=10$ кА (0,4 кВ). Выбор тока срабатывания электромагнитного элемента реле РТ-80 здесь не рассматривается.

Коэффициент чувствительности защиты при междуфазных к. з. через переходные сопротивления даже при китании от мощной энергосистемы ($x_с=0{,}1\ x_т$) близок к минимальному допустимому значению: для отсечки автомата $k^{(2)}_{чR}=0{,}87\cdot 12/8=1{,}3$, для защиты трансформатора $k^{(2)}_{чR}=0{,}87\cdot 12/6{,}7=1{,}56$. Поэтому при выборе тока срабатывания максимальной токовой защиты трансформатора часто отказываются от согласования с защитой вводного выключателя АВМ, а учитывают только условия отстройки от максимального рабочего тока, самозапуска электродвигателей и согласования с защитами отходящих от шин 0,4 кВ линий.

При защите трансформатора высоковольтными предохранителями номинальный ток плавкой вставки обычно выбирают из условия $I_{н.вс} \approx 2I_{н.т}$. Селективность проверяют аналогично, сопоставляя защитные характеристики высоковольтного предохранителя (с учетом возможного 20 %-ного разброса срабатывания по току) и автоматических выключателей 0,4 кВ.

Особенности защиты КТП с вводными выключателями АВМ. Выключатели АВМ имеют слишком высокий нижний предел и малый диапазон регулирования тока срабатывания отсечки (8—10 кА). Из-за этого в большинстве случаев невозможно обеспечить чувствительность отсечек секционного и вводного автоматических выключателей КТП при к. з. через переходные сопротивления и их селективность с релейной защитой трансформатора со стороны ВН.

Пример 10. Выполним анализ защит КТП с двумя трансформаторами мощностью 630 кВ·А, $u_к$=5,5 % (см. рис. 1). Вводный и секционный выключатели КТП типа АВМ-15С (номинальный ток расцепителя 1000 А) имеют защиту от перегрузки и отсечку со следующими пределами регулирования: $I_{с.з}$=1250÷2000 А, $t_{с.з}$= =$t_{мин}$—$t_{ср}$—$t_{макс}$ (по шкале), что соответствует примерно 2—4 с на независимой части характеристики защиты от перегрузки; $I_{с.о}$=8÷ ÷10 кА, $t_{с.о}$=0,4÷0,6 с. Исходя из пределов регулирования уставок, условий селективности секционного и вводного выключателей и наилучшей отстройки от токов самозапуска, можно однозначно, без расчетов принять следующие уставки: на секционном выключателе $I_{с.з}$=1500 А, $t_{с.з}$=$t_{ср}$, $I_{с.о}$=8 кА, $t_{с.о}$=0,4 с; на вводном $I_{с.з}$=2000 А, $t_{с.з}$=$t_{макс}$, $I_{с.о}$=10 кА, $t_{с.о}$=0,6 с. Характеристики защит показаны на рис. 17.

Со стороны высокого напряжения могут быть установлены максимальные токовые защиты с независимой или зависимой характеристикой. В общем случае их ток срабатывания, выбранный с учетом отстройки от токов самозапуска и согласования с защитами отходящих линий 0,4 кВ, может составлять (2—5) $I_{н.т}$ ($I_{н.т}$=910 А — номинальный ток трансформатора со стороны 0,4 кВ); время срабатывания обычно составляет не более 1 с на независимой части характеристики (рис. 17).

Как видно из приведенных характеристик, защита со стороны высокого напряжения неселективна не только с вводным, но даже с секционным выключателем АВМ. В результате при возникновении к. з. на одной из секций 0,4 кВ (или отходящей линии при отказе автомата линии) может отключиться один трансформатор, а после АВР — другой. При одностороннем питании и к. з. за секционным автоматом также возможно погашение всей подстанции. Увеличение тока срабатывания защиты трансформатора с целью обеспечения селективности с секционным автоматом приводит для защиты с независимой характеристикой к недопустимому снижению чувствительности защиты, для защит с зависимой характеристикой — к чрезмерному увеличению тока срабатывания (до 6 $I_{в.т}$), при котором чувствительность защиты находится на пределах допустимых значений, а при питании от маломощной системы — ниже нормы.

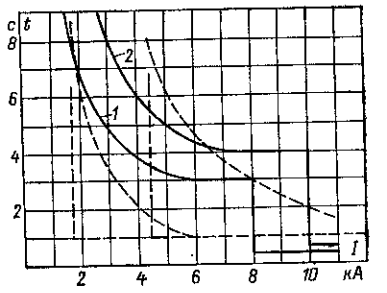


Рис. 17. Карта селективности защит к примеру 10: штриховые линии — возможные характеристики максимальной токовой защиты трансформатора со стороны ВН

1 — секционный автомат; *2* — вводный

Чувствительность отсечки вводного и секционного автоматов при к. з. на шинах через переходные сопротивления не обеспечивается даже при питании от мощной энергосистемы: для вводного $k^{(2)}_{чR}$ = =0,867·9,8/10=0,85, что меньше 1,21; для секционного $k^{(2)}_{чR}$=0,867× ×9,8/8=1,07, т. е. меньше 1,21.

Поэтому от согласования защиты трансформатора с этими выключателями приходится отказываться и согласовывать ее только с защитами отходящих от шин 0,4 кВ линий. При этом релейная защита трансформатора обладает более высокой (по сравнению с вводным и секционным выключателями) чувствительностью и обеспечивает отключение минимальных токов к. з. через переходные сопротивления.

Иногда для повышения чувствительности отсечки вводного и секционного выключателей АВМ используют регулировку за пределами заводской шкалы уставок, с помощью которой удается снизить ток срабатывания до 7 кА. В установках с малым током самозапуска для обеспечения селективности защиты секционного автомата с защитой трансформатора из часового механизма защиты от перегрузки вынимают анкерную скобку, а уставку по шкале времени (и тока) принимают максимальной. При этом защита от перегрузки превраща-

ется в селективную отсечку с малым током срабатывания, время срабатывания которой в зависимости от тока составляет: при $I_{с.п}$—0,7÷1,5 с; при 1,25 $I_{с.п}$ — 0,5 с; при 1,9 $I_{с.п}$ — 0,3 с; при 2,5 $I_{с.п}$ — 0,2 с.

Защита от перегрузки этих выключателей имеет слишком малое время срабатывания (2—4 с на независимой части характеристики) и низкий коэффициент возврата (0,5—0,6), что может приводить к излишним отключениям при самозапуске электродвигателей. В этом случае принимают максимальную уставку этой защиты по току и времени, а иногда вообще выводят ее из работы (см. § 6).

Особенности защиты КТП с вводными выключателями «Электрон». Расцепители этих выключателей имеют высокий нижний предел регулирования тока срабатывания отсечки, большие разбросы срабатывания и низкий коэффициент возврата. Это приводит к загрублению тока срабатывания защиты от перегрузки, не позволяет в некоторых случаях обеспечить чувствительность отсечки и ее селективность с защитой трансформатора со стороны ВН.

Значение тока мгновенного срабатывания третьей ступени защиты слишком мало ($2{,}2\,I_{с.о}$). Поэтому выполнить одновременно требования селективности с защитами отходящих линий 0,4 кВ и чувствительности защиты также не удается. Например, ток срабатывания отсечки $I_{с.о}$ по условию (73) селективности с защитами отходящих линий 0,4 кВ должен быть не менее $1{,}35\,I^{(3)}_{к\,макс}/2{,}2=0{,}61\,I^{(3)}_{к\,макс}$, а по условию чувствительности не более $0{,}867\,I^{(3)}_{кR}/1{,}5=0{,}58\,I^{(3)}_{кR}$, причем $I^{(3)}_{кR} < I^{(3)}_{к\,макс}$. На практике при выборе уставок иногда приходится предпочесть либо селективность действия, либо обеспечение чувствительности. Для электроустановок, в которых последствия неселективных отключений очень велики, определяющим при выборе уставок вводного автомата КТП будет условие селективности, а отключение минимальных токов к. з. на шинах 0,4 кВ и резервирование защит отходящих линий возлагают на релейную защиту трансформатора, установленную со стороны ВН. При этом от согласования защиты трансформатора с защитой вводного выключателя «Электрон» приходится отказаться. Для электроустановок, в которых можно не считаться с неселективными отключениями, условия (72) и (73) не учитывают, определяющим здесь будет условие чувствительности.

Пример 11. Для схемы на рис. 1 выбрать вводный и секционный выключатели КТП типа «Электрон» с реле РМТ и рассчитать их уставки исходя из условия наименьших неселективных погашений КТП. Мощность трансформаторов принять 1600 кВ·А, соединение обмоток Δ/Y, $I_{н.т}$=2300 А, ток самозапуска нагрузки 5 кА. Сопротивление питающей энергосистемы $x_с=0{,}1\,x_т$. Отходящие линии оснащены выключателями А3790. Наибольший ток срабатывания отсечки отходящих линий 2,5 кА, время срабатывания — 0,1 с.

Р е ш е н и е. Ток срабатывания защиты от перегрузки вводного выключателя по формуле (60) $I_{с.з}=1{,}1\cdot1{,}35\cdot2300/0{,}75=4550$ А. Уставка номинального тока МТЗ $I_{н.мтз}=4550/1{,}25=3640$ А. Подходит выключатель Э40В с номинальным базовым током $I_{в.с}=4000$ А, уставка номинального тока по шкале 3640/4000≈0,9. Уставку по шкале времени принимаем 4 с при токе 6 $I_{н.мтз}$, что достаточно для отстройки от длительности самозапуска нагрузки [по характеристике на рис. 10 выключатель при токе 5 кА (кратности 5/3,64≈1,4) отключится через 200 с].

Ток срабатывания селективной отсечки вводного выключателя по условию несрабатывания при самозапуске (68) $I_{с.о}=1{,}6\cdot5=8{,}0$ кА; по условию согласования с отсечками выключателей отходящих линий (71) $I_{с.о}=1{,}5\cdot2{,}5=3{,}75$ кА.

Далее рассматриваем условие селективности (73) с защитами отходящих от шин КТП линий 0,4 кВ. Учитывая, что металлических к. з. почти не бывает, обеспечиваем селективность только при наиболее вероятном расчетном токе $I^{(3)}_{к\,ср}$, значение которого определяется по формуле (12). По кривым рис. П1, *а*, *б* находим токи к. з. в начале отходящих линий (практически это к. з. на шинах КТП): $I^{(3)}_{к\,макс}=38$ кА, $I^{(3)}_{кR}=I^{(1)}_{кR}=13{,}5$ кА. По формуле (12) $I^{(3)}_{к.ср}=(38+13{,}5)/2=25{,}8$ кА. Тогда по формуле (73) $I_{с.о}=1{,}35\cdot25{,}8/2{,}2=15{,}8$ кА.

Окончательно принимаем $I_{с.о}$=15,8 кА, уставка по шкале 15,8/3,64=4,3. Чувствительность отсечки не обеспечивается: $k^{(2)}_{кR}=0{,}87\cdot13{,}5/15{,}7=0{,}75$, т. е. меньше 1,48. Поэтому возлагаем отключение этих к. з. на релейную защиту трансформатора со стороны ВН. Ток ее срабатывания, рассчитанный по условиям несрабатывания при максимальном рабочем токе с учетом самозапуска электродвигателей и согласования с защитами отходящих от шин 0,4 кВ линий по выражениям, приведенным в работе [20], составляет 7,5 кА, а чувствительность (при трехрелейной схеме защиты) $k^{(2)}_{кR}=13{,}5/7{,}5=1{,}8$, т. е. больше 1,5.

Учитывая малую вероятность возникновения к. з. в начале отходящих от КТП линий и значительно большую вероятность возникновения к. з. на сборках (сборки *1*—*4* на рис. 1) и отходящих от сборок линиях, иногда обеспечивают селективность вводного выключателя по условию (73) только при к. з. на этих сборках. В этом случае в выражение (73) подставляют значение тока к. з $I^{(3)}_{к.макс}$ или $I^{(3)}_{к\,ср}$ при к. з. на ближайшей (электрически) от КТП сборке.

Отметим, что если не учитывать условие (73) селективности с вводного выключаталя Э40В с защитами отходящих от КТП ли-

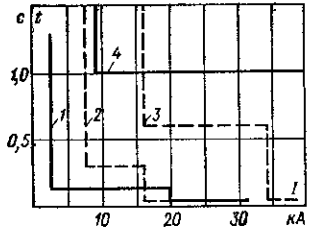


Рис. 18. Карта селективности защит к примеру 11

1, 2, 3 — автоматы 0,4 кВ КТП отходящей линии, секционный и вводный соответственно; *4* — максимальная токовая защита трансформатора

ний, то ток срабатывания его отсечки можно было бы снизить от 15,7 кА до 8 кА. Однако по шкале можно выставить только $3\times3{,}64=10{,}9$ кА.

Определяем ток срабатывания защиты от перегрузки секционного выключателя, считая, что через него проходит 0,7 номинального тока трансформатора: $I_{с.п}=1{,}1\cdot1{,}35\cdot0{,}7\cdot2300/0{,}75=3190$ А. Уставка номинального МТЗ $I_{н\,мтз}=3190/1{,}25=2500$ А. Делаем вывод, что подходит выключатель Э25В, имеющий номинальный базовый ток $I_{н\,с}=2500$ А. Уставка номинального тока по шкале равна 1. Время срабатывания принимаем 4 с при токе 6 $I_{н\,тмз}$ (по характеристикам на рис. 10 — примерно 100 с при токе 5 кА).

Ток срабатывания селективной отсечки секционного автомата по условию (68) $I_{с\,о}=1{,}6\cdot0{,}7\cdot5=5{,}6$ кА, по условию (71) $I_{о\,о}=1{,}5\times2{,}5=3{,}75$ кА. Принимаем минимальную уставку по шкале, равную $3\ I_{н\,мтз}=3\cdot2{,}5=7{,}5$ кА. Условие селективности с защитами отходящих линий (73) для секционного автомата не рассматриваем, учитывая, что в сравнительно редком режиме работы с включенным секционным выключателем важнее обеспечить селективность с защитой трансформатора. Для этого ток срабатывания защиты трансформатора по условию согласования с отсечкой секционного выключателя придется несколько увеличить, приняв его равным 8—9 кА, что допустимо по условию чувствительности.

Время срабатывания селективной отсечки выключателей по условию (74) принимаем: секционного — 0,45; вводного — 0,7 с. Время срабатывания максимальной токовой защиты трансформатора — 1 с. Характеристики защит показаны на рис. 18.

Особенности защиты КТП с вводными выключателями серии ВА. Защитные характеристики этих выключателей значительно лучше, чем выключателей АВМ и «Электрон», поэтому выбор уставок не вызывает затруднений. К недостаткам относятся разбросы тока срабатывания и отсутствие регулировки тока срабатываиия встроенной защиты от однофазных к. з. (см. § 7).

9. ВЫНОСНАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ЩИТОВ И СБОРОК

Защита электродвигателей от всех видов к. з. и перегрузки (рис. 19). Применяется, если встроенные в автоматический выключатель защиты недостаточно чувствительны. Токовая отсечка от междуфазных к. з. (реле *КА1*, *КА3*) и защита от однофазных к. з. (реле *КА4*) действуют на отключение выключателя *Q* (независимый расцепитель *YAT*) без выдержки времени. Реле *КА4* включено на фильтр токов нулевой последовательности (в нулевой провод трех трансформаторов тока) и поэтому реагирует только на ток замыкания на землю. Защита от перегрузки (реле *КА2*) действует с выдержкой времени на отключение или на сигнал (в последнем случае контакт *КТ* включается в цепь сигнализации). Шинки переменного оперативного тока ~*ШУ* питаются от трех независимых источников, при их отсутствии применяется постоянный оперативный ток от аккумуляторной батареи.

Ток срабатывания токовой отсечки определяется по выражению (51), в котором принимается $k_н=1{,}4\div1{,}5$. Коэффициент чувствительности при двухфазном металлическом к. з. на зажимах электродвигателя должен быть не менее 1,5, допускается его снижение до 1,2 при к. з. через переходные сопротивления: $k_ч^{(2)}=0{,}867\,I^{(3)}_{к\,мин}/I_{с.о}$, т. е. больше или равно 1,5; $k_{чR}^{(2)}=0{,}867\,I^{(3)}_{кR}/I_{с.о}$, т. е. больше или равно 1,2.

Ток срабатывания защиты от однофазных к. з. выбирается из условия отстройки от тока небаланса фильтра токов нулевой последовательности, возникающего вследствие неодинаковых характеристик трансформаторов тока, возможной несимметрии напряжений и токов фаз [17]. С учетом увеличения тока небаланса при пуске электродвигателя ток срабатывания защиты принимается равным $(0{,}5—1{,}0)\,I_{н\,дв}$. Поскольку эта защита по принципу действия не требует отстройки от пускового тока электродвигателя, то выигрыш в чувствительности по сравнению с токовой отсечкой получается весьма существенным. Коэффициент чувствительности при однофазном к. з. через переходные сопротивления на зажимах электродвигателя должен быть не менее 1,5: $k_{чR}^{(1)}=I_{кR}^{(1)}/I_{с.з}$, т. е. больше или равно 1,5.

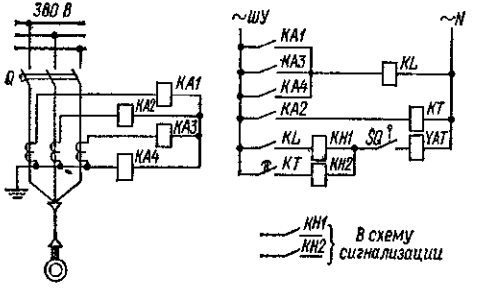


Рис. 19 Релейная защита электродвигателя от междуфазных и однофазных к. з. и перегрузки

КА1—КА4 — реле тока РТ-40; *КТ* — реле времени ЭВ-247; *KL* — промежуточное реле РП-25; *КН1, КН2* — реле указательные РУ-21/0,5

Ток срабатывания защиты от перегрузки определяется по выражению (60), в котором принимаются $k_н = 1{,}05 \div 1{,}1$; $k_в = 0{,}8$; время срабатывания — по формуле (64).

Защита электродвигателей от однофазных к. з. (рис. 20). Применяется, если встроенные в автоматический выключатель защиты не обеспечивают отключение однофазных к. з. Для защиты устанавливают трансформатор тока нулевой последовательности ТТНП типа ТЗЛМ (ТЗЛ, ТЗР, ТКР), сквозь окно которого пропускают все три фазы кабеля, и токовое реле КА типа РТ-40 с номинальным током 0,2; 2 или 6 А. Для обеспечения максимальной чувствительности защиты к каждому ТТНП подбирают соответствующее токовое реле, имеющее подходящее сопротивление. Первичный ток срабатывания защиты в зависимости от типа токового реле составляет 5—150 А, рекомендуется $I_{с.з} = (0{,}5 \div 1{,}0)\, I_{н.дв}$. Коэффициент чувствительности защиты при к. з. на выводах двигателя должен быть не менее 1,5. Схема может выполняться на переменном или постоянном оперативном токе, соответственно подбираются и параметры реле *KL*, *КН* и независимого расцепителя *YAT*.

Если разделка кабеля выполнена между ТТНП и автоматическим выключателем, то для предотвращения излишних отключений при к. з. на соседних линиях или

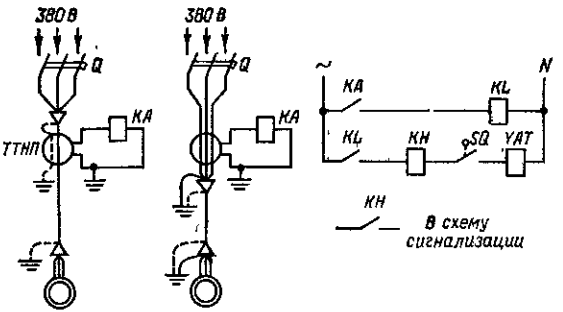


Рис. 20. Релейная защита электродвигателя от однофазных к. з.

КА — реле тока РТ-40; *KL* — промежуточное реле РП-25; *КН* — указательное реле РУ-21/0,5

от блуждающих токов, замыкающихся на броне кабеля, заземляющий проводник брони кабеля подсоединяют по бифилярной схеме — пропускают обратно сквозь окно ТТНП рядом с кабелем. На участке между ТТНП и кабельной воронкой изолируют от земли и корпуса ТТНП металлическую оболочку, броню, концевую воронку кабеля и проводник заземления. При использовании четвертой жилы кабеля в качестве зануляющего проводника (например, во взрывоопасных установках) ее следует подсоединять так же, как заземляющий проводник брони, или разместить ТТНП между разделкой кабеля и автоматическим выключателем, а проводники заземления и зануления подключить помимо ТТНП.

Если надежный источник оперативного тока отсутствует, то на практике иногда применяют упрощенные нетиповые схемы (рис. 21).

В схеме на рис. 21, *а* для отключения используется междуфазное напряжение 380 В самого защищаемого присоединения. Поскольку при однофазном к. з. напряжение может понизиться до 220 В, то независимый расцепитель *YAT* используется на напряжение 220 В — это не представляет опасности для катушки *YAT* ввиду кратковременности действия защиты. В этой схеме защиты нельзя применить обычное токовое реле из-за опасности приваривания его контактов. Поэтому вместо токового

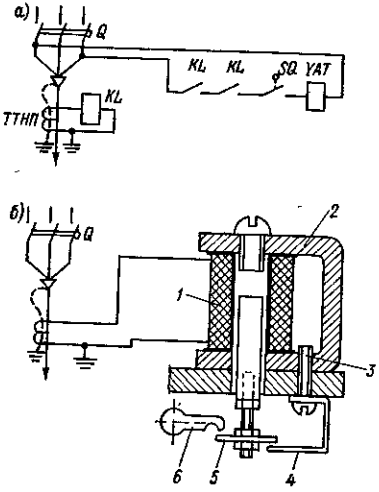


Рис. 21. Схемы нетиповой релейной защиты от однофазных к. з. косвенного (*а*) и прямого (*б*) действия

реле устанавливают реле типа МКУ-48 (или подобное), однако его обмотка перематывается. Например, если применить ТТНП типа ТКР, а обмотку реле выполнить из 85 витков провода ПЭВ диаметром 0,9—1 мм, то первичный ток срабатывания не превышает 50—100 А. Для повышения коммутационной способности в цепь отключения включают два контакта последовательно.

Для находящихся в эксплуатации присоединений с выключателями А3130, А3140 и при отсутствии независимого расцепителя можно выполнить защиту от однофазных к. з. с помощью специально изготовленного реле прямого действия (рис. 21, *б*), устанавливаемого на блоке расцепителей со стороны одного из крайних полюсов и подсоединяемого непосредственно к ТТНП. Магнитопровод реле *2* изготовляется из стали толщиной 4—5 мм и прикрепляется к блоку тремя винтами *3* (на рисунке показан один). Используется катушка *1* от указатель-

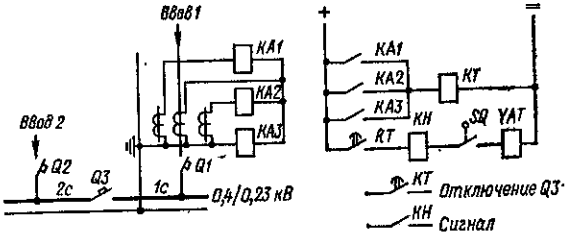


Рис. 22. Релейная защита от междуфазных и однофазных к. з. ввода НН в щит 0,4 кВ

KA1—KA3 — реле тока РТ-40; *KT* — реле времени ЭВ-114; *KH* — реле указательное РУ-21/0,5

ного реле с номинальным током 1 А. К сердечнику с помощью шпильки и гаек крепится шайба *5*, которая при втягивании сердечника поворачивает отключающую рейку расцепителя *6*. В нижнем положении сердечник удерживается от выпадания латунной скобой *4*. Для надежного отключения при втягивании сердечника должен быть обеспечен свободный ход, а после удара шайбы по рейке расцепителя и при их дальнейшем совместном ходе — касание только по краю рейки. Для этого рейка расцепителя несколько обтачивается, после чего имеет форму «клюва» (см. рисунок). Монтажу рассмотренного устройства обычно мешает тепловая защита, поэтому на этом полюсе она демонтируется. Ток срабатывания рассмотренной защиты не превышает 100—150 А. Все винты и гайки заливают краской для предотвращения самоотвинчивания.

Рассмотренные выносные защиты от однофазных к. з. обычно налаживают первичным током непосредственно от нагрузочного устройства, поэтому вторичные токи срабатывания реле не указывают.

Защита щитов и сборок от всех видов к. з. (рис. 22). Применяется на вводах НН в щиты после понижающих трансформаторов, если защитные характеристики автоматических выключателей не обеспечивают селективности или чувствительности защиты. Состав защиты: максимальная токовая защита (реле *KA1, KA2*), защита от однофазных к. з. (реле *KA3*). Защита с первой выдерж-

кой времени отключает секционный выключатель *Q3*, со второй — вводный выключатель *Q1*. Возможно действие на отключение выключателя со стороны ВН понижающего трансформатора, для этого дополнительно устанавливают выходное реле защиты.

Ток срабатывания защиты $I_{с.з}$ от междуфазных к. з. принимается по условиям (68) — (71), в которых $I_{с.о}$ заменяют на $I_{с.з}$, $k_н$ — на $k_н/k_в$ (для РТ-40 $k_н=1{,}2$; $k_в=0{,}8$), а значения $k_{н.с}$ принимают по табл. 32. Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном металлическом к. з. на щите должен быть не менее 1,5, допускается его снижение до 1,2 при к. з. через переходные сопротивления.

Ток срабатывания защиты от однофазных к. з. принимается наибольшим исходя из следующих условий:

1) согласование по чувствительности с защитами от однофазных к. з. отходящих от щита (сборки) линий

$$I_{с.з} \geqslant k_{н.с} I_{с.з.л}, \qquad (77)$$

где $I_{с.з.л}$ — наибольший ток срабатывания защиты от однофазных к. з. отходящих от щита (сборки) линий, при отсутствии специальных (встроенных в выключатели или выносных релейных) защит от однофазных к з. принимается равным наибольшему току срабатывания отсечки выключателей отходящих линий; $k_{н.с}$ — принимается по табл. 32.

Если отходящие линии защищаются предохранителями, то согласование производится, как указано в § 10.

2) несрабатывание при наибольшем допустимом токе в нулевом проводе понижающего трансформатора при несимметричной нагрузке, в зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора:

$$\text{для } Y/Y_0 \quad I_{с.з} \geqslant k_н \cdot 0{,}25 I_{н.т} = 0{,}5 I_{н.т}; \qquad (78)$$

$$\text{для } \Delta/Y_0 \quad I_{с.з} \geqslant k_н \cdot 0{,}75 I_{н.т} = I_{н.т}; \qquad (79)$$

3) обеспечение достаточной чувствительности при к. з. в основной зоне

$$k_{ч.R}^{(1)} = I_{к.R}^{(1)} / I_{с.з} \geqslant 1{,}5, \qquad (80)$$

где $I_{к.R}^{(1)}$ — ток однофазного к. з. через переходные сопротивления на шинах щита 0,4 кВ КТП.

Следует также стремиться обеспечить резервирование защит отходящих линий 0,4 кВ, при к. з. в зоне резервирования $k_{ч.R}^{(1)} \geqslant 1{,}2$.

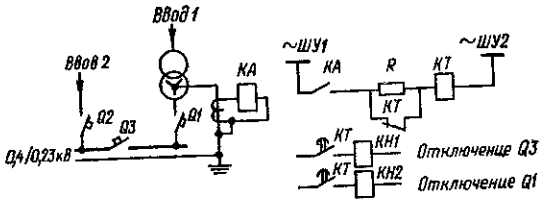


Рис 23 Релейная защита от однофазных к. з трансформатора и щита 0,4 кВ КТП

Время срабатывания защиты от междуфазных и однофазных к. з. принимается больше времени срабатывания защит отходящих линий на ступень $\Delta t = 0{,}4 \div 0{,}5$ с.

Защита щита 0,4 кВ от однофазных к. з. (рис. 23). Применяется в промышленных КТП как типовая защита для вводов от понижающих трансформаторов. Выполняется с помощью токового реле *КА*, включаемого через трансформатор тока в нейтраль силового трансформатора. Тип реле *КА* зависит от аппаратов защиты отходящих от шин КТП линий.

В большинстве случаев для защиты линий устанавливают автоматические выключатели с отсечками. Поэтому применяется реле РТ-40, позволяющее получить независимую характеристику защиты. Это обеспечивает значительно большее быстродействие по сравнению с защитой, имеющей зависимую характеристику, что особенно важно для уменьшения размеров повреждений, а также предотвращения опасности загорания кабелей при к. з. в сети 0,4 кВ и отказе автомата отходящей линии. При срабатывании реле *КА* запускает своим контактом реле времени *КТ*, которое импульсным контактом отключает секционный выключатель, а упорным — вводный, а также выключатель ВН питающего трансформатора (для этого дополнительно устанавливают выходное реле защиты).

Для питания оперативных цепей защиты требуется надежный источник оперативного тока, постоянного или переменного. В типовых схемах общепромышленных КТП оперативные цепи часто подключают непосредственно после силового трансформатора на напряжение

380 В. При однофазном к. з. в сети напряжение в оперативных цепях может снизиться до 220 В. То же может быть и на двухтрансформаторных подстанциях, оборудованных устройством АВР оперативных цепей, если один из трансформаторов выведен в ремонт. Чтобы обеспечить в этом случае срабатывание защиты, реле времени *КТ* (типа ЭВ-228) применяется при номинальном напряжении катушки 220 В. Последовательно с катушкой включается зашунтированное размыкающим контактом этого реле сопротивление *R* (ПЭВ-50; 2,3—2,5 кОм), подобранное таким образом, что обеспечивает, с одной стороны, термическую стойкость реле при напряжении в оперативных цепях 380 В, а с другой, — удерживание реле после срабатывания при напряжении 220 В. Указательные реле *КН1* и *КН2* и отключающие катушки выключателей настраивают на четкое срабатывание при напряжении 220 В.

Если для защиты линий устанавливаются предохранители, то применяется реле типа РТ-80. В этом реле используют только индукционный элемент, создающий зависимую от тока выдержку времени на замыкание контактов. Электромагнитный элемент реле (отсечку) выводят из работы, для чего на шкале отсечки выставляют максимальную уставку. Схема защиты выполняется аналогично рис. 23.

Уставки срабатывания выбирают, как указано выше.

Защита сборки от однофазных к. з. Применяется при недостаточной чувствительности защиты автоматического выключателя при однофазных к. з. Выполняется с помощью трехтрансформаторного фильтра токов нулевой последовательности или ТТНП аналогично защите электродвигателей с той разницей, что вместо промежуточного реле *KL* устанавливают реле времени. Ток срабатывания принимают наибольшим из условий (77) и (81):

$$I_{с.з} \geqslant k_н I_{нб}, \qquad (81)$$

где $I_{нб}$ — ток небаланса (несимметричной нагрузки), принимается равным допустимому току нулевой жилы питающего сборку кабеля, определяется по таблицам ПУЭ [13]; $k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,2—1,3.

Коэффициент чувствительности защиты при однофазном к. з. через переходные сопротивления на защищаемой сборке должен быть не менее 1,5. Время срабатывания защиты принимается на ступень 0,3—0,5 с больше времени срабатывания защит отходящих от сборки линий.

10. ВЫБОР ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Параметры предохранителей. Основные типы: ПР-2 — разборные, без наполнителя; ПН2 и ПП17 — разборные, с наполнителем (кварцевый песок); НПН — неразборные, с наполнителем (табл. 34). Разборные предохранители допускают замену плавких вставок. В зависимости от заказа предохранители ПН2 и ПП17 поставляются: без указателя срабатывания и свободного

Таблица 34. Технические параметры предохранителей 380 В

Тип	Номинальный ток, А		Предельный отключаемый ток*, кА
	патрона предохранителя	плавкой вставки	
НПН2-60	60	6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 63	10
ПН2-100	100	31,5; 40, 50; 63; 80; 100	100
ПН2-250	250	80; 100, 125; 160; 200; 250	100
ПН2-400	400	200; 250; 315; 355; 400	40
ПН2-600	630	315; 400; 500; 630	25
ПП17	1000	500; 630; 800; 1000	120
ПР-2	15	6; 10; 15	0,8/8
	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	1,8/4,5
	100	60; 80; 100	6/11
	200	100; 125; 160; 200	6/11
	350	200; 235; 260; 300; 350	6/13
	600	350; 430; 500; 600	13/23
	1600	600; 700; 850; 1000	15/20

* Действующее значение периодической составляющей ожидаемого тока к. з. Для ПР-2 данные в числителе относятся к исполнению 1 (короткие предохранители), в знаменателе — к исполнению 2 (длинные предохранители).

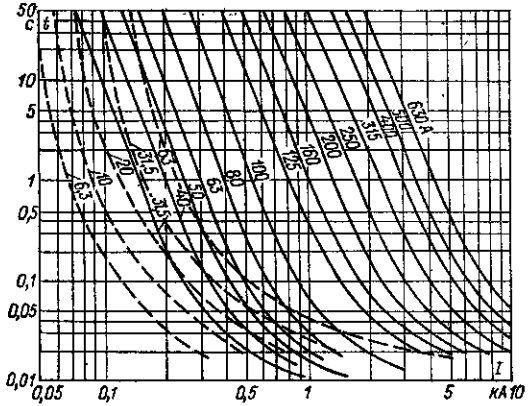


Рис. 24. Защитные характеристики предохранителей ПН2 (сплошные линии) и НПН (штриховые линии)

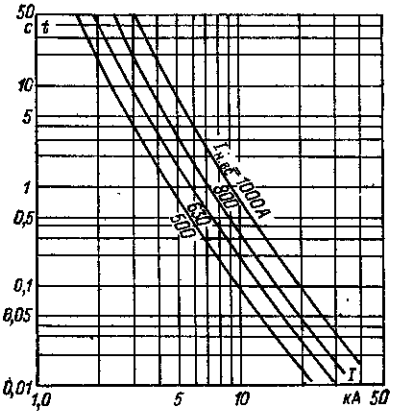


Рис. 25. Защитные характеристики предохранителей ПП17 в цепи переменного тока

контакта вспомогательной цепи; с указателем срабатывания и замыкающим (или размыкающим) вспомогательным контактом; с указателем срабатывания. Защитные характеристики приведены на рис. 24 и 25.

Условия выбора предохранителя. Номинальный ток отключения предохранителя должен быть не менее максимального тока к. з. в месте установки. Номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать номинальному напряжению сети.

Условия выбора плавких вставок. Номинальный ток плавкой вставки выбирается наибольшим из следующих условий:

1) несрабатывания при максимальном рабочем токе

$$I_{\text{н.вс}} \geqslant I_{\text{раб.макс}}; \qquad (82)$$

2) при защите одиночного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором — несрабатывание при его пуске

$$I_{\text{н.вс}} \geqslant I_{\text{пуск.дв}}/k, \qquad (83)$$

где k — коэффициент, при защите электродвигателей с короткозамкнутым ротором и легком пуске (длительностью 2—5 с) принимается равным 2,5, при тяжелом пуске (длительность около 10 с), а также при частых пусках (более 15 в час) или для особо ответственных электродвигателей, ложное отключение которых недопустимо, принимается равным 1,6—2; при защите двигателя с фазным ротором —0,8—1;

3) при защите сборки дополнительно к условию (82) — несрабатывание при полной нагрузке сборки и пуске наиболее мощного двигателя (84), а также при самозапуске электродвигателей (85).

$$I_{\text{в.вс}} \geqslant \frac{1}{k}\left(\sum_{1}^{n-1} I_{\text{раб.макс}} + I_{\text{пуск.макс}}\right); \qquad (84)$$

$$I_{\text{н.вс}} \geqslant I_{\text{сзп}}/k, \qquad (85)$$

где k — то же, что в формуле (83); остальное — как в выражениях (68) и (69).

Выражения (83) — (85) пригодны для выбора обычных предохранителей ПР-2, ПН2, НПН, ПП17. Для

инерционных предохранителей Е-27, СПО, в настоящее время почти не применяемых, в любом случае номинальный ток плавкой вставки принимается равным 1—1,25 максимального рабочего тока присоединения.

Для предохранителей, устанавливаемых со стороны НН понижающего трансформатора, номинальный ток плавкой вставки выбирают по номинальному току трансформатора (ближайшее большее по шкале плавких вставок значение).

Если требуется защита кабеля от перегрузки, то учитывают условие (42).

Проверка селективности последовательно включенных предохранителей между собой и с автоматическими выключателями. При применении однотипных предохранителей селективными считаются те, которые различаются на две ступени по шкале номинальных токов плавких вставок. Для разнотипных предохранителей селективность проверяется сопоставлением их защитных характеристик с учетом 25 %-ного, а в ответственных случаях — 50 %-ного разброса по времени срабатывания. Зоны возможных характеристик, построенные с учетом этих разбросов, не должны накладываться или пересекаться в пределах токов от номинального до максимально возможного, или по крайней мере до наиболее вероятного тока к. з. $I^{(3)}_{к.ср}$ за нижестоящим предохранителем. На практике зоны не строят, а сопоставляют время плавления большего $t_б$ и меньшего $t_м$ предохранителей при одинаковых токах. Селективность обеспечивается, если выполняются условия: при учете 25 %-ного разброса $t_б > 1{,}7\,t_м$; при учете 50 %-ного разброса $t_б > 3\,t_м$. Известен также метод проверки селективности сопоставлением сечений плавких вставок [5, 15], он применяется редко и здесь не рассматривается.

Селективность предохранителей и автоматических выключателей проверяется путем сопоставления их защитных характеристик.

Проверка селективности между предохранителями и магнитным пускателем (контактором) данного присоединения. Селективность обеспечивается, если продолжительность перегорания плавкой вставки не превышает 0,15—0,2 с, что соответствует отношению $I^{(2)}_{к.мин}/I_{н.вс} \geqslant 10$—15, где $I^{(2)}_{к.мин}$ — минимальный ток двухфазного к. з. за пускателем (контактором). Плавкая вставка с номинальным током 200 А является предельной по условиям селективности работы контактора и предохранителя, при бо́льшем токе вместо предохранителей рекомендуется устанавливать автоматический выключатель.

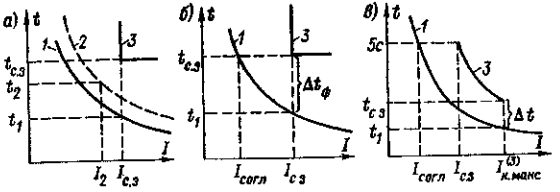


Рис. 26. Согласование релейной защиты трансформатора (кривая *3*) с предохранителями 0,4 кВ (кривые *1* и *2*)

Проверка селективности защиты питающего трансформатора со стороны ВН и предохранителей со стороны НН. Выполняется сопоставлением их характеристик на карте селективности защит. Необходимо обеспечить селективность защиты со стороны ВН с предохранителями ввода 0,4 кВ или по крайней мере с отходящими линиями 0,4 кВ.

Если трансформатор со стороны ВН защищается предохранителями, то согласно директивным материалам их номинальный ток принимается равным $2I_{н.т}$. При проверке селективности учитывается возможность 20 %-ного разброса вставок ВН по току.

Если со стороны ВН трансформатора установлена релейная защита, то производится ее согласование с предохранителями 0,4 кВ.

Согласование защиты трансформатора, имеющей независимую характеристику, показано на рис. 26, *а*. По заводским данным строится защитная характеристика предохранителя *1*, с которым производится согласование. С учетом разброса срабатывания по времени ее перестраивают в предельную характеристику *2*. Для этого время срабатывания при каждом данном токе, определенное по заводской характеристике, увеличивают в 1,5 (или 1,25) раза. На график наносят выдержку времени защиты трансформатора $t_{с.з}$. Находят значение $t_2 = t_{с.з} - t_р - t_з$, где $t_р$ — разброс реле времени защиты, для реле ЭВ со шкалами 1,3; 3,5 и 9 с принимают соот-

ветственно 0,06; 0,12 и 0,25 с; $t_з$ — время запаса, принимают равным 0,1—0,2 с. Через точку t_2 проводят горизонтальную прямую до пересечения с характеристикой 2. Точка пересечения определяет значение тока согласования I_2. Ток срабатывания защиты находят по выражению $I_{с.з}=1{,}1\ I_2$, где коэффициент 1,1 учитывает разбросы токового реле, неточности его настройки и некоторый запас.

Для приближенных расчетов согласование упрощают. Проводят горизонтальную линию через точку $t_{с.з}$ до пересечения с заводской характеристикой предохранителя (рис. 26, *б*). Точка пересечения соответствует току согласования $I_{согл}$. Ток срабатывания защиты трансформатора принимают $I_{с.з}=(1{,}3—1{,}4)I_{согл}$. Далее проверяют, что фактическая ступень селективности $\Delta t_ф$ при токе срабатывания не менее расчетной $\Delta t_{расч}=(0{,}25\div 0{,}5)t_1+t_р+t_з$, где t_1 — время срабатывания предохранителя при токе $I_{с.з}$; (0,25—0,5)t_1 — разброс по времени срабатывания предохранителя; $t_р$ и $t_з$ — см. выше. Если полученная по карте селективности фактическая ступень селективности меньше расчетной, то соответственно увеличивают либо ток, либо время срабатывания защиты трансформатора. Обычно для обеспечения селективности по времени достаточно убедиться, что $\Delta t_ф$ не менее 0,4—0,5 с.

Характеристика защиты трансформатора задается параметрами $I_{с.з}$, $t_{с.з}$ при токе $2I_{с.з}$.

Упрощенное согласование защиты трансформатора, имеющей зависимую характеристику (реле РТ-80, РТВ), показано на рис. 26, *в*. Для зависимых реле при выдержке времени в независимой части характеристики 0,5—1 с время срабатывания в начале защитной характеристики (при токе срабатывания) составляет около 5 с. Проводя через точку $t=5$ с горизонтальную прямую до пересечения с заводской защитной характеристикой *1* предохранителя, получают значение тока согласования $I_{согл}$. Ток срабатывания защиты находят по выражению $I_{с.з}=(1{,}3\div 1{,}4)I_{согл}$. Построив из точки с координатами 5 с и полученного $I_{с.з}$ характеристику защиты трансформатора, проверяют, что во всем диапазоне возможных токов к.з. за предохранителем 0,4 кВ вплоть до $I^{(3)}_{к.макс}$ (или, по крайней мере, до $I^{(3)}_{к.ср}$) между указанными характеристиками имеется ступень селективности не менее 1—2 с в зависимой части и не менее 0,4—0,5 с в независимой части характеристики защиты трансформатора. Обычно защитная характеристика зависимых реле и характеристика предохранителей 0,4 кВ сближаются при увеличении тока, поэтому согласование по времени производят при максимальном расчетном токе к.з. за предохранителем. Для этого подбирают такую типовую характеристику реле, чтобы выдержка времени защиты при токе $I^{(3)}_{к.макс}$ была не менее $t_{с.з}\geqslant t_1+\Delta t$, где t_1 — время срабатывания предохранителя при токе $I^{(3)}_{к.макс}$; Δt — ступень селективности, принимается не менее 0,4—0,5 с.

Характеристика защиты трансформатора задается параметрами $I_{с.з}$, $t_{с.з}$ при токе $I^{(3)}_{к.макс}$; $t_{с.з}\geqslant 5$ с при токе $I_{с.з}$. Все эти точки защитной характеристики проверяют при наладке.

Условие согласования является лишь одним из условий выбора уставок защиты трансформатора. О других условиях (отстройки от максимального рабочего тока с учетом самозапуска электродвигателей, несрабатывания при послеаварийных перегрузках, чувствительности) — см. работу [20].

При построении схемы сети 0,4 кВ полезно определить, какую максимальную вставку можно установить для защиты отходящих линий 0,4 кВ по условию селективности с защитой трансформатора. Если окажется, что по условиям (82) — (85) требуется больший номинальный ток плавкой вставки, то следует пересмотреть первичную схему данного присоединения.

Пример 12. Для условий примера 5 определить предельное значение номинального тока плавкой вставки предохранителя ПН-2, при котором обеспечивается селективность с защитой трансформатора, имеющей независимую характеристику.

Р е ш е н и е. Задаемся временем срабатывания защиты трансформатора 0,5 с. В примере 5 определен ток срабатывания защиты трансформатора из условия чувствительности. Для трансформатора мощностью 1000 кВ·А, $u_к=5{,}5$ %, $Y/Y_н$ $I_{о.з}$, составляет не более 8,45 кА. Поделив это значение на коэффициент надежности согласования 1,4, получим значение тока согласования 6 кА, при котором плавкая вставка должна расплавиться за время, не превышающее 0,5 с. Наносим точку с координатами 0,5 и 6 кА на сетку характеристик предохранителей ПН-2. Все характеристики, расположенные левее этой точки или проходящие через нее, отвечают условию согласования, а расположенные правее — не отвечают. Таким образом устанавливаем, что условию согласования соответствует плавкая вставка не более 630 А. Проверяем ступень селективности по времени при токе 8,45 кА: защита срабатывает за 0,5 с, вставка сгорит за 0,08 с, $\Delta t=0{,}5—0{,}08=0{,}42$ — достаточно. Аналогично устанавливаем, что для

трансформатора 1000 кВ·А, Δ/Y, $u_к$=5,5 % ток плавления должен составить не более 7 кА при времени плавления 0,5 с, что также соответствует плавкой вставке 630 А.

Проверка чувствительности предохранителей при к. з. Кратность минимального тока $I_{кR}$ при любом виде к. з. по отношению к номинальному току плавкой вставки должна быть:

для невзрывоопасной среды

$$k_{чR} = I_{кR}/I_{н.вс} \quad (k_{чR} \geqslant 3); \tag{86}$$

для взрывоопасной среды

$$k_{чR} = I_{кR}/I_{н.вс} \quad (k_{чR} \geqslant 4). \tag{87}$$

При питании от энергосистемы минимальным током к. з. в установках с глухозаземленной нейтралью в большинстве случаев является ток однофазного к. з., в установках с изолированной нейтралью — ток двухфазного к. з. При питании от маломощных генераторов в зависимости от удаленности точки к. з. минимальным может оказаться ток однофазного, двухфазного или установившегося трехфазного к. з.

Достоинства и недостатки предохранителей. К достоинствам предохранителей относится их простота и дешевизна. В то же время они имеют следующие существенные недостатки, ограничивающие область их применения:

1) плавкие вставки стареют с течением времени, после чего возможны ложные сгорания вставок в пусковых режимах, т. е. защита ненадежна;

2) при однофазных к. з. плавкая вставка отключает только одну фазу, что приводит к опасному режиму работы двигателей на двух фазах. Это может вызвать остановку двигателя. Если он все же продолжает вращаться, то работает с повышенным в 1,5—2 раза током по сравнению с номинальным;

3) плавкая вставка — однократного действия. После срабатывания предохранителя ее необходимо заменять;

4) в условиях эксплуатации часто вместо калиброванных вставок применяют другие или проволоку, что нарушает защиту сети;

5) плавкие предохранители не защищают двигатели от перегрузок, требуется защита с помощью тепловых реле, действующих на отключение магнитных пускателей.

11. ВЫБОР УСТАВОК ЗАЩИТЫ АВАРИЙНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ 0,4 кВ

Релейная защита генераторов 0,4 кВ. Схема защиты генератора, предназначенного для аварийного электроснабжения особо ответственных электроприемников КТП, приведена на рис. 27. В качестве источника оперативного тока используют аккумуляторную батарею, установленную для питания автоматики дизеля. Состав защиты: максимальная токовая (реле *КА1, КА2*), от однофазных к. з. (*КА3*), от перегрузки (*КА4*), все токовые реле типа РТ-40. Для отключения повреждений внутри генератора трансформаторы тока защиты включают со стороны нулевых выводов, если это возможно. Если это невозможно, то защиту от однофазных к. з. включают на отдельный трансформатор тока, установленный в нулевом проводе генератора (аналогично защите трансформаторов КТП). Иногда выполняют продольную дифференциальную защиту нулевой последовательности от однофазных к. з. внутри генератора [19].

Ток срабатывания максимальной токовой защиты генератора выбирают по следующим условиям:

1. Несрабатывание при максимальном рабочем токе (принимается равным номинальному току генератора $I_{н.г}$) с учетом его увеличения при самозапуске электродвигателей

$$I_{с.з} = \frac{k_н}{k_в} k_{сзп} I_{н.г}, \tag{88}$$

где $k_н$ и $k_в$ — коэффициенты надежности и возврата, для реле РТ-40 принимаются соответственно 1,2 и 0,8;

2. Несрабатывание при максимальном рабочем токе с учетом пуска наиболее мощного двигателя

$$I_{с.з} \geqslant \frac{k_н}{k_в} [(I_{н.р} - I_{н.дв}) + I_{пуск.дв}], \tag{89}$$

где $I_{н.дв}$ и $I_{пуск.дв}$ — соответственно номинальный и пусковой ток наиболее мощного электродвигателя.

3. Согласование с защитами (токовыми отсечками) отходящих от генераторных шин линий по условию (75). О нахождении предельных значений тока срабатывания защиты этих линий см. пример 6. При наличии предохранителей выполняется согласование защиты генератора с предохранителями (см. § 10).

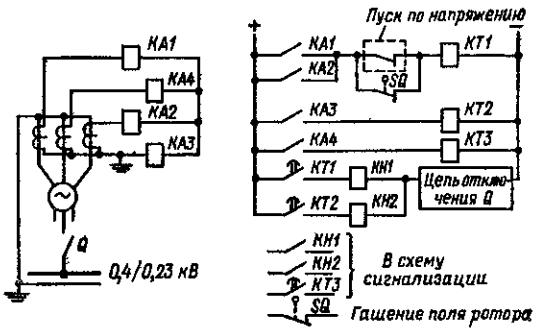


Рис 27 Схема защиты генератора напряжением 0,4 кВ

4. Обеспечение необходимой чувствительности защиты в установившемся режиме трехфазного к з за выключателем генератора

$$k^{(3)}_{чоо} = I^{(3)}_{коо}/I_{с в} \geqslant 1{,}5; \quad k^{(3)}_{чооR} = I^{(3)}_{коо R}/I_{с в} \geqslant 1{,}2 \qquad (90)$$

Значение тока $I^{(3)}_{коо}$ на зажимах генератора в соответствии с ГОСТ 14965—80 должно составлять не менее $3I_{нг}$. Поэтому необходимая чувствительность защиты гарантируется, если ее ток срабатывания не превышает значения

$$I_{с в} \leqslant 3I_{нг}/1{,}5 = 2I_{нг}. \qquad (91)$$

Выдержку времени срабатывания максимальной токовой защиты генератора принимают по условию (76). Поскольку генератор является последним источником электроснабжения и его излишние отключения крайне нежелательны, ступень селективности защиты обычно повышают до 1 с.

Ток срабатывания защиты от однофазных к. з. выбирают по условиям отстройки от номинального тока генератора $I_{с в} \geqslant 1{,}4\ I_{нг}$, а также согласования с защитами отходящих линий (77), время срабатывания на ступень 0,4—0,5 с больше времени срабатывания защит от однофазных к. з. отходящих линий. Чувствительность проверяют по условию (80).

Выбранный по условию отстройки от самозапуска электродвигателей (88) ток срабатывания максимальной токовой защиты может быть таким значительным, что чувствительность защиты по условию (90) оказывается недостаточной. В этих случаях осуществляют поочередный самозапуск электродвигателей. В цепь управления пускателем (контактором) каждого двигателя включают замыкающие с выдержкой времени контакты реле времени, катушка которого включается на линейное напряжение первичной сети. Выдержку времени на срабатывание реле принимают на всех электродвигателях разной, таким образом после восстановления напряжения они включаются поочередно. В этом случае в выражении (88) можно принять $k_{сзп}=1$. Поочередный самозапуск предпочтителен также с точки зрения предотвращения больших набросов нагрузки на дизель-генератор (дизель может остановиться).

Если чувствительность защиты не обеспечивается из-за условия (89), то дополнительно к поочередному самозапуску применяют пуск (блокировку) защиты по напряжению Тогда при выборе тока срабатывания защиты можно не учитывать режимы пуска и самозапуска электродвигателей, т. е. учитывать только условие (88), в котором принимают $k_{сзп}=1$, и условие (75). Это позволяет уменьшить ток срабатывания защиты и обеспечить ее чувствительность.

Пуск защиты по напряжению осуществляется специальным пусковым органом напряжения.

Схема комбинированного пускового органа напряжения, состоящего из фильтра-реле напряжения обратной последовательности *KVZ* типа РНФ-1М и реле минимального напряжения *KV* типа РН-50, приведена на рис. 28, *а*. Поскольку реле РНФ-1М выпускают только на напряжение 100 В, то оба реле подключают ко вторичным цепям трансформаторов напряжения 380/100 В, соединенных по схеме открытого треугольника. В нормальном режиме якорь реле *KVZ* отпущен, его контакт в цепи обмотки реле *KV* замкнут, якорь реле *KV* подтянут, а контакт *KV* в цепи пуска максимальной токовой защиты разомкнут При появлении несимметрии фаз (двухфазное или однофазное к. з.) срабатывает реле *KVZ*, размыкая обмотку *KV*, которое разрешает пуск защиты. При симметричном снижении напряжения

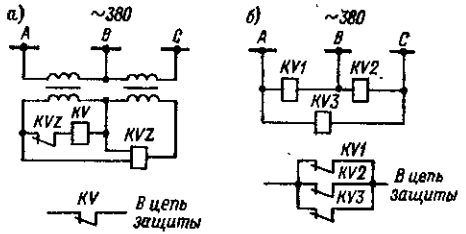


Рис. 28. Пусковые органы напряжения максимальной токовой защиты: комбинированный (*а*) и трехрелейный (*б*)

вследствие трехфазного к. з. реле *KVZ* не работает, но срабатывает реле *KV*, разрешая пуск защиты.

Напряжение срабатывания реле *KVZ* выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса фильтра в нормальном режиме и в первичных величинах составляет $U_{2с.з} = (0{,}06 \div 0{,}12)\, U_н$, где $U_{2с.з}$ и $U_н$—линейные напряжения. Напряжение срабатывания реле по шкале регулируется в пределах 6—12 В, обычно принимается $U_{2с.р} = 6$ В. Настройка реле РНФ-1М производится в режиме имитации двухфазного к. з., для чего между одним из зажимов фильтра напряжения обратной последовательности и двумя закороченными на период наладки другими подается однофазное регулируемое напряжение. Реле должно срабатывать при значении этого напряжения, численно равном $\sqrt{3}\, U_{2с.р}$.

Напряжение срабатывания защиты (отпадания якоря реле минимального напряжения *KV*) выбирается исходя из условия возврата реле при самозапуске электродвигателей (после отключения внешнего к. з.), когда напряжение в месте установки реле снижается до $U_{мин}$:

$$U_{с.з} = U_{мин}/(k_н\, k_в), \qquad (92)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается 1,1—1,2; $k_в$ — коэффициент возврата, для реле минимального напряжения принимается 1,15—1,2.

Напряжение срабатывания реле $U_{с.р} = U_{с.з}/n_н$, где $n_н$—коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Обычно $U_{с.з} = (0{,}5 \div 0{,}7)\, U_н$. Ниже $0{,}5U_н$ уставку выбирать не следует, так как защита может отказать при к. з. через переходное сопротивление.

Коэффициент чувствительности реле *KVZ* может не определяться, так как он обычно получается достаточно высоким. Коэффициент чувствительности реле *KV* определяется при к. з. в зоне резервирования и должен быть не менее 1,2. Для схемы комбинированного пуска он определяется по выражению

$$k_ч = U_{с.з}\, k_в / U_к^{(3)} \geqslant 1{,}2, \qquad (93)$$

где $U_к^{(3)}$ — междуфазное напряжение в месте установки реле при трехфазном металлическом к. з. в конце зоны резервирования (при питании от генераторов — для момента времени, соответствующего времени действия защиты).

Из условия (93) видно, что $k_ч$ автоматически повышается в $k_в$ раз, так как в момент возникновения трехфазного к. з. из-за кратковременного появления напряжения обратной последовательности срабатывает реле *KVZ*, и тогда реле *KV* работает «на возврате» [20].

Пусковой орган, состоящий из трех реле минимального напряжения типа РН-50, показан на рис. 28, *б*. В нормальном режиме якорь реле подтянут, а контакты разомкнуты. При снижении напряжения вследствие к. з. любых двух или всех трех фаз ниже уставки реле якорь реле отпадает, реле срабатывает, замыкает контакты и разрешает пуск максимальной токовой защиты генератора. Напряжение срабатывания (отпадания якоря) реле выбирается по выражению (92). Чувствительность защиты по напряжению проверяется по выражению

$$k_ч = U_{с.з}/U_к^{(3)} \geqslant 1{,}2, \qquad (94)$$

где все обозначения такие же, как в условии (93).

Преимущество пускового органа, состоящего из трех реле напряжения, заключается в возможности подключения этих реле непосредственно на напряжение 380 В, недостаток — в меньшей чувствительности по сравнению с комбинированным пусковым органом. Недостаток комбинированного пускового органа заключается в необходимости установки специальных трансформаторов напряжения 380/100 В.

При проверке чувствительности пусковых органов

напряжения необходимо учитывать влияние переходных сопротивлений в месте к. з. Обычно влияние переходных сопротивлений на работу пусковых органов максимальных токовых защит маломощных аварийных генераторов 0,4 кВ значительно меньше, чем на работу защит трансформаторов с низшим напряжением 0,4 кВ. Поэтому применение пуска по напряжению защит генераторов не вызывает особых сложностей в обеспечении чувствительности защиты.

Пример 13. Сравнить влияние переходных сопротивлений при проверке чувствительности пусковых органов напряжения максимальных токовых защит генератора 0,4 кВ мощностью 630 кВт, параметры которого приведены в примере 3, и питающегося от энергосистемы трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 630 кВ·А, $u_к$=5,5 %.

Решение. Рассмотрим к. з. непосредственно на главных шинах 0,4 кВ, где влияние переходных сопротивлений наибольшее

Проверяем чувствительность пускового органа напряжения защиты генератора. При t=0 сопротивление генератора $x_г$=32,5 мОм, переходные сопротивления $R_п$=15 мОм. Полное сопротивление цепи к. з. $z_Σ=\sqrt{32{,}5^2+15^2}=35{,}8$ мОм. Значение тока к. з. $I^{(3)}_{к0R}=1{,}05\times 400/(\sqrt{3}\cdot 35{,}8)=6{,}8$ кА. Однако при $t=\infty$ значение тока составит $I^{(3)}_{к0R}\approx I^{(3)}_{к\infty}=7{,}16$ кА, т. е. больше, чем при t=0 (см. пример 6). Поэтому чувствительность пускового органа напряжения проверяем при токе 7,16 кА Напряжение в месте к. з. $U^{(3)}_{к\infty R}=\sqrt{3}\cdot 7{,}16\cdot 15=186$ В, или, в относительных единицах, $U^{(3)}_{к\infty R}=186/400=0{,}465$ о. е. При уставке пускового органа напряжения $U_{о.з}$=0,6 о. е. его чувствительность составит: для комбинированного пускового органа $k_ч=0{,}6\times 1{,}2/0{,}465=1{,}55$, т. е. больше 1,2 — достаточна; для трехрелейного $k_ч=0{,}6/0{,}465=1{,}29$, т. е. больше 1,2 — достаточна. Однако рекомендуется применять комбинированный пусковой орган, обеспечивающий большую чувствительность и зону резервирования защит.

Проверяем чувствительность пускового органа напряжения защиты трансформатора. При $x_с$=0,1 $x_т$ ток к. з., вычисленный с учетом переходных сопротивлений, составит $I^{(3)}_{кR}$=9,8 кА (см. рис. П1, *а*). Остаточное напряжение в месте к. з. $U^{(3)}_{кR}=\sqrt{3}\cdot 9{,}8\cdot 15=254$ В или 254/400=0,64 о. е. Чувствительность при уставке $U_{о.з}$=0,6 о. е. для комбинированного пускового органа $k_ч=0{,}6\cdot 1{,}2/0{,}64=1{,}12$, т. е. меньше 1,2; для трехрелейного $k_ч=0{,}6/0{,}64=0{,}94$, т. е. меньше 1,2, что недостаточно. Чтобы обеспечить чувствительность, например, комбинированного органа, необходимо, чтобы $U_{с.з}$ было не менее 0,64, т. е. напряжение при самозапуске электродвигателей должно быть не менее $0{,}64\cdot 1{,}1\cdot 1{,}15=0{,}8$ о. е. Это вызывает необходимость ограничения суммарной мощности электродвигателей, участвующих в самозапуске, или применения их поочередного самозапуска.

Из-за существенного влияния переходных сопротивлений на чувствительность пусковых органов напряжения последние в схемах максимальных токовых защит трансформаторов с низшим напряжением 0,4 кВ в настоящее время почти не применяются.

Защита автоматическими выключателями. Для защиты генераторов наиболее подходящими являются автоматические выключатели серии АВМ, имеющие электромагнитные расцепители защиты от перегрузки с зависимой характеристикой и небольшим временем срабатывания (2—4 с на независимой части характеристики). Их используют в качестве максимальной токовой защиты генератора от внешних к. з. Расчет уставки тока срабатывания выполняют по приведенным выше выражениям. Время срабатывания принимают по условию селективности с защитами отходящих линий 0,4 кВ, а также по условию отстройки от длительности пуска электродвигателей, если надежно отстроиться по току от пусковых режимов не удается. Для наладки время срабатывания задают при токе к. з. на зажимах генератора, равном $I^{(3)}_{к\infty}$. Обычно принимают минимальную уставку по шкале времени, соответствующую 2 с на независимой части характеристики (при токе более $3I_{с.з}$), в этом случае при токе $I_{с.з}$ выключатель отключится не менее чем за 7 с. Меньшую уставку по шкале времени принимать не рекомендуется, так как выдержка времени становится неустойчивой, что может приводить к неселективным отключениям.

Отсечку выключателя используют для защиты генератора от внутренних к. з. при его параллельной работе с другими источниками. Ток срабатывания отсечки выбирают исходя из отстройки от максимального тока к. з. $I^{(3)}_{к0}$, посылаемого генератором в сеть в начальный момент к. з. на генераторных шинах

$$I_{с.о}\geqslant k_н I^{(3)}_{к0}, \qquad (95)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, принимается по табл. 33.

При этом $I_{с.о}$ проверяется на отстройку от тока качаний, если предусматривается параллельная работа генератора с другими источниками [19]. Поскольку отсечка не работает при внешних к. з., то для защиты генератора можно применять как селективный, так и неселективный выключатель. Селективный предпочтителен ввиду надежности несрабатывания отсечки при внешних к. з.

Чувствительность отсечки проверяется по выражениям (58) и (59) при к. з. внутри генератора, когда от-

сечка срабатывает из-за тока, притекающего к месту к. з. от параллельно работающих с ним генераторов.

Защитные характеристики автоматических выключателей других типов мало подходят для защиты генераторов, поскольку их защита от перегрузки ввиду большого времени действия не может быть использована в качестве максимальной токовой защиты. Для этой цели приходится использовать селективную токовую отсечку, однако обеспечить при этом надежную отстройку от режимов пуска и самозапуска электродвигателей обычно не удается Поэтому применение этих автоматических выключателей возможно лишь в частных случаях для генераторов мощностью не более 100—200 кВт, если в схеме электроснабжения отсутствуют двигатели, пуск которых может вызвать срабатывание защиты генератора.

Пример 14. Выбрать автоматический выключатель АВМ и уставки защиты для генератора, параметры и значения токов к. з. которого приведены в примерах 3, 4 и 6.

Решение Принимаем по условию (45) выключатель АВМ-15НВ (или АВМ-15СВ) с номинальным током расцепителя 1200 А, у которого ток срабатывания защиты от перегрузки регулируется в пределах 1500—2400 А, ток срабатывания отсечки 8—10 кА.

Выбираем ток срабатывания максимальной токовой защиты по условию (88). Ввиду отсутствия конкретных нагрузок принимаем, что от режимов пуска и самозапуска можно отстроиться по времени, соответственно $k_{\text{озд}}=1$. Коэффициент возврата расцепителя АВМ зависит от времени от начала срабатывания, в конце хода якоря он составляет 0,5—0,6, в середине — около 0,7 Принимаем $k_{\text{в}}=0,6$. Соответственно $I_{\text{с з}}=1,2\cdot1138/0,6=2280$ А. Для надежной отстройки пусковых режимов и согласования с защитами отходящих линий принимаем максимальную по шкале уставку $I_{\text{с з}}=2400$ А Чувствительность защиты при установившемся токе трехфазного к. з. $k_{\text{чо}}^{(3)}=7160/2400=2,98>1,5$. Чувствительность при однофазных к. з. $k_{\text{ч}R}^{(1)}=7400/2400=3,08>1,5$.

Время срабатывания защиты принимаем 2 с на независимой части характеристики (при токе более 3 $I_{\text{с з}}$). При кратности тока $7160/2400=2,98$ время срабатывания по характеристикам выключателей АВМ составляет около 2,3 с, при токе срабатывания — не менее 7 с.

Максимальный ток к. з. от генератора при $t=0$ без учета переходных сопротивлений $I_{\text{к0}}^{(3)}=1,05\cdot400/(\sqrt{3}\cdot32,5)=7500$ А Ток срабатывания отсечки по условию (95) $I_{\text{с о}}=1,8\cdot7500=13\,500$ А Принимаем наибольшую уставку по шкале 10 кА Для обеспечения несрабатывания отсечки при внешнем к. з принимаем селективный выключатель, время срабатывания отсечки принимаем $t_{\text{с о}}=0,4$ с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчетные кривые для нахождения токов к. з. в сети 0,4 кВ

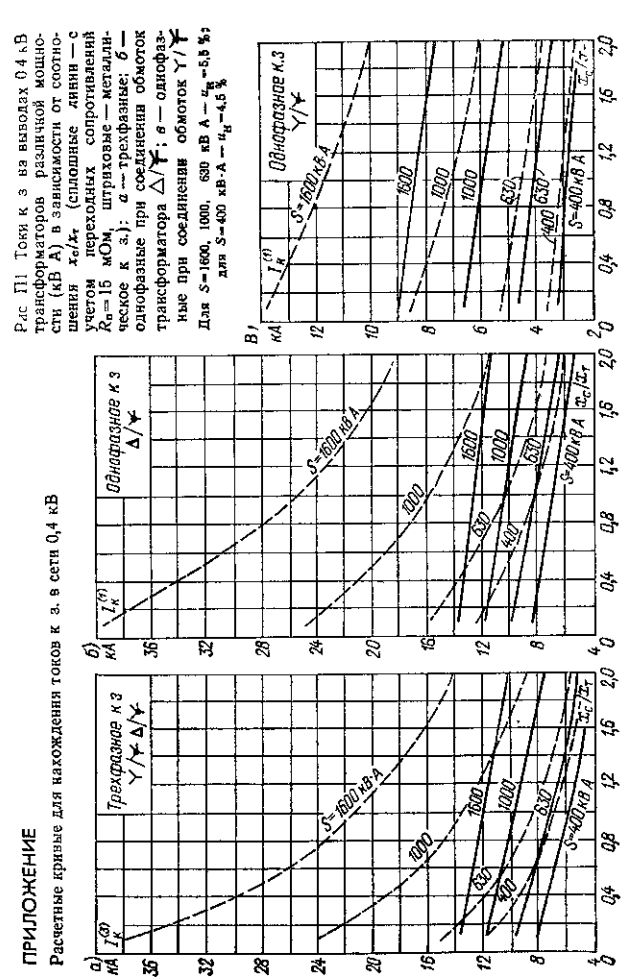


Рис П1 Токи к. з на выводах 0,4 кВ трансформаторов различной мощности (кВ А) в зависимости от соотношения x_c/r_c (сплошные линии — с учетом переходных сопротивлений $R_{\text{д}}=15$ мОм, штриховые — металлическое к. з.): *а* — трехфазные; *б* — однофазные при соединении обмоток трансформатора Δ/Y; *в* — однофазные при соединении обмоток Y/Y

Для $S=1600$, 1000, 630 кВ А — $u_{\text{к}}=5,5$ %;
для $S=400$ кВ·А — $u_{\text{к}}=4,5$ %

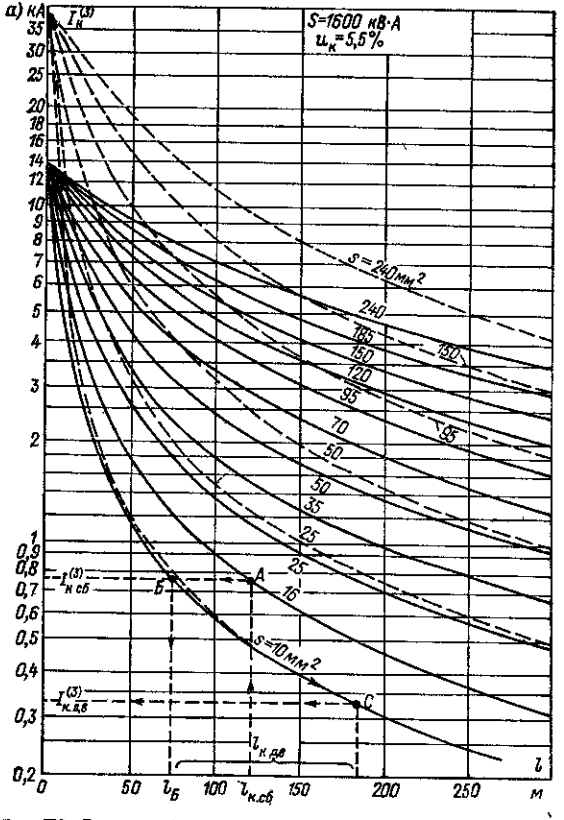


Рис. П2 Токи трехфазных к з в зависимости от длины и сечения кабелей с алюминиевыми жилами при x_0=0,1 $x_т$ и мощности трансформатора 1600 (*а*) 1000 (*б*), 630 (*в*) и 400 (*г*) кВ А (сплошные линии — с учетом переходных сопротивлений $R_д$=15 мОм, штриховые — металлическое к з)

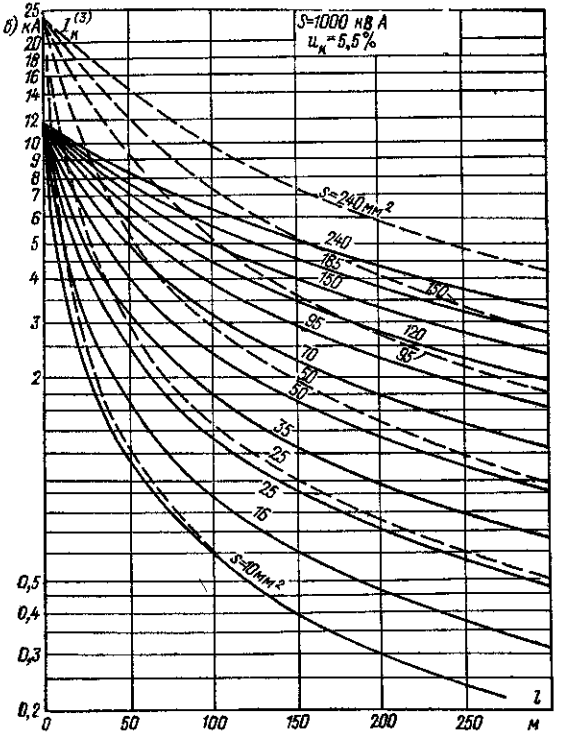


Рис П26

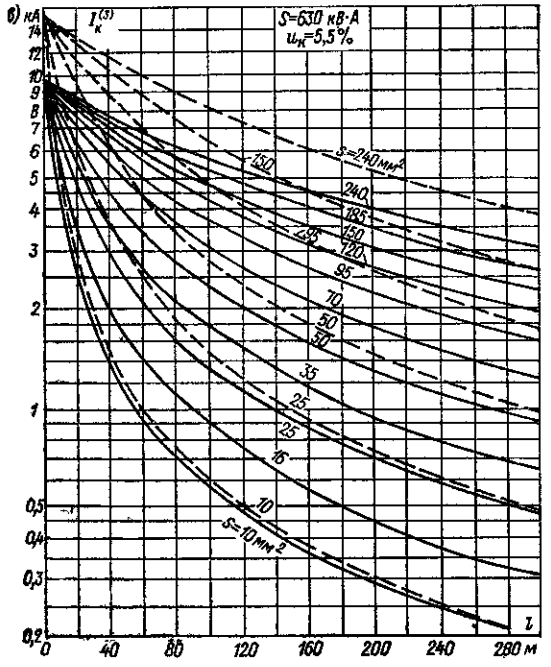


Рис. П2в

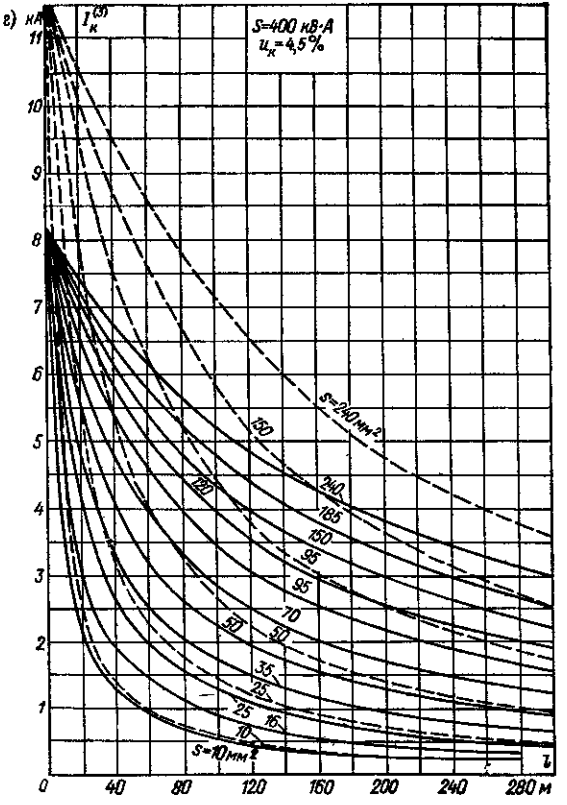


Рис. П2г

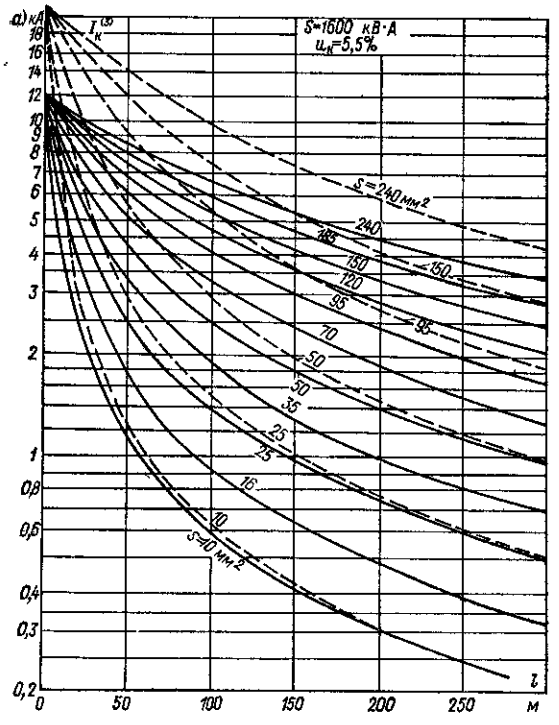


Рис. П3. Токи трехфазных к. з. в зависимости от длины и сечения кабелей с алюминиевыми жилами при $x_0 \Rightarrow x_т$ и мощности трансформатора 1600 (*а*); 1000 (*б*); 630 (*в*); 400 (*г*) кВ·А
(сплошные линии — с учетом переходных сопротивлений $R_д \Rightarrow 15$ мОм, штриховые — металлическое к з)

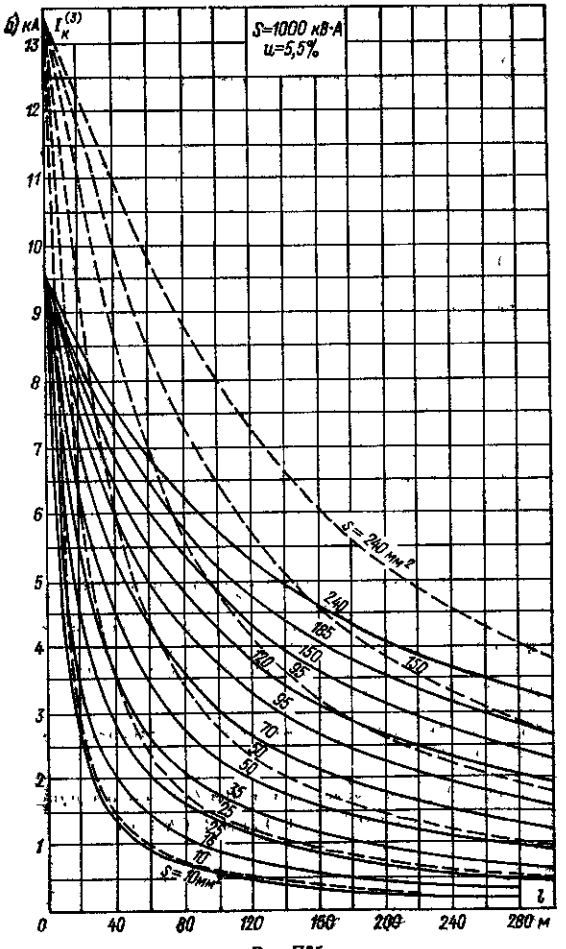


Рис. П36

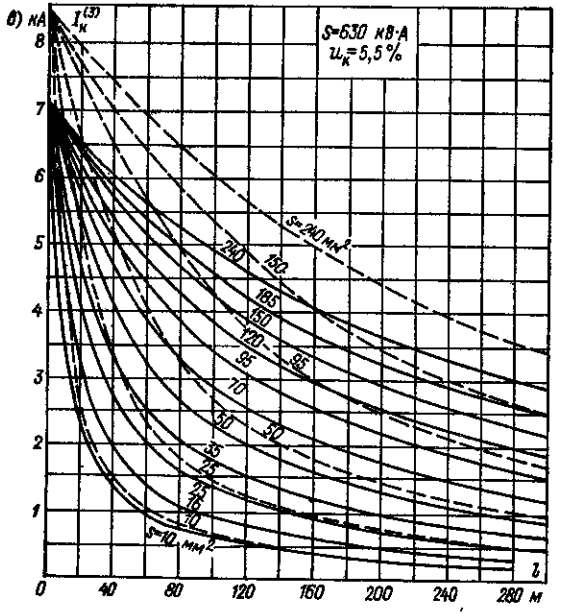


Рис П3в

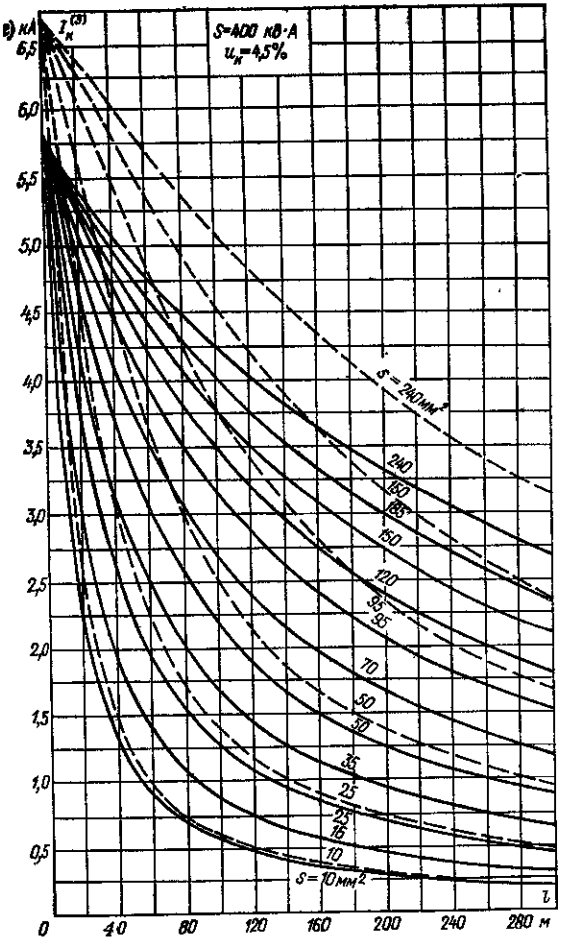


Рис. П3г

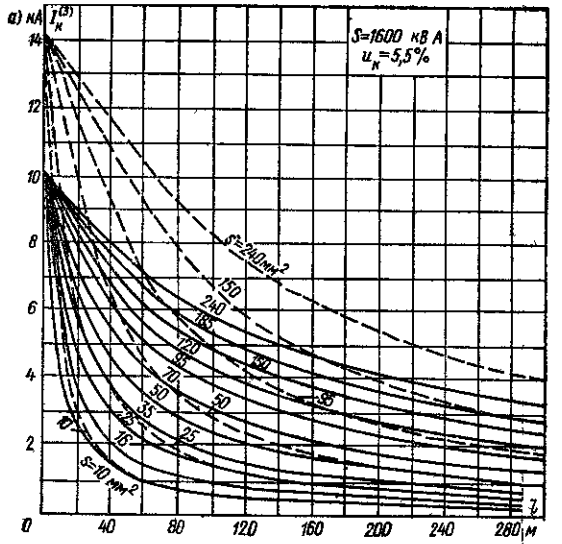


Рис. П4. Токи трехфазных к. з. в зависимости от длины и сечения кабелей с алюминиевыми жилами при $x_0 = 2\,x_т$ и мощности трансформатора 1600 (*а*); 1000 (*б*), 630 (*в*), 400 (*г*) кВ А (сплошные линии — с учетом переходных сопротивлений $R_п = 15$ мОм, штриховые — металлическое к. з.)

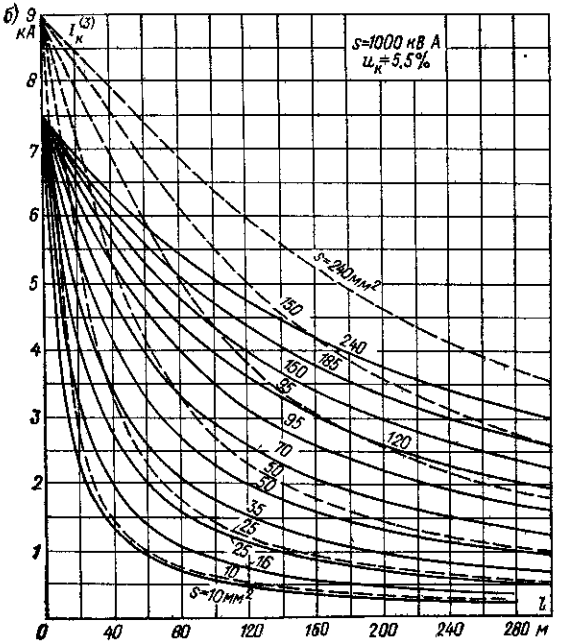


Рис. П4б

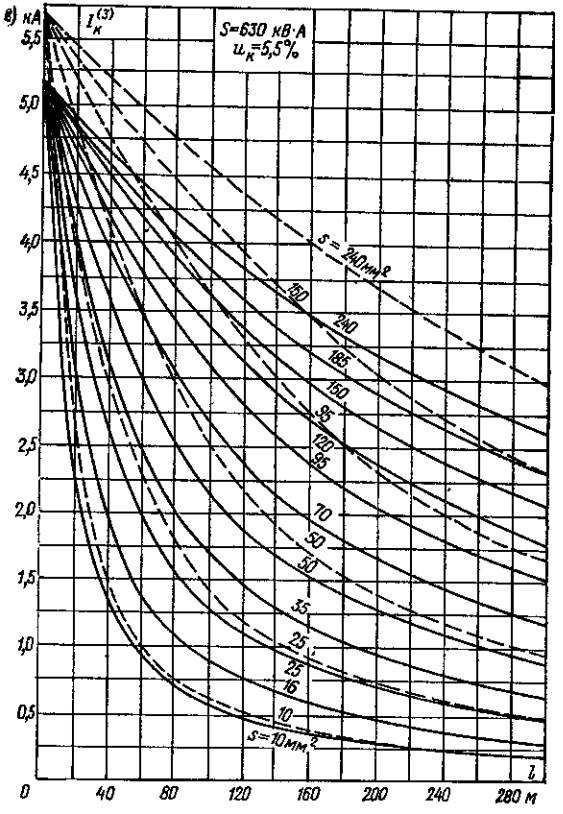


Рис П4в

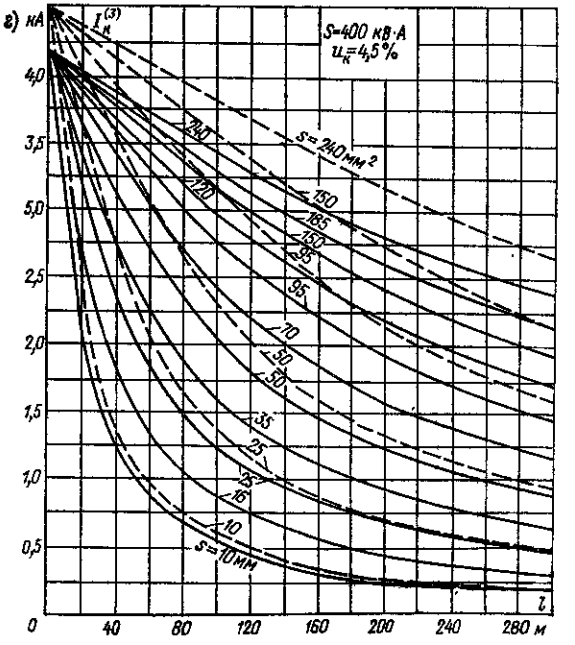


Рис. П4г

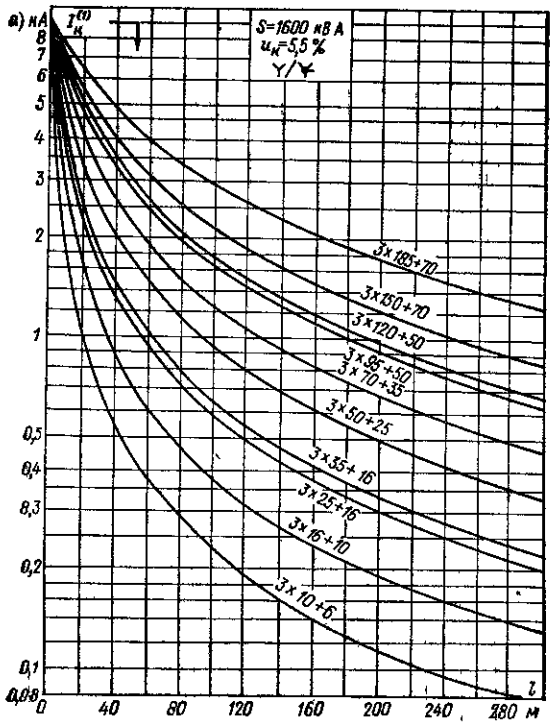


Рис. П5. Токи однофазных к. з. в зависимости от длины и сечения четырехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке при x_0=0 і $x_т$, $R_п$=15 мОм, соединении обмоток трансформатора Y/Y и мощности 1600 (*а*), 1000 (*б*), 630 (*в*) и 400 (*г*) кВ А

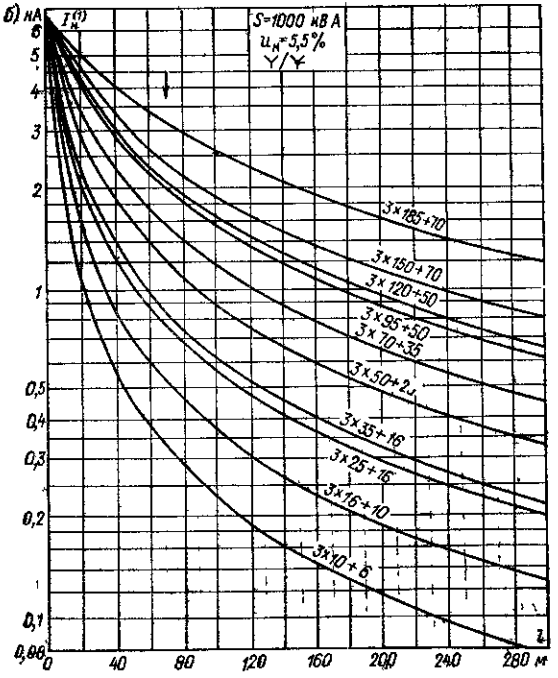


Рис. П5б

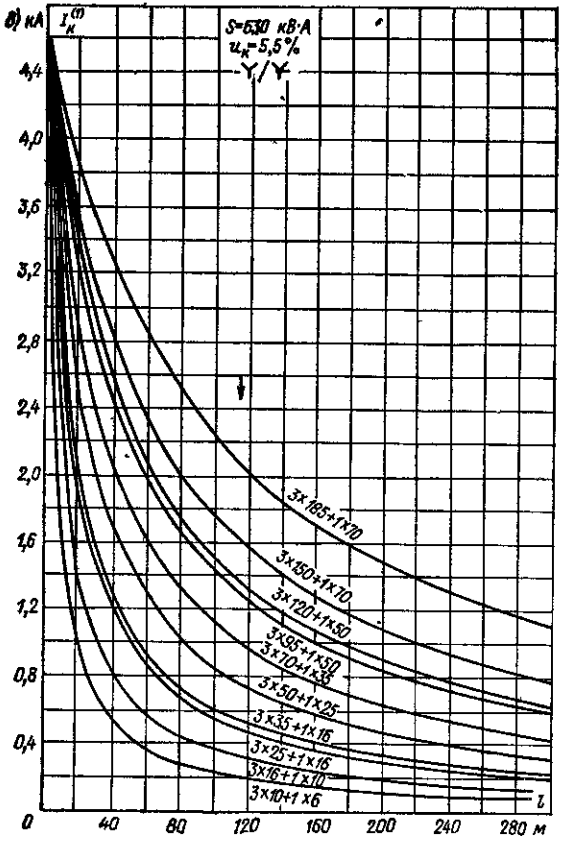


Рис. П5в

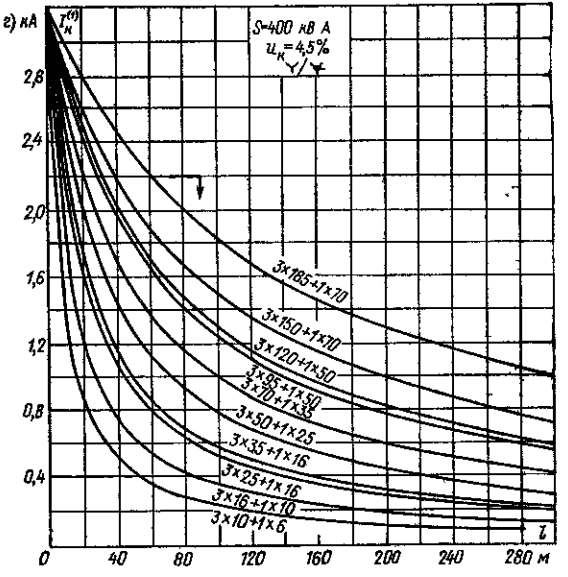


Рис П5г

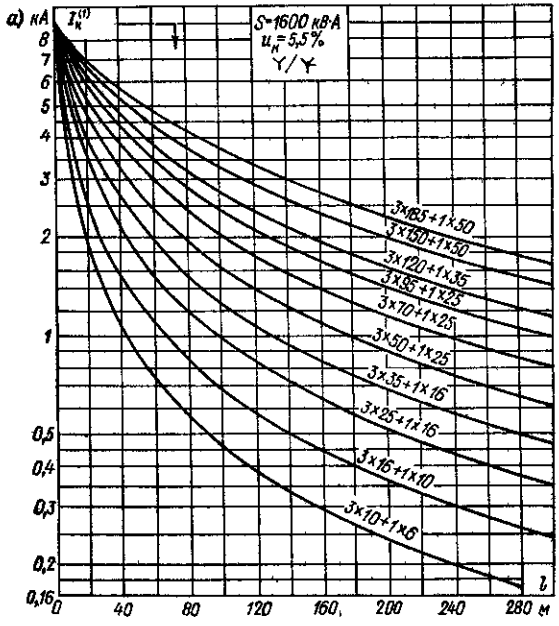


Рис П6 Токи однофазных к. з в зависимости от длины и сечения четырехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке при x_0=0,1 $x_т$, $R_п$=15 мОм, соединении обмоток трансформатора Y/Y и мощности 1600 (*а*), 1000 (*б*), 630 (*в*), 400 (*г*) кВ А

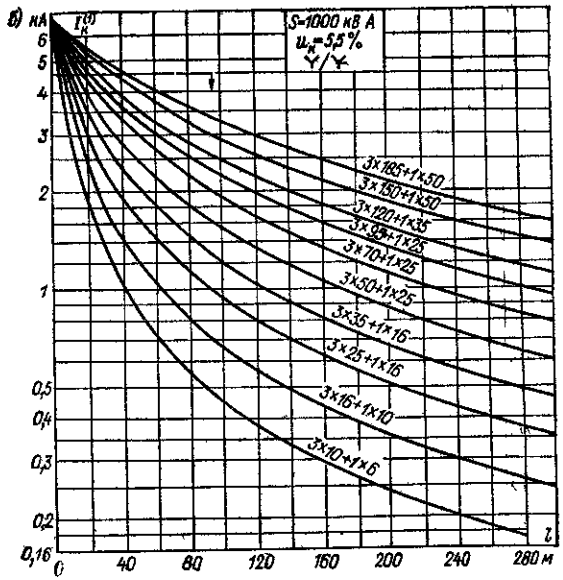
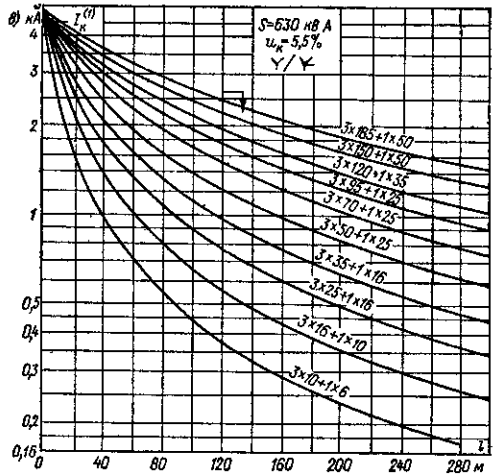


Рис П66



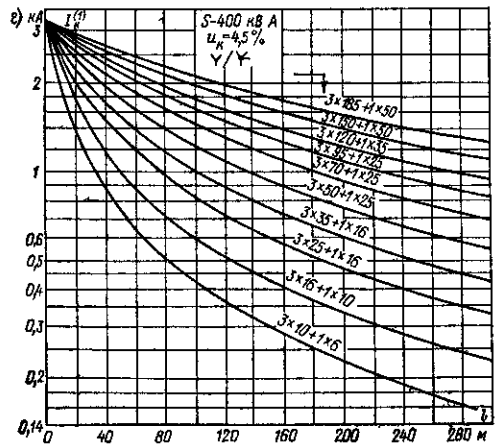


Рис. П6в, г

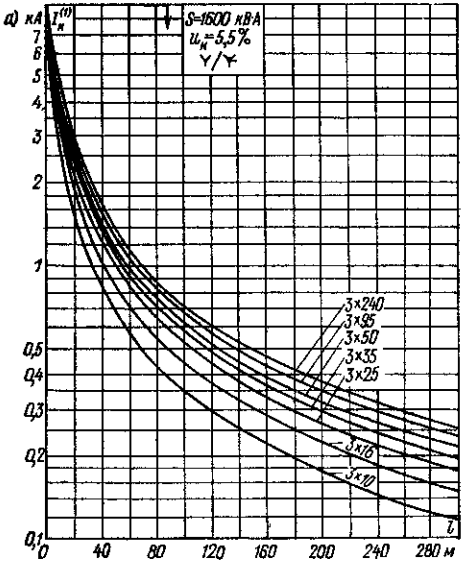


Рис П7. Токи однофазных к. з в зависимости от длины и сечения трехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке с учетом стальной полосы 40×4 мм, проложенной на расстоянии 80 см от кабеля, $R_п$=15 мОм при $x_с$=0,1 $x_т$, соединении обмоток трансформатора Y/Y и мощности 1600 (*а*), 1000 (*б*); 630 (*в*); 400 (*г*) кВ А

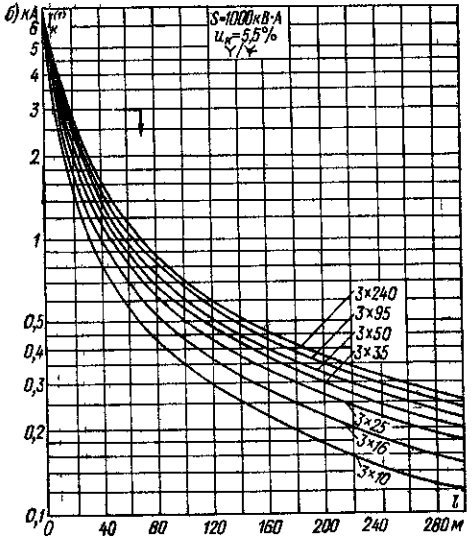
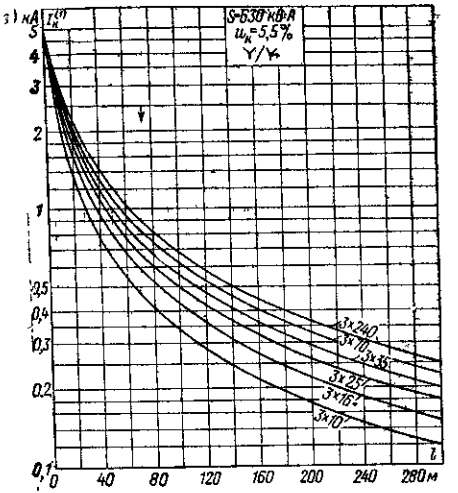


Рис. II76



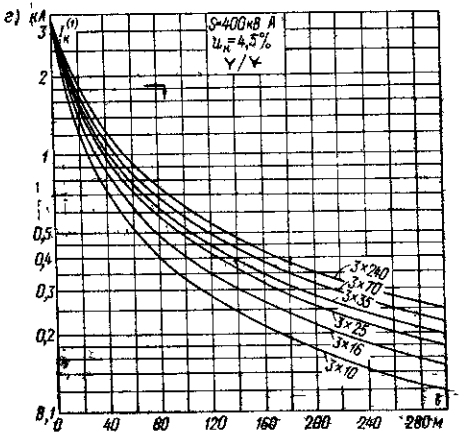


Рис. II7в, г

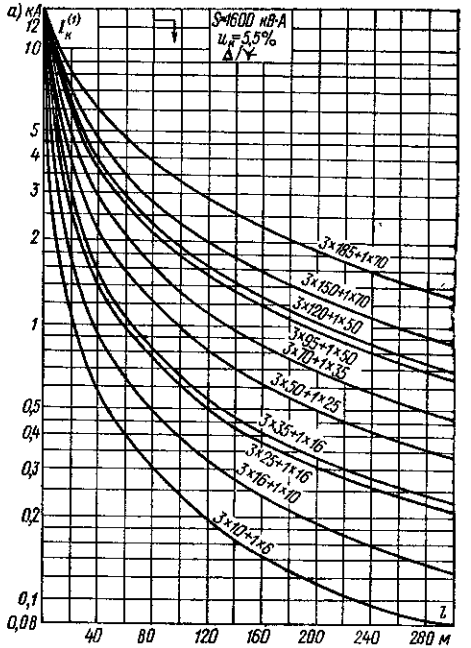


Рис. П8 Токи однофазных к. з. в зависимости от длины и сечения четырехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке при $x_0=0{,}1$ $x_т$, $R_п=15$ мОм, соединении обмоток трансформатора Δ/Y и мощности 1600 (*а*); 1000 (*б*); 630 (*в*); 400 (*г*) кВ·А

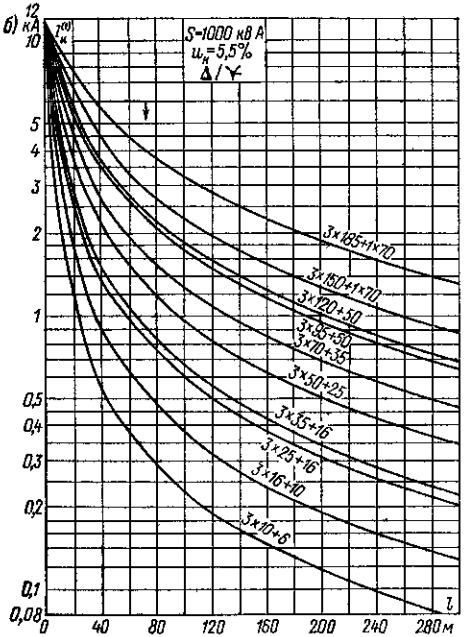


Рис. П8б

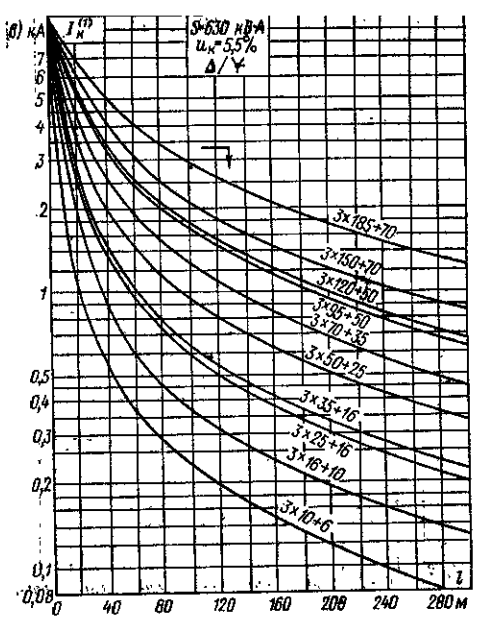


Рис. П8в

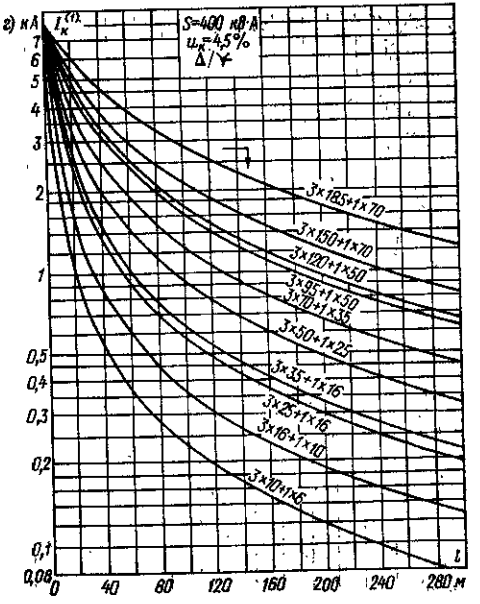
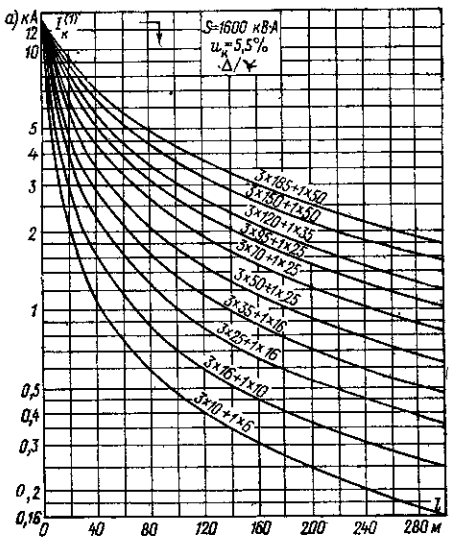


Рис. П8г



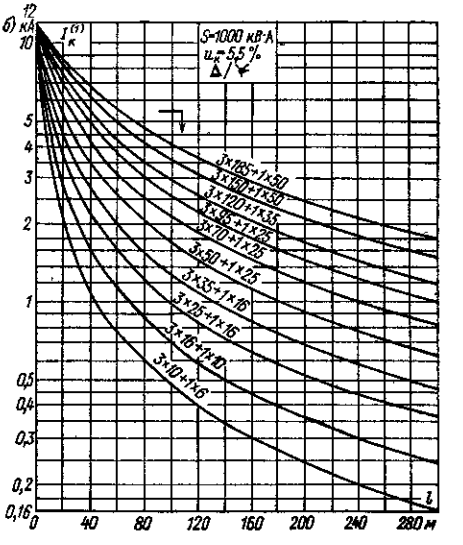
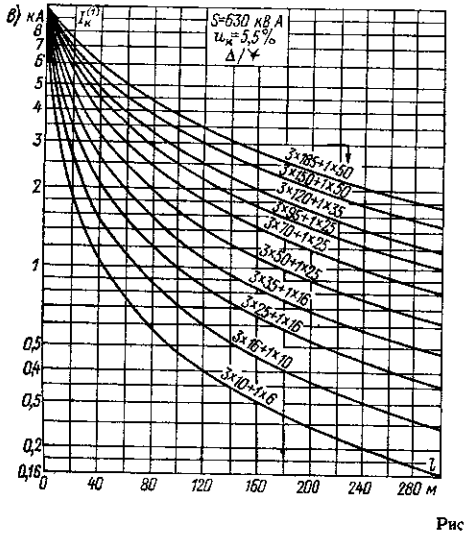


Рис. П9. Токи однофазных к з. в зависимости от длины и сечения четырехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке при x_c=0,1 ... R_c=15 мОм, соединение обмоток трансформатора Δ/Y и мощно-



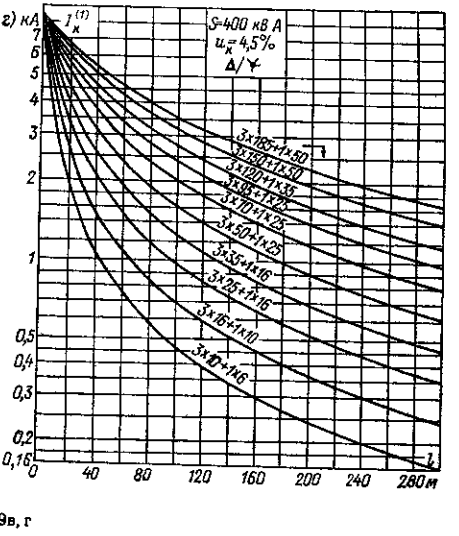


Рис П9в, г

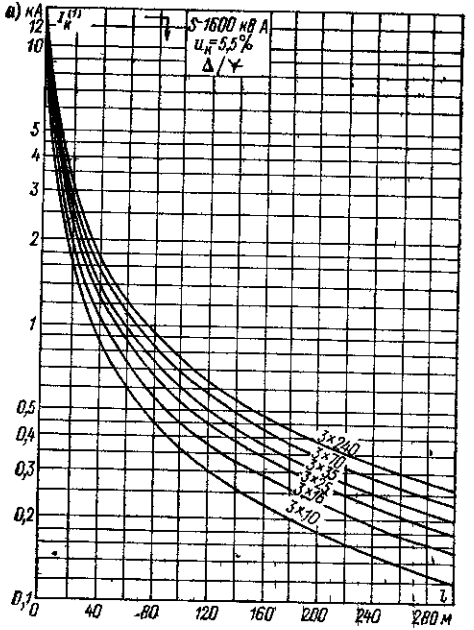


Рис П10 Токи однофазных к. з. в зависимости от длины и сечения трехжильных кабелей с алюминиевыми жилами в непроводящей оболочке с учетом стальной полосы 40×4 мм, проложенной на расстоянии 80 см от кабеля, при x_0=0,1 $x_т$ $R_п$=15 мОм соединении обмоток трансформатора Δ/Y и мощности 1600 (*а*), 1000 (*б*), 630 (*в*); 400 (*г*) кВ А

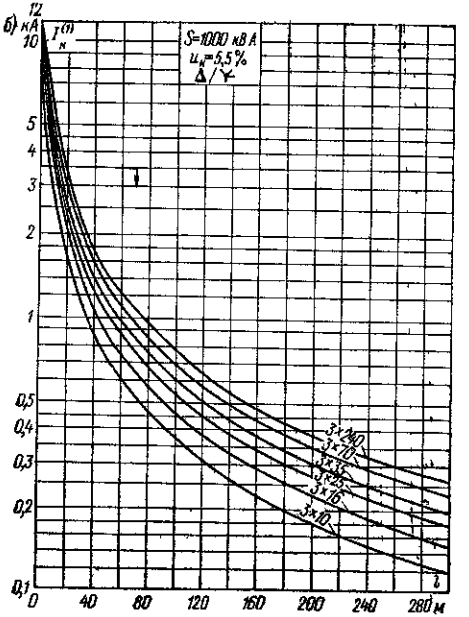


Рис П10б

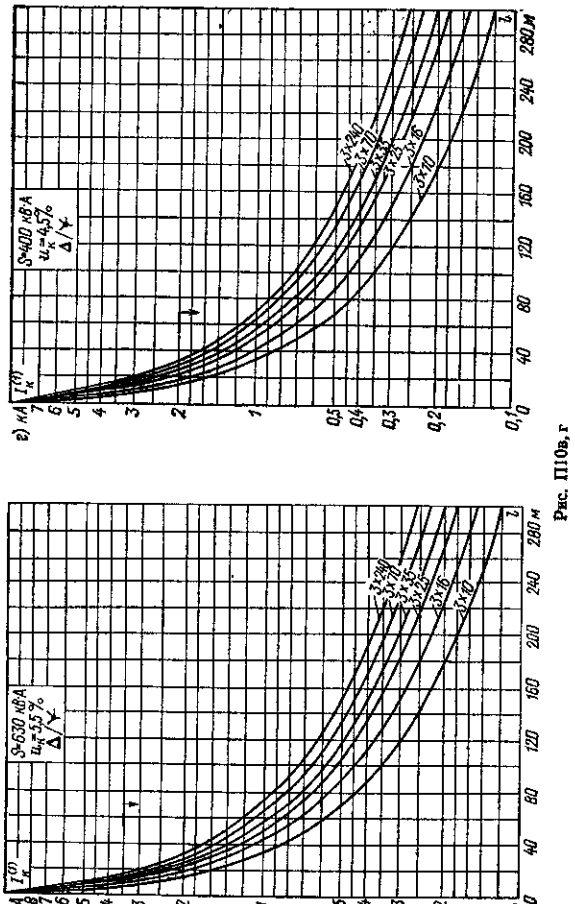


Рис. П10в, г

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байтер И. И.** Защита и АВР электродвигателей собственных нужд. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1980. — 103 с.

2. **Беляев А. В., Шабад М. А.** Учет переходных сопротивлений при выборе защит и аппаратуры в сетях 0,4 кВ//Электрические станции. — 1981. — № 3. — С. 50—55.

3. **Беляев А. В.** Недостатки схем автоматики и защиты комплектных трансформаторных подстанций//Промышленная энергетика. — 1979. — № 2. — С. 35—38.

4. **Беляев А. В., Жарков Б. А.** Схемы подключения и автоматика аварийных и дизель генераторов для питания особых групп потребителей//Промышленная энергетика. — 1981. — № 6. — С. 21—25.

5. **Голубев М. Л.** Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4—35 кВ. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1980. — 86 с.

6. **Голубев М. Л.** Расчет уставок релейной защиты и предохранителей в сетях 0,4—35 кВ. — М.: Энергия, 1969. — 134 с.

7. **Гессен В. Ю.** Аварийные режимы и защита от них в сельскохозяйственных электросетях. — М.; Л.: Сельхозгиз, 1961. — 496 с.

8. **Инструкция** по проектированию силового и осветительного электрооборудования промышленных предприятий СН 357—77. Госстрой СССР, 1977. — 35 с.

9. **Кузнецов Р. С.** Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. — М.: Энергия, 1970. — 543 с.

10. **Кукуевицкий Л. И., Смирнова Т. В.** Справочник реле защиты и автоматики. — М.: Энергия, 1972. — 344 с.

11. **Морозов Н. Р.** Выбор уставок максимальной токовой защиты на автоматических выключателях серии «Электрон»//Электрические станции. — 1981. — № 6. — С. 53—57.

12. **Найфольд М. Р.** Заземление, защитные меры электробезопасности. — М.: Энергия, 1971. — 311 с.

13. **Правила** устройства электроустановок. — 6-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 648 с.

14. **Спеваков П. И.** Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В. — М.: Энергия, 1971. — 88 с.

15. **Справочник** по релейной защите/Под ред. М. А. Берковича. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.—512 с.

16. **Справочник** по проектированию электроснабжения/Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. — 3-е изд. — М.: Энергия, 1980. — 456 с.

17. **Татариицев А. Г.** О выборе уставок защиты от однофазных

коротких замыканий в сетях 0,4 кВ//Электрические станции. — 1984. — № 9. — С. 58—59.

18. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970. — 519 с.

19. **Шабад М. А.** Защита генераторов малой и средней мощности. — М.: Энергия, 1973. — 93 с.

20. **Шабад М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. — 3-е изд.—Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 296 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

1. Схемы сетей 0,4 кВ и их особенности 5
2. Расчеты токов короткого замыкания в сетях 0,4 кВ . . 10
3. Требования к выбоу апларатуры, защит и кабелей . . 44
4. Выбор сечений и длин кабелей 46
5. Выбор автоматических выключателей 50
6. Выбор уставок автоматических выключателей электродвигателей 90
7. Выбор уставок автоматических выключателей питания сборок и щитов 99
8. Особенности расчета и выполнения защиты на вводных выключателях КТП 106
9. Выносная релейная защита электродвигателей, щитов и сборок 115
10. Выбор плавких предохранителей 123
11. Выбор уставок защиты аварийных генераторов 0,4 кВ . 131

Приложение 139
Список литературы 171

Производственное издание

БЕЛЯЕВ АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ВЫБОР АППАРАТУРЫ, ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ В СЕТЯХ 0,4 кВ

Редактор *С. П. Левкович*
Художественный редактор *Т. Ю. Теплицкая*
Технический редактор *А. Г. Рябкина*
Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 1785

Сдано в набор 09.03.88. Подписано в печать 23.06.88. М-26383. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,45. Уч.-изд. л. 9,48. Тираж 60 000 экз. Заказ № 42. Цена 45 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение. 191065 Ленинград, Марсово поле, 1.

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР. 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Уважаемые читатели!

Предлагаем Вашему вниманию следующие книги:

1. **Барг И. Г., Эдельман В. И.** Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности. 1985 г. 75 к.
2. **Влияние** электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: Переводы докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ — 82) Под ред. Ю. П. Шкарина. 1984 г. (Энергетика за рубежом) 1 р. 10 к.
3. **Данилов О. Л., Леончик Б. И.** Экономия при тепловой сушке. 1987 г. (Экономия топлива и электроэнергии). 40 к.
4. **Денисов В. И.** Технико-экономические расчеты в энергетике: Методы экономического сравнения вариантов. 1985 г. 85 к.
5. **Кузнецов П. И., Пчелинцев Л. А.** Последовательное обучение систем диагностики. 1987 г. 35 к.
6. **Михайлов В. В.** Магнитодиэлектрики в устройствах автоматики и релейной защиты. 1986 г. 35 к.
7. **Неверовский Л. В., Мезенцева Е. Б.** Новые методы планирования: Из опыта ЛПЭО «Электросила» им. С. М. Кирова. — 2-е изд. перераб. и доп. 1986 г. (Предприятие — самостоятельность и ответственность). 35 к.
8. **Неклепаев Б. Н.** Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. 1986 г. 1 р. 50 к.
9. **Рощин В. В.** Электрическое освещение лечебно-профилактических учреждений. 1984 г. (Б-ка светотехники; Вып. 12). 25 к.
10. **Шапиро И. М.** Принципы унификации элементов электрической сети 110—330 кВ. 1984 г. 55 к.

Заказы на эти книги следует направлять по адресу: 196066 Ленинград, Московский пр., 189, книжный магазин **«Энергия», отдел «Книга — почтой».**

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ЛЕНИНГРАДСКИЙ КНИЖНЫЙ МАГАЗИН «ЭНЕРГИЯ» — ОПОРНЫЙ ПУНКТ ЭНЕРГОАТОМИЗДАТА

Это значит, что здесь самый широкий ассортимент научной, учебной, производственной и справочной литературы по всем разделам энергетики:

теплотехнике и теплоэнергетике,
гидротехнике и гидроэнергетике,
электроэнергетике и промышленной энергетике,
электротехнике и промышленной электронике,
автоматике и информационно-измерительной технике,
ядерной энергетике, технологии и физике.

Магазин принимает заказы на книги, намеченные к выпуску и имеющиеся в наличии.

Специалисты энергетического профиля!

Указав адрес организации или свой домашний адрес, Вы будете систематически получать все рекламные материалы по интересующей Вас тематике и бланки заказа книг Энергоатомиздата.

Адрес магазина «Энергия»: 196066 Ленинград, Московский пр., 189.

Пользуйтесь услугами магазина — опорного пункта
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТА!