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

ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ
имени Ф.Б. ЯКУБОВСКОГО

УКАЗАНИЯ
ПО ПРОВЕРКЕ КАБЕЛЛЕЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 1 КВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

М788-1083

Москва1993 г.

gost.e-ecolog.ru

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

ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ
имени Ф.Б. ЯКУБОВСКОГО

УКАЗАНИЯ
ПО ПРОВЕРКЕ КАБЕЛЛЕЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 1 КВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

М788-1083

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

Москва1993 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 3

2. Время-токовые характеристики аппаратов защиты 5

3. Вывод формул для определения температуры проводников при адиабатическом процессе нагрева 10

4. Определение температуры проводников в конце короткого замыкания при защите автоматическими выключателями 15

5. Определение температуры проводников в конце короткого замыкания при защите предохранителями 24

6. Определение температуры проводников в конце короткого замыкания при независимом от тока времени срабатывания защиты 29

7. Предельные время-токовые характеристики проводников при адиабатическом процессе нагрева 33

8. Сравнение методов расчета 37

9. Анализ полученных результатов, выводы и рекомендации 42

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проверка кабелей на термическую стойкость заключается в определении температуры их жил в конце короткого замыкания (КЗ). Предельное допустимое значение этой температуры зависит от свойств изоляции кабелей и оговаривается в нормативных документах. Нормативными документами регламентируется и необходимость проверки кабелей на термическую стойкость.

В 1977 г. в связи с недостаточной теплостойкостью пластмассовой изоляции кабелей, выпускаемых отечественной промышленностью, Минэнерго СССР решением Главного технического управления по эксплуатации энергосистем от 10.03.77 N Э-1/77 предложило проверять кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ на термическую стойкость при КЗ. В 1979 г. ГТУ Минэнерго письмом от 13.02.79 N 8-6/12 сообщило, что его рекомендации, изложенные в решении N Э-1/77, не распространяются на кабельные сети промышленных предприятий.

Таким образом, в настоящее время кабели до 1 кВ на промышленных предприятиях проверять на термическую стойкость при КЗ не требуется.

Однако в проекте следующего (7-го) издания "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ) проверка кабелей напряжением до 1 кВ на термическую стойкость при КЗ предусматривается для всех сетей (исключения для кабельных сетей промышленных предприятий не делается). Следовательно, после выхода нового издания ПУЭ проверка кабелей напряжением до 1 кВ на термическую стойкость при КЗ станет обязательной.

Согласно п. 1.4.16 действующих ПУЭ температура жил в конце КЗ не должна превышать для кабелей и проводов с поливинилхлоридной и резиновой изляцией 150°С, для кабелей и проводов с полиэтиленовой изоляцией 120°С.

Расчеты реальных тепловых процессов, происходящих в кабеле при быстром нагревании его жил током КЗ и переходе тепла к изоляции жил, оболочке кабеля и окружающей среде, при существующем многообразии конструктивных исполнений кабелей являются очень

сложными для практического использования, и поэтому такие методики не разрабатывались.

Известное уравнение теплового состояния идеального тела, учитывающее теплоотдачу непосредственно в окружающую среду и описывающее изменение температуры в переходном процессе с помощью экспоненциального закона, когда скорость переходного процесса определяется постоянной времени нагрева, не может быть использовано в данном случае, так как это уравнение выводилось для условий, существенно отличающихся от рассматриваемых.

Для решения поставленной задачи необходимо определить количество тепла, которое за время действия защиты успевает перейти от жилы кабеля к его изоляции, оболочке и окружающей среде. Но поскольку определить эти потери тепла (по отношению к жиле) с достаточной степенью точности не представляется возможным, в настоящей работе выполняются расчеты повышения температуры проводников при адиабатическом процессе, когда все выделяющееся за время КЗ тепло никуда не рассеивается и идет только на нагрев жилы. Такая методика обеспечивает высокую точность расчетов для заведомо ужесточенных исходных предпосылок. Адиабатический процесс - это крайний случай: в реальных условиях какая-то часть тепла для жилы теряется и ее температура всегда будет меньше температуры, рассчитанной с высокой точностью для адиабатического процесса. Причем, чем меньше время отключения КЗ, тем меньше разница между расчетной и реальной температурами.

Результаты расчетов, выполненных при таких предпосылках для проводников всех сечений с учетом реальных время-токовых характеристик аппаратов защиты, позволяют представить общую картину повышения температуры проводников при КЗ и сделать определенные обобщения и выводы.

2. ВРЕМЯ-ТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

Количество тепла, выделяющегося в проводнике, зависит от длительности короткого замыкания, т. е. от времени срабатывания защиты. Поэтому в табл. 1 и 2 приводятся время-токовые характеристики автоматических выключателей и предохранителей, которые используются в настоящей работе при дальнейших расчетах.

Расчеты повышения температуры проводников при КЗ выполняются для того и другого вида аппаратов защиты, так как время-токовые характеристики автоматических выключателей и предохранителей отличаются друг от друга и имеют некоторые характерные особенности.

В тех случаях, когда время-токовая характеристика аппарата защиты в исходной документации задана двумя предельными кривыми, для расчетов берется среднее арифметическое значение времени отключения. Это надо иметь в виду, оценивая конечные результаты расчетов.

К сожалению, как это видно из табл. 1 и 2, разброс значений времени отключения при одной и той же кратности тока КЗ очень большой. Но было бы неправильно делать обобщения, исходя из самых неблагоприятных условий, т. е. принимая для расчетов наибольшее время отключения. К тому же надо иметь в виду, что адиабатический процесс, положенный в работе в основу расчетов, уже является крайним (неблагоприятным) случаем.

Таблица 1. Время-токовые характеристики автоматических выключателей

Тип и номинальный ток выключателя	Номинальный ток расцепителей, А	Время отключения, с					
		с холодного состояния при кратности ТКЗ			с нагретого состояния при кратности ТКЗ		
		3	6	10	3	6	10
ВА51-25-34 25 А	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	110/30	20/5	6/1,2	12/4	3/0,9	0,9/0,36
ВА13-29-33 63 А	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	100/40	20/4	0,4/0,05	60/24	12/2	0,22/0,04
ВА57-35-34 250 А	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	100/12	20/2	7/0,6	32/0,4	6/0,22	2,2/0,16
	80	80/30	12/6	4/1,8	20/5	4/1,4	1,8/0,6
	100; 125	80/30	16/6	6/2	20/4	4/0,6	1/0,2
	160; 200; 250	90/30	18/6	7/2	40/6	10/1,2	4/0,4

Продолжение табл.1

Тип и номинальный ток выключателя	Номинальный ток расцепителей, А	Время отключения, с					
		с холодного состояния при кратности ТКЗ			с нагретого состояния при кратности ТКЗ		
		3	6	10	3	6	10
ВА52-39-34 630 А	250; 320; 400; 500; 630	100 / 20	10 / 2,4	4 / 1	20 / 2	2,4 / 0,4	1 / 0,2
ВА51-39-34 630 А	400; 500; 630	100 / 20	10 / 2,4	4 / 1	20 / 2	2,4 / 0,4	1 / 0,2

Примечания: 1. Время-токовые характеристики автоматических выключателей в заводской документации даются в виде двух предельных кривых, которыми определяется возможный разброс времени отключения. В таблице в числителе указано время отключения по верхней кривой, в знаменателе - по нижней.

2. ТКЗ - ток короткого замыкания.

Таблица 2. Время-токовые характеристики предохранителей

Тип предохранителя	Номинальный ток плавкой вставки, А	Время отключения, с, при кратности ТКЗ			
		3	6	10	40
ПРС-10	10	1000	1,2	0,5	0,1
ПРС-25	16; 20	20	0,6	0,45	0,1
	25	350	2	0,6	0,1
ПРС-63	40	40	1	0,5	0,2
	63	60	1	0,5	0,2
ПРС-100	80	7	0,5	0,25	0,07
	100	10	0,6	0,3	0,07
НПН2-60	10	1000	50	0,6	0,02
	16; 20; 25	1000	1,2	0,2	0,02
	31,5	100	0,5	0,12	0,02
	40	20	0,4	0,1	0,02
	63	2	0,2	0,08	0,02
ПН2-100	31,5; 40; 50; 63; 80; 100	60 / 10	1 / 0,2	0,1 / 0,04	0,014 / 0,007
ПН2-250	80; 100; 125; 160; 200; 250	150 / 20	4 / 0,4	0,4 / 0,08	0,022 / 0,01

Продолжение табл. 2

Тип предохранителя	Номинальный ток плавкой вставки, А	Время отключения, с, при кратности ТКЗ			
		3	6	10	40
ПН2-400	200; 250; 315; 355; 400	150 / 20	4 / 1	0,4 / 0,2	0,02 / 0,005
ПН2-400	315; 400; 500; 630	120 / 30	4 / 1	0,3 / 0,1	0,02 / 0,012

Примечание. Для предохранителей ПН2 в числителе указано время отключения по верхней кривой, в знаменателе – по нижней. Характеристики остальных предохранителей даны в заводской документации одной линией.

3. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДНИКОВ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Приращение температуры проводника при КЗ (для адиабатического процесса) можно выразить формулой:

$$\Delta\theta = \frac{Q}{C} = \frac{I_{кз}^2 Rt}{C_{уд} G}, \qquad (1)$$

где $\Delta\theta$ – приращение температуры проводника, ^{o}C;

Q – количество тепла, выделившегося в проводнике при КЗ, Дж;

C – теплоемкость проводника, Дж/^{o}C;

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А;

R – активное сопротивление проводника, Ом;

t – продолжительность действия тока КЗ, с;

$C_{уд}$ – удельная теплоемкость проводника, Дж/(кг·^{o}C);

G – масса проводника, кг.

Так как проводник нагревается равномерно по всей длине и результаты расчетов от его длины не зависят, в дальнейшем при выводе формул длина проводника принимается равной 1 м.

Для кабелей и проводов с алюминиевыми жилами

$$R = R_{20} K_т = \frac{0{,}03126}{S} K_т, \qquad (2)$$

где R_{20} – сопротивление проводника при 20^{o}C, Ом;

$K_т$ – температурный коэффициент электрического сопротивления;

S – сечение проводника, мм^2.

Сопротивление проводника при 20^{o}C определяется в работе по удельному сопротивлению, вычисленному по данным таблицы 2.53 (значения сопротивлений кабелей при 20^{o}C) в "Справочнике по проектированию электроснабжения" под редакцией Ю. Г. Барыбина, Л. Е. Федорова и др., Москва, Энергоатомиздат, 1990 г.

Алюминиевый проводник длиной 1 м сечением 1 мм^2 имеет об'ем

1 $см^3$ и массу 0,00271 кг. Поэтому зависимость массы проводника от его сечения для принятых нами условий выражается формулой

$$G = 0{,}00271S.$$

Принимая во внимание, что для алюминия

$$C_{уд} = 884 \text{ Дж/(кг}\cdot{}^{\circ}\text{C)},$$

можно формулу (1) представить в виде:

$$\Delta\theta = \frac{I_{кз}^2 \dfrac{0{,}03126}{S} K_т t}{884 \cdot 0{,}00271 S} = 0{,}01305 K_т \frac{I_{кз}^2 t}{S^2}. \qquad (3)$$

При расчете токов короткого замыкания учитывается увеличение сопротивления проводников в результате их нагревания током КЗ. Поэтому значение R в формуле (1) должно соответствовать повышенной температуре проводника. Приведение сопротивления проводника к повышенной (расчетной) температуре выполняется с помощью температурного коэффициента электрического сопротивления $K_т$.

Так как температура проводника при КЗ нарастает по линейному закону (рассматривается адиабатический процесс), за ее расчетное значение для определения температурного коэффициента можно принять среднее значение за время КЗ:

$$\theta_{ср} = \frac{\theta_{нач} + \theta_{доп}}{2},$$

где $\theta_{ср}$ – среднее значение температуры проводника за время КЗ, $^{\circ}C$;

$\theta_{нач}$ – температура проводника в начале КЗ, $^{\circ}C$;

$\theta_{доп}$ – допустимая по ПУЭ температура проводника в конце КЗ, $^{\circ}C$.

Для проводников с алюминиевыми жилами

$$K_т = 1 + 0{,}0044(\theta_{ср} - 20) = 1 + 0{,}0044 \left(\frac{\theta_{нач} + \theta_{доп}}{2} - 20\right) =$$

$$= 1 + 0{,}0022(\theta_{нач} + \theta_{доп}) - 0{,}088 = 0{,}912 + 0{,}0022(\theta_{нач} + \theta_{доп}).$$

Подставляя в формулу (3) последнее выражение для $K_т$, получим:

$$\Delta\theta = 0{,}01305\,[0{,}912 + 0{,}0022(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\,\frac{I_{кз}^2 t}{S^2} =$$

$$= [0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\,\frac{I_{кз}^2 t}{S^2}. \qquad (4)$$

Конечную температуру алюминиевой жилы проводника в конце КЗ можно теперь выразить формулой

$$\theta_{кон} = \theta_{нач} + \Delta\theta =$$

$$= \theta_{нач} + [0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\frac{I_{кз}^2 t}{S^2}. \qquad (5)$$

Назовем в формуле (5) сомножитель в скобках коэффициентом начальных условий и обозначим его $K_{нач}$.

$$K_{нач} = 0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп}). \qquad (6)$$

Ток КЗ выразим через кратность его к уставке защиты:

$$I_{кз} = I_у K,$$

где $I_у$ – уставка аппарата защиты, А;

K – кратность тока короткого замыкания (ТКЗ) к уставке защиты.

Тогда формула (5) примет вид:

$$\theta_{кон} = \theta_{нач} + K_{нач}(I_у/S)^2 K^2 t. \qquad (7)$$

Для проводников с алюминиевыми жилами и поливинилхлоридной изоляцией, учитывая формулы (6) и (7), можно написать:

при КЗ с холодного состояния (перед КЗ проводник был без нагрузки)

$$K_{нач} = 0{,}012 + 0{,}000029(20 + 150) = 0{,}01693,$$
$$\theta_{кон} = 20 + 0{,}01693(I_у/S)^2 K^2 t; \qquad (8)$$

при КЗ с нагретого состояния (перед КЗ проводник был нагрет длительно допустимым током)

$$K_{нач} = 0{,}012 + 0{,}000029(65 + 150) = 0{,}01824,$$
$$\theta_{кон} = 65 + 0;01824(I_у/S)^2 K^2 t. \qquad (9)$$

Аналогичные формулы для проводников с алюминиевыми жилами и полиэтиленовой изоляцией:

при КЗ с холодного состояния

$$K_{нач} = 0,012 + 0,000029(20 + 120) = 0,01606,$$
$$\theta_{кон} = 20 + 0,01606(I_y/S)^2K^2t; \qquad (10)$$

при КЗ с нагретого состояния

$$K_{нач} = 0,012 + 0,000029(65 + 120) = 0,1736,$$
$$\theta_{кон} = 65 + 0,01736(I_y/S)^2K^2t. \qquad (11)$$

Формула (1) дана в общем виде и справедлива как для алюминиевых, так и для медных проводников. Последующие формулы (2) - (11), в которых физические свойства проводникового материала учитываются численными значениями, выведены для проводников с алюминиевыми жилами. Для медных проводников эти формулы имеют такой же вид, но другие значения коэффициентов.

Формулы для проводников с медными жилами (12) - (21) приводятся ниже без подробного вывода. Необходимые пояснения были даны при выводе формул (2) - (11).

Формулы для проводников с медными жилами:

$$R = R_{20}K_т = \frac{0,0185}{S}K_т; \qquad (12)$$

$$G = 0,0089S;$$
$$C_{уд} = 411\ Дж/(кг\cdot{}^{o}C);$$

$$\Delta\theta = \frac{I_{кз}^2\frac{0,0185}{S}K_тt}{411\cdot0,0089S} = 0,005057K_т\frac{I_{кз}^2t}{S^2}; \qquad (13)$$

$$K_т = 1 + 0,0041\left(\frac{\theta_{нач} + \theta_{доп}}{2} - 20\right) = 1 + 0,00205(\theta_{нач} +$$

$$+ \theta_{доп}) - 0,082 = 0,918 + 0,00205(\theta_{нач} + \theta_{доп});$$

$$\Delta\theta = 0{,}005057[0{,}918 + 0{,}00205(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\frac{I_{кз}^2 t}{S^2} =$$

$$= [0{,}004643 + 0{,}0000103(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\frac{I_{кз}^2 t}{S^2}; \qquad (14)$$

$$\theta_{кон} = \theta_{нач} + \Delta\theta =$$

$$= \theta_{нач} + [0{,}004643 + 0{,}0000103(\theta_{нач} + \theta_{доп})]\frac{I_{кз}^2 t}{S^2}; \qquad (15)$$

$$K_{нач} = 0{,}004643 + 0{,}0000103(\theta_{нач} + \theta_{доп}); \qquad (16)$$

$$I_{кз} = I_y K;$$

$$\theta_{кон} = \theta_{нач} + K_{нач}(I_y S)^2 K^2 t; \qquad (17)$$

Для проводников с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией:

при КЗ с холодного состояния

$$K_{нач} = 0{,}004643 + 0{,}0000103(20 + 150) = 0{,}006394,$$

$$\theta_{кон} = 20 + 0{,}006394(I_y/S)^2 K^2 t; \qquad (18)$$

при КЗ с нагретого состояния

$$K_{нач} = 0{,}004643 + 0{,}0000103(65 + 150) = 0{,}006857,$$

$$\theta_{кон} = 65 + 0{,}006857(I_y/S)^2 K^2 t. \qquad (19)$$

Для проводников с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией:

при КЗ с холодного состояния

$$K_{нач} = 0{,}004643 + 0{,}0000103(20 + 120) = 0{,}006085,$$

$$\theta_{кон} = 20 + 0{,}006085(I_y/S)^2 K^2 t; \qquad (20)$$

при КЗ с нагретого состояния

$$K_{нач} = 0{,}004643 + 0{,}0000103(65 + 120) = 0{,}006548,$$

$$\theta_{кон} = 65 + 0{,}006548(I_y/S)^2 K^2 t. \qquad (21)$$

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДНИКОВ В КОНЦЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

В табл. 3. – 6 приведены сечения трехжильных кабелей и их длительно допустимые токи при прокладке в воздухе ($I_{доп}$) в соответствии с табл. 1.3.6 и 1.3.7 ПУЭ. Для защиты кабелей применены автоматические выключатели. Номинальные токи расцепителей автоматических выключателей ($I_{у}$) выбраны по табл. 1 ближайшими большими к длительно допустимому току кабелей. Время короткого замыкания определено по табл. 1 как среднее арифметическое двух значений: по верхней и нижней кривым.

Для этих условий, которые по выполнению защиты очень близки к реальным, сделан расчет температуры жилы в конце КЗ. Расчет выполнялся по формулам (8) – (11), (18) – (21).

Граница зоны, в которой даже при адиабатическом процессе нагрева температура жил не выходит за допустимые пределы, показана в каждой таблице ломаной линией.

Таблица 3. Температура алюминиевой жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при защите автоматическими выключателями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
2,5	19	20	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	703 149	508 147	410 139	ВА51-25-34 25 А
4	27	31,5	70 42	12 7	0,22 0,13	681 492	474 350	43 80	ВА13-29-33 63 А
6	32	40	70 42	12 7	0,22 0,13	494 371	345 269	37 76	
10	42	50	70 42	12 7	0,22 0,13	287 237	203 180	29 71	
16	60	63	70 42	12 7	0,22 0,13	185 172	133 136	26 69	
25	75	80	55 12,5	9 2,7	2,9 1,2	106 86	76 83	70 87	ВА57-35-34 250 А
35	90	100	55 12	11 2,3	4 0,6	88 81	75 77	75 74	
50	110	125	55 12	11 2,3	4 0,6	72 77	62 74	62 72	

Продолжение табл. 3

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
70	140	160	60 23	12 5,6	4,5 2,2	68 85	58 84	60 86	ВА57-35-34 250 А
95	170	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	61 82	52 81	54 83	
120	200	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	45 75	40 75	41 76	
150	235	250	60 23	12 5,6	4,5 2,2	45 75	40 75	41 76	
185	270	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	47 70	31 68	33 68	ВА52-39-34 630 А

П р и м е ч а н и я: 1. Расчет по формулам (8), (9).

2. Первое значение времени отключения (и конечной температуры жилы) дано для КЗ с холодного состояния, второе (под первым) – для КЗ с нагретого состояния.

Таблица 4. Температура алюминиевой жилы кабеля с полиэтиленовой изоляцией в конце КЗ при защите автоматическими выключателями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
2,5	19	20	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	668 145	483 143	390 135	ВА51-25-34 25 А
4	27	31,5	70 42	12 7	0,22 0,13	647 472	450 336	42 79	ВА13-29-33 63 А
6	32	40	70 42	12 7	0,22 0,13	470 357	328 259	36 75	
10	42	50	70 42	12 7	0,22 0,13	273 229	193 174	29 71	
16	60	63	70 42	12 7	0,22 0,13	177 167	128 123	25 68	
25	75	80	55 12,5	9 2,7	2,9 1,2	101 85	73 82	68 86	ВА57-35-34 250 А
35	90	100	55 12	11 2,3	4 0,6	85 80	72 77	72 74	
50	110	125	55 12	11 2,3	4 0,6	70 77	60 74	60 72	

Продолжение табл. 4

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
70	140	160	60 23	12 5,6	4,5 2,2	65 84	56 83	58 85	ВА57-35-34 250 А
95	170	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	58 81	51 81	52 82	
120	200	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	44 75	39 75	40 76	
150	235	250	60 23	12 5,6	4,5 2,2	44 75	39 75	40 76	
185	270	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	46 70	31 68	32 68	ВА52-39-34 630 А

Примечания: 1. Расчет по формулам (10), (11).

2. См. примечание 2 к табл. 3.

Таблица 5. Температура медной жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при защите автоматическими выключателями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
1,5	19	20	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	736 153	531 151	429 142	ВА51-25-34 25 А
2,5	25	25	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	423 114	308 113	250 108	
4	35	40	70 42	12 7	0,22 0,13	423 324	296 238	34 74	ВА13-29-33 63 А
6	42	50	70 42	12 7	0,22 0,13	300 248	212 185	30 71	
10	55	63	70 42	12 7	0,22 0,13	180 168	130 134	26 69	
16	75	80	55 12,5	9 2,7	2,9 1,2	99 84	72 82	66 86	ВА57-35-34 250 А
25	95	100	55 12	11 2,3	4 0,6	71 77	61 74	61 72	
35	120	125	55 12	11 2,3	4 0,6	60 74	52 72	53 70	

Продолжение табл. 5

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
50	145	160	60 23	12 5,6	4,5 2,2	55 80	48 79	49 80	ВА57-35-34 250 А
70	180	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	48 77	43 76	43 77	
95	220	250	60 23	12 5,6	4,5 2,2	44 15	39 75	40 75	
120	260	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	45 70	30 67	31 68	ВА52-39-34 630 А
150	305	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	36 68	26 67	27 67	
185	350	400	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	36 68	27 67	27 67	

Примечания: 1. Расчет по формулам (18), (19).

2. См. примечание 2 к табл. 3.

Таблица 6. Температура медной жилы кабеля
с полиэтиленовой изоляцией
в конце КЗ при защите автоматическими выключателями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
1,5	19	20	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	701 149	507 147	409 138	ВА51-25-34 25 А
2,5	25	25	70 8	12,5 1,95	3,6 0,63	403 112	294 111	239 106	
4	35	40	70 42	12 7	0,22 0,13	403 312	283 230	33 74	ВА13-29-33 63 А
6	42	50	70 42	12 7	0,22 0,13	286 237	203 180	29 71	
10	55	63	70 42	12 7	0,22 0,13	172 163	124 130	25 68	
16	75	80	55 12,5	9 2,7	2,9 1,2	95 83	69 81	64 85	ВА57-35-34 250 А
25	95	100	55 12	11 2,3	4 0,6	68 76	59 74	59 71	
35	120	125	55 12	11 2,3	4 0,6	58 74	51 72	51 70	

Продолжение табл. 6

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Автоматический выключатель
			3	6	10	3	6	10	
50	145	160	60 23	12 5,6	4,5 2,2	54 79	47 79	48 80	ВА57-35-34 250 А
70	180	200	60 23	12 5,6	4,5 2,2	47 76	41 76	42 77	
95	220	250	60 23	12 5,6	4,5 2,2	43 74	38 74	39 75	
120	260	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	43 70	30 67	31 68	ВА52-39-34 630 А
150	305	320	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	35 68	26 67	27 67	
185	350	400	60 11	6,2 1,4	2,5 0,6	35 68	26 67	27 67	

Примечания: 1. Расчет по формулам (20), (21).

2. См. примечание 2 к табл. 3.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДНИКОВ В КОНЦЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

Табл. 7 – 10 выполнены аналогично табл. 3 – 6 для случаев защиты кабелей предохранителями. Номинальные токи плавких вставок предохранителей ($I_у$) выбраны для защиты по табл. 2 ближайшими большими к длительно допустимому току кабелей. Время отключения короткого замыкания взято по табл. 2. Для тех случаев, когда время-токовая характеристика предохранителя задана двумя кривыми, время отключения определено как среднее арифметическое двух значений: по верхней и нижней кривым.

Расчет выполнялся для КЗ с нагретого состояния по формулам (9), (11), (19), (21).

Таблица 7. Температура алюминиевой жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при защите предохранителями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Предохранитель
			3	6	10	3	6	10	
2,5	19	20	20	0,6	0,45	275	90	118	ПРС-25
4	27	31,5	35	0,6	0,07	421	89	73	ПН2-100
6	32	40	40	1	0,5	357	94	106	ПРС-63
10	42	50	35	0,6	0,07	209	75	68	ПН2-100
16	60	63	60	1	0,5	218	75	77	ПРС-63
25	75	80	7	0,5	0,25	77	68	70	ПРС-100
35	90	100	10	0,6	0,3	78	68	69	
50	110	125	85	2,2	0,24	152	74	68	ПН2-250
70	140	160	85	2,2	0,24	138	73	67	
95	170	200	85	2,2	0,24	127	71	67	
120	200	200	85	2,2	0,24	103	69	66	
150	235	250	85	2,2	0,24	104	69	66	
185	270	315	85	2,5	0,3	105	70	67	ПН2-400

Примечание. Расчет по формуле (9) для КЗ с нагретого состояния.

Таблица 8. Температура алюминиевой жилы кабеля с полиэтиленовой изоляцией в конце КЗ при защите предохранителями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, ^{o}C, при кратности ТКЗ			Предохранитель
			3	6	10	3	6	10	
2,5	19	20	20	0,6	0,45	265	89	115	ПРС-25
4	27	31,5	35	0,6	0,07	404	88	73	ПН2-100
6	32	40	40	1	0,5	343	93	104	ПРС-63
10	42	50	35	0,6	0,07	202	74	68	ПН2-100
16	60	63	60	1	0,5	210	75	78	ПРС-63
25	75	80	7	0,5	0,25	76	68	69	ПРС-100
35	90	100	10	0,6	0,3	78	68	69	
50	110	125	85	2,2	0,24	148	74	68	ПН2-250
70	140	160	85	2,2	0,24	134	72	67	
95	170	200	85	2,2	0,24	124	71	67	
120	200	200	85	2,2	0,24	102	69	66	
150	235	250	85	2,2	0,24	102	69	66	
185	270	315	85	2,5	0,3	104	70	67	ПН2-400

Примечание. Расчет по формуле (11) для КЗ с нагретого состояния.

Таблица 9. Температура медной жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при защите предохранителями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ			Предохранитель
			3	6	10	3	6	10	
1,5	19	20	20	0,6	0,45	284	91	120	ПРС-25
2,5	25	25	350	2	0,6	2225	114	106	
4	35	40	40	1	0,5	312	90	99	ПРС-63
6	42	50	35	0,6	0,07	215	75	68	ПН2-100
10	55	63	60	1	0,5	212	75	79	ПРС-63
16	75	80	7	0,5	0,25	76	68	69	ПРС-100
25	95	100	10	0,6	0,3	75	67	68	
35	120	125	85	2,2	0,24	132	72	67	ПН2-250
50	145	160	85	2,2	0,24	119	71	67	
70	180	200	85	2,2	0,24	108	69	66	
95	220	250	85	2,2	0,24	101	69	66	
120	260	315	85	2,5	0,3	101	69	66	ПН2-400
150	305	315	85	2,5	0,3	88	68	66	
185	350	355	85	2,5	0,3	84	67	66	

Примечание. Расчет по формуле (19) для КЗ с нагретого состояния.

Таблица 10. Температура медной жилы кабеля
с полиэтиленовой изоляцией
в конце КЗ при защите предохранителями

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	Время отключения t, с, при кратности ТКЗ			Температура жилы $\theta_{кон}$, ^{o}С, при кратности ТКЗ			Предохранитель
			3	6	10	3	6	10	
1,5	19	20	20	0,6	0,45	275	90	117	ПРС-25
2,5	25	25	350	2	0,6	2128	112	104	
4	35	40	40	1	0,5	301	89	98	ПРС-63
6	42	50	35	0,6	0,07	208	75	68	ПН2-100
10	55	63	60	1	0,5	205	74	78	ПРС-63
16	75	80	7	0,5	0,25	75	68	69	ПРС-100
25	95	100	10	0,6	0,3	74	67	68	
35	120	125	85	2,2	0,24	129	72	67	ПН2-250
50	145	160	85	2,2	0,24	116	70	67	
70	180	200	85	2,2	0,24	106	69	66	
95	220	250	85	2,2	0,24	100	69	66	
120	260	315	85	2,5	0,3	100	69	66	ПН2-400
150	305	315	85	2,5	0,3	87	68	66	
185	350	355	85	2,5	0,3	83	67	66	

Примечание. Расчет по формуле (21) для КЗ с нагретого состояния.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДНИКОВ В КОНЦЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ НЕЗАВИСИМОМ ОТ ТОКА ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

В разделах 4 и 5 расчеты конечной температуры проводников сделаны для случаев, когда токи КЗ лежат в зоне действия *обратнозависимой от тока характеристики защиты: при возрастании* тока время срабатывания защиты уменьшается.

Но токи короткого замыкания могут выходить за пределы этой зоны, и тогда время действия защиты становится практически постоянным и не уменьшается с возрастанием тока. Например, при токах КЗ, превышающих уставку отсечки, время срабатывания автоматических выключателей остается одинаковым для всех значений тока. У предохранителей при больших кратностях токов КЗ время перегорания плавкой вставки также практически не зависит от значения тока. Наконец, отсечка селективных автоматических выключателей срабатывает при КЗ с заранее заданной выдержкой времени, превышающей собственное время срабатывания выключателей в несколько раз. Возникают опасения, что температура проводников при этом может далеко выходить за допустимые пределы. Эти случаи с учетом реальных значений токов КЗ и характеристик аппаратов защиты рассматриваются в настоящем разделе.

Значения кратностей токов КЗ в сетях до 1 кВ в большинстве случаев лежат в пределах 50. Время отключения при срабатывании отсечки автоматических выключателей не превышает 0,04 с. Для предохранителей время отключения при кратности ТКЗ, равной 40, указано в табл. 2.

Результаты расчета температуры жилы в конце КЗ даны для этих условий в табл. 11. Ломаной линией в таблице обозначена граница между положительными и отрицательными результатами.

Расчеты сделаны для кабелей с алюминиевыми жилами и поливинилхлоридной изоляцией. Для кабелей с медными жилами и кабелей с полиэтиленовой изоляцией расчеты не выполнялись, так как из табл. 3 – 10 видно, что результаты расчетов для меди и алюминия, полиэтилена и поливинилхлорида не имеют существенных различий.

Таблица 11. Температура алюминиевой жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при больших кратностях тока

S, мм^2	$I_у$, А	t, с	Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ					Вид защиты
			20	40	60	80	100	
2,5	20	0,04	84	140	233	364	532	Автомати-ческие выключа-тели
4	31,5	0,04	83	137	228	354	517	
6	40	0,04	78	117	182	278	389	
10	50	0,04	72	94	131	182	247	
16	63	0,04	70	83	106	137	178	
25	80	0,04	68	77	92	113	140	
35	100	0,04	67	75	86	103	125	
50	125	0,04	67	72	81	94	111	
70	160	0,04	67	71	79	89	103	
95	200	0,04	66	70	77	86	97	
120	200	0,04	66	68	72	78	85	
150	250	0,04	66	68	72	78	85	
185	320	0,04	66	68	73	79	87	
2,5	20	0,10	–	252	–	–	–	Предохра-нители
4	31,5	0,01	–	83	–	–	–	
6	40	0,20	–	324	–	–	–	
10	50	0,01	–	72	–	–	–	
16	63	0,20	–	155	–	–	–	
25	80	0,07	–	86	–	–	–	
35	100	0,07	–	82	–	–	–	
50	125	0,016	–	68	–	–	–	

Продолжение табл. 11

S, мм^2	$I_у$, А	t, с	Температура жилы $\theta_{кон}$, °С, при кратности ТКЗ					Вид защиты
			20	40	60	80	100	
70	160	0,016	–	67	–	–	–	Предохра-
95	200	0,016	–	67	–	–	–	нители
120	200	0,016	–	66	–	–	–	
150	250	0,016	–	66	–	–	–	
185	315	0,012	–	66	–	–	–	

Примечание. Расчет по формуле (9) для КЗ с нагретого состояния.

Селективные автоматические выключатели устанавливаются на верхних ступенях схемы электроснабжения и имеют при срабатывании отсечки выдержки времени 0,1; 0,2 и 0,3 с. Это выключатели на большие токи и защищают кабели крупных сечений.

Результаты расчета для линий на 400, 500 и 800 А, выполненных соответственно кабелями 2(3х120), 3(3х95) и 3(3х185), приводятся в табл. 12.

Таблица 12. Температура алюминиевой жилы кабеля с поливинилхлоридной изоляцией в конце КЗ при больших кратностях тока и срабатывании отсечки селективных выключателей

S, мм^2	$I_{доп}$, А	$I_у$, А	t, с	Температура жилы $\theta_{кон}$, ^{o}С, при кратности ТКЗ		
				20	40	60
2х120	400	400	0,1	67	73	83
			0,2	69	81	101
			0,3	71	89	120
3х95	510	500	0,1	67	74	85
			0,2	69	83	105
			0,3	72	92	126
3х185	810	800	0,1	67	71	79
			0,2	68	77	92
			0,3	70	83	106

Примечание. Расчет по формуле (9) для КЗ с нагретого состояния.

7. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВРЕМЯ-ТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДНИКОВ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА

Выведем из формулы (9) зависимость времени отключения от кратности тока КЗ, при которой температура проводника в конце КЗ будет равна максимальному допустимому значению (но не будет превышать его). Эту зависимость условно можно назвать предельной время-токовой характеристикой проводника. Если характеристика аппарата защиты совпадает с предельной время-токовой характеристикой проводника или обеспечивает меньшее время отключения при тех же значениях тока КЗ, проводник надежно защищается от недопустимого перегрева.

Согласно ПУЭ температура проводников с поливинилхлоридной и резиновой изоляцией не должна превышать при КЗ $150^{\circ}C$. Таким образом, в формуле (9) конечная температура жилы должна быть равна $150^{\circ}C$.

Ток уставки защиты примем равным длительно допустимому току проводника. Тогда из формулы (9) следует:

$$150 = 65 + 0{,}01824(I_{доп}/S)^2K^2t,$$

откуда искомая зависимость может быть выражена формулой

$$t = \frac{150 - 65}{0{,}01824(I_{доп}/S)^2K^2} = \frac{4660}{(I_{доп}/S)^2K^2}. \qquad (22)$$

Результаты расчетов по формуле (22) для кабелей с алюминиевыми жилами при их нагрузке перед КЗ длительно допустимым током ($\theta_{нач} = 65^{\circ}C$) приводятся в табл. 13.

Таблица 13. Предельные время-токовые характеристики кабелей с алюминиевыми жилами и поливинилхлоридной изоляцией при адиабатическом процессе нагрева

S, мм^2	$I_{доп}$, А	Допустимое время отключения t, с, при кратности ТКЗ к $I_{доп}$							
		3	4	5	6	8	10	15	50
2,5	19	9	5	3,2	2,2	1,3	0,8	0,36	0,03
4	27	11	6,4	4,1	2,8	1,6	1,0	0,45	0,04
6	32	18	10	6,5	4,5	2,5	1,6	0,72	0,06
10	42	29	16	10,5	7,3	4,1	2,6	1,1	0,1
16	60	36	20	13	9,2	5,1	3,3	1,4	0,13
25	75	57	32	20	14	8,1	5,1	2,3	0,2
35	90	78	44	28	19	11	7,0	3,1	0,28
50	110	107	60	38	26	15	9,6	4,3	0,38
70	140	129	72	46	32	18	11	5,1	0,46
95	170	161	90	58	40	22	14	6,4	0,58
120	200	186	104	67	46	26	16	7,4	0,67
150	235	211	118	76	52	29	18	8,4	0,75
185	270	243	136	87	60	34	21	9,7	0,87

Примечание. Расчет по формуле (22) для КЗ с нагретого состояния.

Сравнивать время-токовые характеристики аппаратов защиты с данными табл. 13 можно только тогда, когда ток уставки защиты равен длительно допустимому току проводника. В этом случае одинаковым кратностям соответствуют одинаковые значения тока КЗ.

Но уставки защиты, как правило, превышают длительно допустимые токи проводников, и для сравнения характеристик нужно привести кратности ТКЗ к одному и тому же значению тока. Например, в табл. 13 для кабелей сечением 10 мм^2 кратности 10 соответствует ток, равный $I_{доп}К = 42 \cdot 10 = 420$ А. Ток уставки аппарата защиты равен 50 А. Току короткого замыкания 420 А на время-токовой характеристике аппарата защиты соответствует кратность 420/50 = 8,4. Таким образом, в данном случае нужно сравнивать время отключения по табл. 13 для кратности 10 с временем отключения по характеристике аппарата защиты для кратности 8,4.

Такая проверка не очень удобна. Но для приблизительной оценки требуемого быстродействия защиты предельные время-токовые характеристики кабелей (табл. 13) можно использовать и без пересчета.

Надо, однако, иметь в виду, что время-токовые характеристики кабелей в табл. 13 справедливы для адиабатического процесса нагрева и позволяют при сравнении их с характеристиками аппаратов защиты выявить зоны гарантированной защиты проводников. На самом же деле, в зоне малых кратностей при относительно большом времени отключения процесс нагрева уже трудно считать адиабатическим, и действительное допустимое время отключения больше указанного в таблице.

Более точная оценка надежности защиты была бы возможна при наличии время-токовых характеристик проводников, найденных экспериментально. Но таких характеристик нет.

Характеристики в табл. 13 относятся к крайнему случаю, когда перед коротким замыканием проводник был нагружен длительно допустимым током и температура его жил равнялась 65°С. Если проводник загружен на 70%, то температура его жил равна 45°С. Результаты расчета для этих условий даны в табл. 14.

Таблица 14

S, мм^2	$I_{доп}$, А	Допустимое время отключения t, с, при кратности ТКЗ к $I_{доп}$							
		3	4	5	6	8	10	15	50
2,5	19	11	6,4	4,1	2,8	1,6	1,0	0,45	0,04
4	27	14	8,1	5,2	3,6	2,0	1,3	0,58	0,05
6	32	23	13	8,3	5,8	3,2	2,1	0,92	0,08
10	42	37	21	13	9,3	5,2	3,3	1,5	0,13
16	60	47	26	17	11	6,6	4,2	1,8	0,17
25	75	73	41	26	18	10	6,6	2,9	0,26
35	90	100	56	36	25	14	9	4	0,36
50	110	136	76	49	34	19	12	5,4	0,49
70	140	165	93	59	41	23	14	6,6	0,59
95	170	206	116	74	51	29	18	8,2	0,74
120	200	238	134	85	59	33	21	9,5	0,85
150	235	269	151	97	67	38	24	10,7	0,97
185	270	310	174	111	77	43	28	12	1,1

П р и м е ч а н и е. Табл. 14 – аналог табл. 13, но для начальной температуры жилы 45°С, соответствующей загрузке проводника на 70%.

8. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

В основу всех расчетов, выполненных в настоящей работе, положен адиабатический процесс нагрева проводников, который заведомо дает самые неблагоприятные результаты. Назовем такой подход первым методом расчета и сравним его с некоторыми другими методами из документов нормативного характера.

8.1. Первый метод.

Для удобства сравнения выведем формулу наименьшего допустимого по условиям термической стойкости сечения жилы для алюминиевых проводников.

Из формулы (4) следует:

$$S^2 = \frac{I_{кз}^2 t\,[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]}{\Delta\theta},$$

или

$$S = \sqrt{\frac{I_{кз}^2 t}{\Delta\theta/[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]}} =$$

$$= \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{\sqrt{\Delta\theta/[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]}} = \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{K_1}, \qquad (23)$$

где $$K_1 = \sqrt{\Delta\theta/[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{нач} + \theta_{доп})]}. \qquad (24)$$

По формуле (23) можно определить наименьшее допустимое сечение проводника с алюминиевой жилой, если подставить в нее допустимое значение $\Delta\theta$, которое определяется как разность допустимой температуры проводника в конце КЗ ($\theta_{доп}$) и его начальной температуры ($\theta_{нач}$). То есть, при определении наименьшего допустимого сечения проводника формула (24) принимает вид:

$$K_1 = \sqrt{(\theta_{доп} - \theta_{нач})/[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{доп} + \theta_{нач})]}. \qquad (25)$$

С учетом формулы (25) формулу (23) для определения наименьшего допустимого по условиям термической стойкости сечения алюминиевых проводников можно представить в виде:

$$S_{доп} = \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{K_1} =$$

$$= \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{\sqrt{(\theta_{доп} - \theta_{нач})/[0{,}012 + 0{,}000029(\theta_{доп} + \theta_{нач})]}} . \qquad (26)$$

8.2 Второй метод.

В "Инструктивных указаниях по проектированию электротехнических промышленных установок" ВНИПИ Тяжпромэлектропроект (N 10 за 1977 г.) опубликовано решение Главного технического управления по эксплуатации энергосистем Министерства энергетики и электрификации СССР N Э-1/77 от 10 марта 1977 г.В этом решении кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ предлагается проверять на термическую стойкость по формуле, рекомендованной ВНИИ кабельной промышленности,:

$$S_{доп} = \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{K_2} , \qquad (27)$$

где K_2 - коэффициент, значения которого для различных начальных условий в указанном выше решении заданы и приводятся здесь в табл. 15. Допустимая температура жил в конце КЗ принята в решении ГТУ Минэнерго СССР по ПУЭ: 150°С - для поливинилхлорида, 120°С - для полиэтилена.

Таблица 15

Температура жилы до КЗ ($\theta_{нач}$), °С	Значения коэффициентов K_2 и K_3 для кабелей				Обозначение коэффициента
	с алюминиевой жилой		с медной жилой		
	Изоляция из		Изоляция из		
	полиэтилена	поливинилхлорида	полиэтилена	поливинилхлорида	
15	85,9	95,1	128	142	K_2
25	81	90,6	124	138	
50	68	79,6	104	121	
70	56,7	70,1	86,2	106	
80	51	65	76	98	
90	46	51	56	59	
60	65	75	103	120	K_3

8.3. Третий метод.

В проекте государственного стандарта "Короткие замыкания в электроустановках. Электродинамическое и термическое действие тока короткого замыкания", который рассматривался в Тяжпромэлектропроекте по просьбе Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики ВНИИЭ, минимальное сечение проводника, отвечающее требованию термической стойкости при коротком замыкании, определяется по аналогичной формуле

$$S_{доп} = \frac{I_{кз}\sqrt{t}}{K_3} . \qquad (28)$$

Значения коэффициента K_3 даны в проекте стандарта только для начальной температуры жилы 60°С и допустимой температуры в конце КЗ 160 и 130°С для поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляции соответственно. Здесь значения коэффициента K_3 приводятся в последней строке табл. 15.

8.4. Сравнение значений коэффициентов в формулах трех методов расчета.

Формулы первого (26), второго (27) и третьего (28) методов отличаются только коэффициентами в знаменателе. Чем ближе значения этих коэффициентов, тем меньше разница в результатах расчетов. Сравним эти коэффициенты, определив их значения для первого метода по формуле (25), а для второго и третьего - использовав заданные значения из табл.15.

Результаты сравнения приводятся в табл. 16.

Допустимая температура жилы в конце КЗ при определении значения K_1 принята по ПУЭ: 150°С - для поливинилхлорида, 120°С - для полиэтилена.

Таблица 16. Сравнение значений коэффициентов K_1, K_2, K_3 в различных методах расчета

$\theta_{нач}$, °С	Алюминиевая жила						Медная жила					
	Изоляция из						Изоляция из					
	поливинилхлорида			полиэтилена			поливинилхлорида			полиэтилена		
	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3	K_1	K_2	K_3
15	90	95	-	81	86	-	146	142	-	132	128	-
25	86	91	-	77	81	-	139	138	-	124	124	-
50	75	80	-	64	68	-	122	121	-	105	104	-
60	71	75	75	59	62	65	115	114	120	96	95	103
70	66	70	-	53	57	-	108	106	-	87	86	-
80	61	65	-	47	51	-	100	98	-	77	76	-
90	56	51	-	41	46	-	92	59	-	66	56	

Примечания: 1. Значения коэффициента K_1 для медной жилы определялись по формуле, аналогичной формуле (25). В настоящей работе эта формула не приводится.

2. Для коэффициента K_2 при начальной температуре 60°С принято его среднее арифметическое значение между температурами 50 и 70°С из табл. 15.

В табл. 17 приводятся результаты определения допустимого сечения проводников тремя метдами с использованием коэффициентов из табл. 16 для начальной температуры жилы 60°С. Значения произведения $I_{кз}\sqrt{t}$ в формулах (26), (27), (28) при определении допустимого сечениия были приняты произвольно, но одинаковыми для всех методов.

Таблица 17. Результаты сравнительного расчета допустимого сечения кабелей с поливинилхлоридной изоляцией $S_{доп}$, мм^2

$I_{кз}\sqrt{t}$, $\frac{1}{А\cdot с^2}$	Расчетное сечение алюминиевой жилы по методу			$I_{кз}\sqrt{t}$, $\frac{1}{А\cdot с^2}$	Расчетное сечение медной жилы по методу			Стандартное сечение
	1	2	3		1	2	3	
	–	–	–	160	1,4	1,4	1,3	1,5
160	2,3	2,1	2,1	250	2,2	2,2	2,1	2,5
250	3,5	3,3	3,3	400	3,5	3,5	3,3	4
370	5,2	4,9	4,9	630	5,5	5,5	5,3	6
630	8,9	8,4	8,4	1000	8,7	8,8	8,3	10
1000	14	13	13	1600	14	14	13	16
1600	23	21	21	2500	22	22	21	25
2200	31	29	29	3600	31	32	30	35
3200	45	43	43	5000	43	44	42	50
4500	63	60	60	7200	63	63	60	70
6000	85	80	80	9600	83	84	80	95
7500	106	100	100	12000	104	105	100	120
9800	138	131	131	15600	139	137	130	150
12000	169	160	160	20000	174	175	167	185
15000	211	200	200	24000	209	211	200	240

Как видно из табл. 17, с учетом ступеней стандартной шкалы сечений все три метода дали один и тот же результат.

9. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

9.1. В настоящее время нет нормативных методик расчета, учитывающих реальные тепловые процессы в кабелях при коротких замыканиях.

9.2. Время-токовые характеристики автоматических выключателей и предохранителей (табл. 1, 2) имеют большой разброс по времени срабатывания. Такой разброс при любом методе расчета не позволяет получить результат высокой точности.

9.3. Рассмотрение процесса нагрева проводника как адиабатического позволяет вывести формулы, которые дают предельные значения конечной температуры жилы кабеля. Температура жилы в реальных условиях не может превышать значений, полученных расчетом для адиабатического процесса.

9.4. Из табл. 3 - 6 (защита автоматическими выключателями) видно, что проводники мелких сечений при КЗ перегреваются значительно сильнее, чем проводники крупных сечений. Об'ясняется это тем, что плотность длительно допустимого тока для мелких сечений в несколько раз превышает плотность длительно допустимого тока для крупных сечений. Отношение этой плотности для кабелей сечением 2,5 и 185 мм^2 из табл. 3 равно 5. За счет большей относительной поверхности охлаждения у тонкого проводника его температура в стационарном режиме даже при большой плотности тока не превышает длительно допустимого значения, одинакового для всех сечений (65°С). Но при адиабатическом процессе, когда теплоотдача из рассмотрения исключается , температура проводников мелких сечений при одинаковой кратности ТКЗ растет значительно быстрее, чем у проводников крупных сечений.

Из табл. 3 - 6 видно также, что по мере увеличения сечения кабелей температура их жил в конце КЗ уменьшается и, начиная с некоторого сечения, уже не выходит за допустимые пределы. Так как все расчеты сделаны для адиабатического процесса нагрева, термическая стойкость таких кабелей может быть гарантирована.

Границу между кабелями с гарантированной термической стойкостью и кабелями, для которых такой гарантии дать нельзя, можно провести для кабелей с алюминиевыми жилами по сечениям 16 и 25, а для кабелей с медными жилами по сечениям 10 и 16 мм^2.

Надо также учесть, что самые неблагоприятные и определяющие указанную выше границу результаты получены в табл. 3 – 6 для малых кратностей ТКЗ с большим временем срабатывания защиты, когда процесс нагрева трудно считать адиабатическим и когда реальная температура проводников в конце КЗ заметно ниже расчетной. Поэтому отмеченная выше граница имеет определенный запас надежности.

9.5. Анализ табл. 7 – 10 (защита предохранителями) позволяет сделать те же выводы, что и в предыдущем пункте. Но следует отметить, что зона гарантированной защиты каблей в табл. 7 – 10 несколько расширяется: за счет меньшего (по сравнению с автоматическими выключателями) времени отключения при шести- и десятикратном токе КЗ кабели всех сечений при этих кратностях оказываются термически стойкими.

9.6. Расчеты для случаев работы защиты с независимой от тока выдержкой времени при больших кратностях ТКЗ (табл. 11, 12) показывают, что граница зоны с гарантированной термической стойкостью кабелей проходит по тем же сечениям, что и в табл. 3 – 10.

9.7. Для однозначного решения вопросов, связанных с термической стойкостью, необходимы предельные время-токовые характеристики проводников, снятые экспериментально. Особенно это касается зон с небольшими (до шести) кратностями тока КЗ. С такими характеристиками можно было бы сравнивать характеристики аппаратов защиты.

Для приблизительной оценки необходимого быстродействия защиты можно использовать результаты расчетов, приведенные в табл. 13, 14.

9.8. Сравнение принятого в настоящей работе метода расчета термической стойкости проводников (по адиабатическому процессу) с двумя другими методами из документов нормативного характера показало, что результаты расчетов по трем методам практически совпадают (см. табл. 16, 17). Это позволяет сделать вывод, что в

основе всех рассмотренных здесь методов лежит адиабатический процесс нагрева проводников.

В главе 43 "Защита от сверхтока" публикации МЭК 364-4-43 (издание первое, 1977) приведена зависимость допустимого времени отключения КЗ от сечения кабеля и тока КЗ (п. 434.3.2). Эта зависимость полностью совпадает с формулами, рассмотренными в разделе 8 настоящей работы. Причем значения ккоэффициентов для алюминиевых (К = 74) и медных (К = 115) проводников с поливинилхлоридной изоляцией практически совпадают со значениями этих коэффициентов в табл. 16.

9.9. Обобщая результаты всех расчетов в работе, следует сказать, что кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ при заданных в настоящее время предельных значениях температуры (150°С - для поливинилхлорида и 120°С - для полиэтилена) можно не проверять на термическую стойкость при КЗ, если алюминиевые жилы имеют сечение 25 мм^2 и более, а медные - 16 мм^2 и более.

При этом время-токовые характеристики аппаратов защиты должны быть близкими к приведенным в табл. 1 и 2 или иметь меньшее время отключения.

9.10. В работе сделан подробный вывод всех формул для определения температуры жилы в конце КЗ и оговорены все начальные условия, влияющие на конечный результат и использованные при выводе формул. Поэтому, если для конкретного случая начальные условия существенно отличаются от принятых здесь, пользователь может учесть их самостоятельно, проследив последовательно вывод нужной формулы.

gost.e-ecolog.ru