

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

д. с. лившиц

**НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ
И ЗАЩИТА
ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ
В ЭЛЕКТРОСЕТИХ
до 1000 в**



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 219

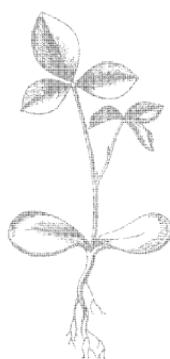
Д. С. ЛИВШИЦ

НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ И ЗАЩИТА ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ В ЭЛЕКТРОСЕТЕЯХ ДО 1000 в

Издание второе, переработанное и дополненное



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1967



Scan AAW

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Лившиц Д. С.

Л 55 Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1 000 в. Изд. 2-е, переработ. и доп., М., «Энергия», 1967.

74 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 219). 20 000 экз. 15 к.

В доступной форме рассказывается, каким образом на основании известных величин и характера изменения ожидаемой нагрузки можно легко подсчитать ожидаемый нагрев проводника; какие требования предъявляют Правила устройства электроустановок (ПУЭ) к защите проводников, как правильно выбрать номинальный ток плавкой вставки и сечение проводников и какие защитные функции может выполнять плавкий предохранитель. Рассчитана на широкий круг электромонтеров, занятых эксплуатацией электроустановок.

3-3-9
128-66

Лившиц Давид Соломонович

Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1 000 в

Редактор Г. Г. Родин

Технический редактор В. В. Зеркаленкова

Художественный редактор В. И. Карпов

Корректор И. А. Володяева

Сдано в набор 29/X 1966 г.

Подписано к печати 4/I 1967 г.

Т-01703

Формат 84×108^{1/32} Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 3,78

Уч.-изд. л. 4,27

Тираж 20 000 экз

Цена 15 коп.

Зак. 2687

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

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Очень широкий круг лиц — от опытного инженера до начинающего электромонтера включительно — сталкивается на практике с вопросами выбора сечения проводников электрических сетей до 1 000 A и номинальных токов плавких вставок предохранителей для их защиты. Нередко эти вопросы решаются неправильно: сечение проводов и плавкие вставки предохранителей выбираются с чрезмерными запасами «на всякий случай» из боязни возможных опасных последствий перегрузок (воспламенения изоляции, пожара). При этом не только производятся излишние, необоснованные затраты, но и часто ухудшаются условия безопасности для людей, так как большие плавкие вставки медленнее отключают токи замыкания на землю в сетях с заземленной нейтралью и, следовательно, медленнее снимают опасные потенциалы с заземленных частей оборудования.

Не только трудности предварительного расчета нагрузки и ее пиков являются причинами таких неправильных решений. Даже когда величина и характер изменений нагрузки известны, правильный выбор сечений проводников и плавких вставок для их защиты возможен только при знакомстве с законами нагревания проводников электрическим током с законами старения изоляции и с физическими свойствами и защитными характеристиками предохранителей. Изучение этих вопросов поможет также понять и сознательно выполнять требования действующих Правил устройства электроустановок.

Второе издание дополнено указаниями и примерами, расширяющими представление о способах учета относительного старения изоляции при выборе проводников для установок с переменным графиком нагрузки и при определении наблюдаемых в действующих установках

значений коэффициентов спроса. Введены указания о предельно допустимых нагревах при перегрузках и при коротких замыканиях. Выделены в отдельную главу и соответственно расширены указания по выбору предохранителей; пояснены и иллюстрированы примерами требования действующих Правил устройства электроустановок. В необходимых случаях имевшиеся в первом издании примеры пересчитаны применительно к изменившимся в ПУЭ данным о длительно допустимых нагревах и нагрузках проводников с теплостойкой резиновой и с полихлорвиниловой изоляцией.

Автор выражает благодарность всем товарищам, сообщившим свои ценные замечания и пожелания для учета при подготовке второго издания, и будет глубоко признателен тем читателям, которые помогут ему улучшить эту работу, сообщив свои критические замечания и пожелания по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия», Библиотека электромонтера.

Автор

НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ

1. Основные определения

Проводником называется любое тело, по которому передается электрический ток. Обычно в качестве проводников применяются алюминиевые или медные шины, провода, кабели. Иногда, особенно в сетях постоянного тока, в качестве проводников используются стальные, более или менее массивные брусья, шины, швеллеры, рельсы, уголки, трубы. В аварийных режимах, например при случайных замыканиях или при пробое изоляции, проводниками могут оказаться металлические корпусы машин, аппаратов и приборов, оболочки проводов и кабелей и разные конструкции.

Под словами **нагрев (температура) проводника** обычно подразумевается нагрев (температура) токоведущих жил. Когда имеется в виду нагрев (температура) изоляции или оболочек проводников, то это оговаривается особо.

Превышением нагрева (температуры) проводников называется разность между температурой их жил и температурой среды (воздуха, земли, воды), в которой расположены проводники вместе с их изолирующими и защитными оболочками или трубами.

Установившимся нагревом или установившимся превышением нагрева называется такой нагрев или превышение нагрева, величина которого практически вовсе не изменяется или изменяется очень медленно и притом в очень малых пределах.

Пример 1. В помещении с температурой воздуха 25°C проложены проводники. Так как они долго не были нагружены током, то, естественно, их температура тоже равна 25°C . Когда проводники нагрузили током, их нагрев стал повышаться и в конце концов, после длительной нагрузки, достиг 65°C . Дальнейшее повышение нагрева практически не замечалось.

В этом случае можно написать:
температура среды $\vartheta_{ср}=25^{\circ}\text{C}$;
установившийся нагрев проводников (жил) $\vartheta_{y.yk}=65^{\circ}\text{C}$;
установившееся превышение нагрева проводников

$$\tau_y = \vartheta_{y.yk} - \vartheta_{ср}; \quad (1)$$

$$\tau_y = 65 - 25 = 40^{\circ}\text{C}.$$

2. Установившееся превышение нагрева проводника при длительной нагрузке

Часть электрической энергии, передаваемой по проводникам, переходит в тепловую. Тепловая энергия расходуется в начале на постепенное увеличение превышения нагрева проводника, а затем — на поддержание установившегося превышения во время работы, т. е. на компенсацию потерь тепла, рассеиваемого поверхностью проводника в окружающую среду.

Величина установившегося превышения нагрева зависит от количества тепла, выделяемого в проводнике в единицу времени, и от того количества тепла, которое в единицу времени рассеивается через наружную поверхность проводника или его оболочки в окружающую среду.

Количество выделяемого тепла прямо пропорционально квадрату тока и электрическому сопротивлению проводника (I^2r), а количество рассеиваемого тепла зависит от теплового сопротивления пути передачи тепла от проводника к наружной (рассеивающей) поверхности, от размеров этой поверхности и от коэффициентов теплоотдачи, учитывающих ее способность рассеивать тепло. По мере увеличения температуры проводника обычно увеличивается и его сопротивление, следовательно, увеличивается и количество выделяющегося в нем тепла, хотя величина тока и остается неизменной. Однако при увеличении температуры проводника увеличивается перепад (разность) между этой температурой и температурой среды, а это улучшает способность поверхности проводника рассеивать тепло (повышает коэффициент теплоотдачи). В итоге увеличение количества выделяющегося тепла в определенной мере компенсируется увеличением теплоотдачи. Поэтому для условий длительного режима работы, при котором допускаемые нагревы проводников обычно невелики, можно без заметной погрешности считать, что сопротивление про-

водника и коэффициент теплоотдачи — величины постоянные.

При этих условиях величина установившегося превышения нагрева зависит только от величины тока; она изменяется прямо пропорционально квадрату тока. Следовательно, зная, чему равно установившееся превышение нагрева τ_{y1} , соответствующее одной какой-либо величине длительной нагрузки I_1 , можно подсчитать, чему будет равно установившееся превышение нагрева τ_{y2} , соответствующее любой другой величине длительной нагрузки I_2 :

$$\tau_{y2} = \tau_{y1} \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2. \quad (2)$$

В гл. I-3 ПУЭ [Л. 1] для разных проводников в разных условиях прокладки указано длительно допустимый по нормам ток I_n и соответствующие ему установившаяся температура жилы $\vartheta_{ж.н}$ и температура среды $\vartheta_{ср.н}$.

На основе этих данных можно определить величину установившегося превышения нагрева, принятую в нормах при исчислении I_n ;

$$\tau_{y,n} = \vartheta_{ж.н} - \vartheta_{ср.н}. \quad (3)$$

Следовательно, располагая данными гл. I-3 ПУЭ, можно всегда подсчитать, чему будет равно установившееся превышение нагрева τ_y проводника при длительной нагрузке его током I , отличным от I_n :

$$\tau_y = \tau_{y,n} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2. \quad (4)$$

Пример 2. По данным § I-3-8 ПУЭ известно, что три одножильных провода с алюминиевыми жилами 6 $мм^2$, с резиновой изоляцией при прокладке в одной трубе допускают длительную нагрузку $I_n=32$ а и известно, что при этой нагрузке и при температуре среды (воздуха) $\vartheta_{ср.н}=25^\circ\text{C}$ конечный нагрев жил будет достигать $\vartheta_{ж.н}=65^\circ\text{C}$. Требуется узнать, до какой температуры нагреваются провода, если в аварийном режиме установится длительная нагрузка 46 а.

Решение. Допускаемое нормами установившееся превышение нагрева по (3) равно $\tau_{y,n}=65-25=40^\circ\text{C}$. Такое превышение нагрева имеют жилы при длительной нагрузке их током 32 а. Если же проводники вместо 32 а нагрузить длительно током 46 а, то установившееся превышение нагрева по (4) достигнет $\tau_y=40\left(\frac{46}{32}\right)^2=83^\circ\text{C}$, а установившийся нагрев $\vartheta_{ж}=83+25=108^\circ\text{C}$.

3. Изменение превышения нагрева проводника от нуля до установившейся величины при неизменной нагрузке

Температура проводника, длительно не нагружавшегося током, равна температуре среды. Установившееся превышение нагрева в этом случае $\tau=0$. Если такой проводник нагрузить током I , то превышение нагрева начнет увеличиваться от нуля и постепенно достигнет уста-

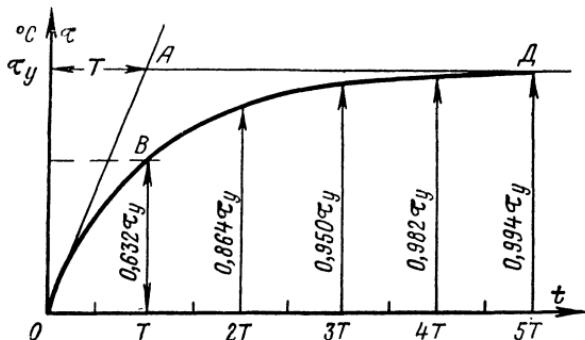


Рис. 1. Изменение превышения нагрева проводника от нуля до установившейся величины при неизменной нагрузке.

новившейся величины, соответствующей току I . Этот процесс роста превышения нагрева при неизменной нагрузке может быть представлен так называемой экспоненциальной кривой $OB\Delta$ (рис. 1). Вначале, когда превышение нагрева проводника мало, каждая единица его поверхности в единицу времени отдает в окружающую среду очень мало тепла и почти все тепло, выделяемое в проводнике, расходуется на повышение его температуры; поэтому вначале превышение нагрева возрастает быстро, почти по прямой линии (почти прямо пропорционально времени); затем по мере роста превышения нагрева отдача тепла в окружающую среду повышается и поэтому процесс повышения нагрева все больше и больше замедляется; наконец, наступает момент, когда разница между количеством тепла, отдаваемым поверхностью проводника в окружающую среду, и количеством, выделяемым в проводнике, становится незаметной. Поэтому становится незаметным и дальнейший рост превышения нагрева; оно достигло установившейся величины τ_y .

Уравнение кривой *ОВД* (рис. 1) имеет вид:

$$\tau_t = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (5)$$

где τ_t — величина превышения нагрева проводника в конце любого отрезка времени t , считая от момента, когда это превышение нагрева было равно нулю и появилась рассматриваемая нагрузка;

τ_y — установившееся превышение нагрева, может быть определено по (4), как указано в примере 2;

e — основание натуральных логарифмов, $e=2,718$;

t — отрезок времени, исчисляемый обычно в минутах или секундах, от момента появления нагрузки до момента, для которого подсчитывают величину превышения нагрева;

T — постоянная времени нагревания проводника, она измеряется в тех же единицах, что и t .

Постоянная времени T численно равна отношению теплоемкости проводника к его теплоотдаче. Физический смысл этой величины может быть определен как время, в течение которого превышение нагрева проводника повысилось бы от нуля до значения τ_y , если бы не было отдачи тепла от проводника в окружающую среду, т. е. если бы повышение нагрева шло не по кривой *ОВД* (рис. 1), а по прямой *OA*, касательной к *ОВД* в точке *O*. Значения T для некоторых типов проводников и условий прокладки приведены в приложении 1.

Вычисленные значения $\left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ для разных значений t/T приведены в приложении 2. Подставляя эти вычисленные значения в уравнение (5), нетрудно видеть, что при t/T , равном 1, 2, 3, 4, 5, т. е. через отрезки времени t , равные $1T$; $2T$; $3T$; $4T$; $5T$, превышение нагрева достигает соответственно 0,632; 0,864; 0,950; 0,982 и 0,994 от установившейся величины τ_y (рис. 1). Поэтому обычно ограничиваются вычислением превышений нагревов по уравнению (5) для значений $t \leq (3 \div 4)T$, а для $t \geq (3 \div 4)T$ принимают превышение нагрева равным установленному по уравнению (4), так как это упрощает расчет, а ошибка, как это видно из вышеизложенного, не превысит $(5 \div 2)\%$.

Для определения постоянной времени нагревания можно нагрузить током проводник и, измеряя через определенные промежутки времени его температуру и температуру среды, построить в произвольном масштабе кривую изменения превышения нагрева подобно кривой *OBД* (рис. 1). Если затем на оси ординат отметить точку, соответствующую величине $0,632 \tau_y$, из этой точки провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой, из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс, то таким образом будет найдена величина $t = T$ (рис. 1).

Пример 3. Имеется трехфазная линия из трех одножильных медных проводов сечением 150 mm^2 каждый, с резиновой изоляцией, проложенных в одной трубе. Нормально эта линия не несет нагрузки и температура проводов равна температуре среды. В аварийном режиме к этой линии вначале (до принятия мер персоналом) присоединяется нагрузка, превышающая в 2,6 раза нагрузку, допускаемую по нормам ($I : I_n = 2,6$). Надо для ориентации персонала подсчитать, как скоро и до какой величины возрастет превышение нагрева проводов.

Решение. Данные для расчета, как и сам расчет, сводим в табл. 1.

Таблица 1

$\tau_{y,n}$	40°				Определяется по уравнению (3)
$I : I_n$	2,6				Задано или выявляется по данным установки и по [Л. 1]
τ_y	$40 \cdot 2,6^2 = 270^\circ$				По уравнению (4)
$T, \text{ мин}$	41				Определяется по приложению 1
$t, \text{ мин}$	4	8	12	16	Выбирается произвольно так, чтобы получить круглые значения $t : T$
$t : T$	0,1	0,2	0,3	0,4	Подсчитывается
$1 - e^{-\frac{t}{T}}$	0,095	0,18	0,26	0,33	Выписывается из приложения 2, по данным $t : T$
τ_t	$0,095 \cdot 270 = 25,5^\circ$	$0,18 \cdot 270 = 48,5^\circ$	$0,26 \cdot 270 = 70^\circ$	$0,33 \cdot 270 = 90^\circ$	По уравнению (5)

Полный нагрев (температура) провода находится путем добавления температуры среды к подсчитанным значениям превышения нагрева. Продолжая таким же образом расчет для больших значений t , нетрудно выявить всю картину повышения нагрева: превышение нагрева до 100° может быть достигнуто примерно через 19 мин, а 200° — через 55 мин.

В некоторых случаях возникает необходимость подсчитать величину превышения нагрева за очень короткие отрезки времени, например за время действия защиты при коротких замыканиях. В этих случаях отношение $t:T$ обычно очень мало.

По данным приложения 2 и непосредственным расчетам нетрудно убедиться, что чем меньше значение $t:T$, тем меньшая ошибка будет допущена, если в уравнение (5) вместо $\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$ подставить величину $t:T$.

Так, например, из приложения 2 видно, что при $t:T=0,3$ $\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)=0,258$ и подстановка в уравнение (5) величины $t:T$ вместо величины $\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$ привела бы к ошибке в сторону преувеличения превышения нагрева (в сторону запаса) на 16%; при $t:T=0,2$ ошибка не превышает 5%. Это соответствует отмеченному ранее факту, что в начальный период нагрев проводника повышается почти прямо пропорционально времени (по прямой OA , рис. 1). Поэтому для всех случаев, когда $t:T$ равно или меньше 0,1, можно расчет вести не по уравнению (5), а по более простому уравнению

$$\tau_t = \frac{t}{T} \tau_y. \quad (6)$$

Пример 4. Для линии, указанной в примере 3, расчет по (6) для случая $t=4$ мин ($t:T \approx 0,1$) дает $\tau_t=0,1 \cdot 270=27^\circ$, что составляет около 106% от $25,5^\circ$, полученных в табл. 1 из расчета по (5). Для $t < 4$ мин ошибка будет еще меньше.

4. Изменение превышения нагрева проводника после отключения нагрузки

Превышение нагрева проводника, длительно находящегося под нагрузкой током неизменной величины, достигает установившегося значения. Если с такого проводника нагрузку снять, то превышение нагрева начнет понижаться от установившегося значения и постепенно достигнет нуля. Этот процесс снижения может быть представлен экспоненциальной кривой, изображенной на рис. 2. Она представляет собой зеркальное изображение кривой ОВД (рис. 1), и к ней относится все сказанное

о последней: пока превышение нагрева велико, остывание идет интенсивно (почти прямо пропорционально времени); по мере снижения температуры отдача тепла в окружающую среду уменьшается и процесс охлажде-

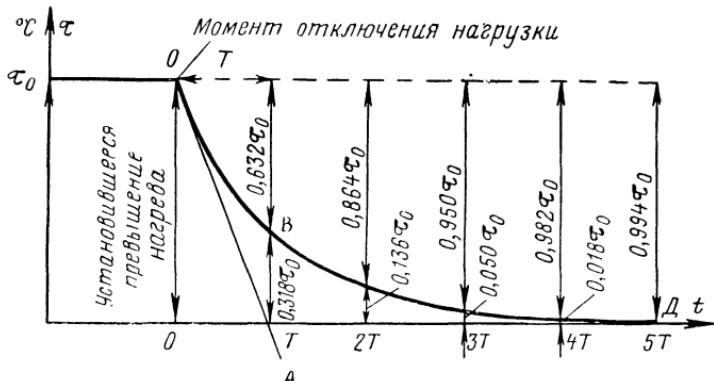


Рис. 2. Изменение превышения нагрева проводника после отключения нагрузки.

ния все больше и больше замедляется. Уравнение кривой охлаждения (рис. 2) имеет вид:

$$\tau_t = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (7)$$

где τ_t — величина превышения нагрева проводника в конце любого отрезка времени t , считая от момента отключения нагрузки;

τ_0 — превышение нагрева, которое имел проводник в момент отключения нагрузки;

e , t , T — здесь то же, что и для уравнения (5).

Для облегчения расчетов в приложении 2 приведены

также вычисленные значения величин $e^{-\frac{t}{T}}$ для разных значений $t:T$. Из этих данных, из непосредственных расчетов по уравнению (7) и из рис. 2 нетрудно видеть, что все сказанное выше о расчетах превышений, нагревов по (5) для моментов времени t , равных $1T$, $2T$, $3T$, $4T$ и $5T$, сохраняет свою силу и для процесса охлаждения, рассчитываемого по (7).

Полный нагрев проводника в любой момент времени t после отключения нагрузки и в данном случае равен превышению нагрева, определенному по уравнению (7), плюс температура окружающей среды.

Пример 5. Проложенный в земле трехжильный кабель с бумажной изоляцией до 3 кв, с медными жилами сечением 120 мм^2 перенес сквозной ток короткого замыкания, при котором его жилы были нагреты до $\vartheta_{ж}=215^\circ\text{C}$. Защита отключила кабель. Определить, чему будет равно превышение нагрева жил кабеля через 15, 30, 60, 90, 120 и 150 мин после отключения тока.

Решение. Воспользовавшись приложением 1, находим для такого кабеля: $T=30$ мин, а на основании гл. I-3 ПУЭ находим $\vartheta_{ж.н}=80^\circ\text{C}$, а $\vartheta_{ср.н}=15^\circ\text{C}$. Следовательно, превышение нагрева жил в момент отключения тока было равно $\tau_0=215-15=200^\circ\text{C}$. По этим данным, а также пользуясь приложением 2 и уравнением (7), составляем табл. 2.

Таблица 2

$t, \text{мин}$	15	30	60	90	120	150
$t:T$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$e^{-\frac{t}{T}}$	0,607	0,368	0,136	0,050	0,018	0,006
$\tau_t=200 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, {}^\circ\text{C}$	121,4	73,6	27,2	10	3,6	1,2

На основе данных расчета, приведенного в табл. 2, приходим к выводу, что только примерно через 34 мин после отключения тока короткого замыкания превышение нагрева этого кабеля снизится до длительно допустимой по нормам температуры 65°C , а полностью он остынет только через 2–2,5 ч.

5. Изменение превышения нагрева проводника при переменной нагрузке

Если проводник был нагружен током I_0 и имел уставновившееся превышение нагрева τ_0 , а затем в момент времени «нуль» (рис. 3) нагрузка изменилась до I , то, естественно, превышение нагрева проводника также начнет меняться и с течением времени достигнет уставновившейся величины τ_y , соответствующей нагрузке I . Величину τ_y можно определить либо по (2) на основе данных $I:I_0$ и величины τ_0 , либо, если τ_0 неизвестно, по уравнению (4).

Процесс изменения превышения нагрева проводника от τ_0 до τ_y легче всего поддается анализу, если условно рассматривать его как результат двух независимых процессов, протекающих в одно и то же время.

Процесс 1. Проводник был нагружен током I_0 и имел установившееся превышение нагрева τ_0 . В какой-то

момент времени («нуль» на рис. 3) нагрузка I_0 была отключена. Превышение нагрева проводника, обусловленное этой нагрузкой, должно понижаться от τ_0 к нулю по уравнению (7), что на рис. 3 изображено кривой 2.

Процесс 2. В тот же момент времени, когда была выключена нагрузка I_0 , включена другая нагрузка I . Превышение нагрева проводника, обусловленное этой нагрузкой, должно повышаться от 0 до соответствую-

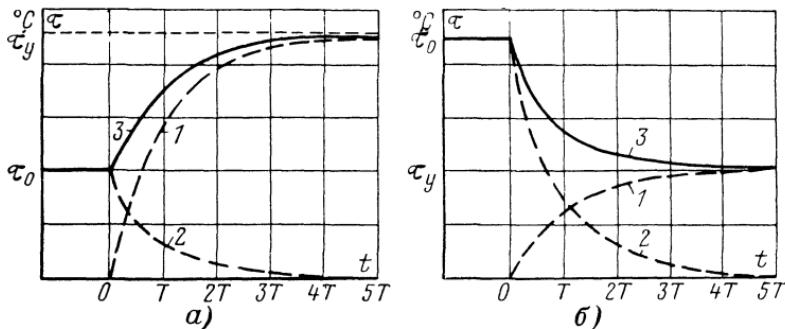


Рис. 3. Изменение превышения нагрева проводника от величины τ_0 , соответствующей ранее имевшейся нагрузке I_0 , до величины τ_y , соответствующей вновь установившейся нагрузке I .

a — увеличение превышения нагрева при $I > I_0$; *b* — снижение превышения нагрева при $I < I_0$.

щего этой нагрузке установившегося превышения нагрева τ_y по уравнению (5), что на рис. 3 изображено кривой 1.

В результате наложения этих двух одновременно протекающих процессов действительный ход изменения превышения нагрева изобразится кривой 3 (рис. 3), ординаты которой в любой точке равны сумме ординат кривых 1 и 2. Уравнение кривой 3 является суммой уравнений (5) и (7):

$$\tau_t = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}. \quad (8)$$

Уравнения (5) и (7) являются частными случаями уравнения (8). Действительно, когда превышение нагрева в момент изменения нагрузки равно нулю ($\tau_0=0$), второй член в уравнении (8) пропадает и мы получаем уравнение (5). Когда же в результате изменения (отключения) нагрузки установившееся превышение на-

грева должно стать равным нулю ($\tau_y=0$), в уравнении (8) пропадает первый член и мы получаем уравнение (7).

С помощью уравнения (8) и данных приложений 1, 2 можно подсчитать и построить кривые изменения пре-вышений нагрева не только тогда, когда одна длительная нагрузка сменяется другой длительной нагрузкой, но и когда нагрузка изменяется относительно быстро и нагрев проводника не успевает достигать установившейся величины.

Пример 6. При обследовании действующей трехфазной линии, питающей 154 электродвигателя металлообрабатывающих станков с общей установленной мощностью 370 квт, 380 в и суммой номинальных токов 795 а, за наиболее загруженную смену был зафиксирован

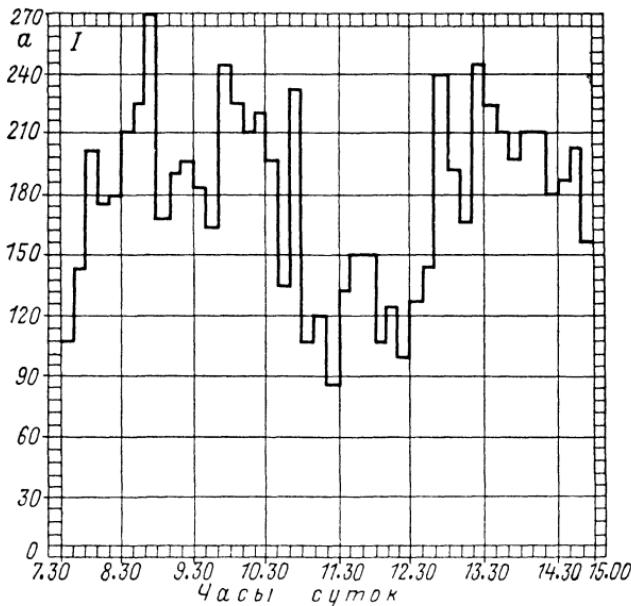


Рис. 4. График нагрузки трехфазной линии, питающей 154 электродвигателя металлообрабатывающих станков с общей установленной мощностью 370 квт, 380 в и средневзвешенным $\cos \Phi=0,5$.

показан график нагрузки этой линии, показанный на рис. 4. Нагрузка измерялась (записывалась) с помощью счетчиков киловатт-часов через каждые 10 мин. Предположено, что в пределах каждого десятиминутного интервала нагрузка постоянна (не изменялась). Средневзвешенное значение коэффициента мощности этой нагрузки от ин-

тервала к интервалу колебалось незначительно, и без большой погрешности оказалось возможным принять его равным $\cos \Phi = 0,5$.

Необходимо решить, можно ли эту трехфазную линию выполнить из трех алюминиевых проводников сечением по 95 mm^2 , проложенных в одной водогазопроводной трубе, если для такой линии, по данным ПУЭ (§ I-3-8 и табл. I-3-2), длительность допустимая нагрузка $I_n = 200 \text{ a}$ при температуре среды $\vartheta_{cp} = 25^\circ\text{C}$ и длительно допустимом нагреве $\vartheta_n = 65^\circ\text{C}$.

Надо проверить, не будут ли такие проводники нагреваться чрезмерно, или, наоборот, не будут ли они нагреваться мало (плохо использовать).

Решение. Нагрузка меняется через каждые 10 мин, т. е. в такие моменты времени, когда превышение нагрева τ_0 проводников не равно нулю. Следовательно, расчет надо вести для каждого десятиминутного интервала по полному уравнению (8). Исключение составляет первый десятиминутный интервал, о котором подробнее сказано ниже.

Чтобы облегчить расчет, сводим его в табл. 3, в которой данные столбцов 1—3 имеют вспомогательное значение, а данные столбцов

Таблица 3

Десятиминутный интервал (часы суток)	Нагрузка в этом интервале, I, a	$I : I_n$	$\tau_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$	$+ \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} = \tau_t$			
1	2	3	4	5	6	7	8
От 7.30 до 7.40	110	0,55	12	0,308	0	0,692	3,7
„ 7.40 „ 7.50	110	0,55	12	0,308	3,7	0,692	6,3
„ 7.50 „ 8.00	144	0,72	21	0,308	6,3	0,692	10,9
„ 8.00 „ 8.10	200	1,00	40	0,308	10,9	0,692	19,8
„ 8.10 „ 8.20	175	0,875	31	0,308	19,8	0,692	23,3
„ 8.20 „ 8.30	180	0,90	32	0,308	23,6	0,692	26,0
„ 8.30 „ 8.40	210	1,05	44	0,308	26,0	0,692	31,6
„ 8.40 „ 8.50	225	1,13	51	0,308	31,6	0,692	37,8
„ 8.50 „ 9.00	270	1,35	73	0,308	37,8	0,692	48,6
„ 9.00 „ 9.10	165	0,825	27	0,308	48,6	0,692	41,9
„ 9.10 „ 9.20	190	0,95	36	0,308	41,9	0,692	40,0
„ 9.20 „ 9.30	195	0,98	38	0,308	40,0	0,692	39,3

4—8 соответствуют величинам, входящим в уравнение (8). Заполнение табл. 3 ведем следующим образом:

Столбцы 1 и 2. В эти столбцы вписываем часы суток, соответствующие каждому рассматриваемому десятиминутному интервалу времени, и заимствованные из графика рис. 4 соответствующие им значения нагрузок I .

Столбец 3. На основе данных I из столбца 2 и учитывая, что по заданию $I_n = 200 \text{ a}$, мы для каждого интервала подсчитываем значения $I : I_n$.

Столбец 4. Учитывая, что по данным заданиям и уравнен-

нию (1) $\tau_{y,n} = \theta_n - \theta_{cp} = 65 - 25 = 40^\circ C$, мы, пользуясь уравнением (4) и данными столбца 3, находим для каждого десятиминутного интервала значение той установившейся величины превышения нагрева τ_y , которого достигли бы проводники, если бы нагрузка рассматриваемого десятиминутного интервала не изменялась долго.

Столбцы 5 и 7. По приложению 1 находим, что для алюминиевых проводов сечением $3 \times 95 \text{ mm}^2$, при прокладке их в одной трубе, постоянная времени нагрева $T = 0,85 \cdot 32 = 27 \text{ мин}$. Следовательно, учитывая, что в рассматриваемом графике все интервалы одинаковы и равны $t = 10 \text{ мин}$, получаем для каждого из них $t : T = 10 : 27 = 0,37$ и по приложению 2 находим:

$$\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = 0,308; \quad e^{-\frac{t}{T}} = 0,692.$$

Столбец 6. Величину превышения нагрева, которого достигли проводники в момент изменения нагрузки, т. е. в начале каждого десятиминутного интервала (τ_0), определяем следующим образом:

для первого интервала в первом приближении мы предполагаем, что до начала рассматриваемого графика проводники долго не были нагружены током, следовательно, их температура равна температуре среды, т. е. $\tau_0 = 0$;

для каждого последующего интервала величина τ_0 , очевидно, равна тому превышению нагрева τ_t , которого достигли проводники к концу предыдущего интервала (см. столбец 8).

Столбец 8. Располагая данными столбцов 4—7, мы легко можем выполнить расчет по уравнению (8) и определить величину превышения нагрева τ_t проводников к концу каждого десятиминутного интервала.

В табл. 3 этот расчет для краткости показан только для первых 12 интервалов графика. Результаты расчетов для этих и всех остальных интервалов графика изображены в виде кривой 1 на рис. 5.

Из условия задачи известно, что рассматриваемый график соответствует периоду наибольшей ожидаемой нагрузки. Поэтому, если бы мы были уверены, что эта наибольшая нагрузка наступает лишь в момент, когда превышение нагрева проводника равно нулю (например, лишь в начале утренней смены, после перерыва на ночную смену), и что в остальное время нагрузка ниже, то мы могли бы уверенно сказать, что выбранные проводники недостаточно хорошо используются по нагреву; здесь, по-видимому, можно было бы выбрать проводники несколько меньшего сечения, если бы стандарт не ограничивал наши возможности выбора ближайшим чрезесчур малым сечением 70 mm^2 . Однако в данном случае уверенно сделать такой вывод на основании условий задачи нельзя. Наоборот, можно предположить, что в начальный момент первого интервала нагрузки пре-

вышение нагрева проводника τ_0 не будет равно нулю, а будет равно $\tau_0 \approx \tau_h = 40^\circ\text{C}$. Если пересчитать данные табл. 3, приняв, что в начале первого интервала нагрузки проводник имел превышение нагрева $\tau_0 = 40^\circ\text{C}$, мы получим данные, приведенные в табл. 4 и изображенные кривой 2 на рис. 5. В этом случае оказывается, что выбранные проводники, по-видимому, удовлетворительно используются по нагреву и в то же время значительно не перегреваются сверх величин, длительно допустимых по нормам.

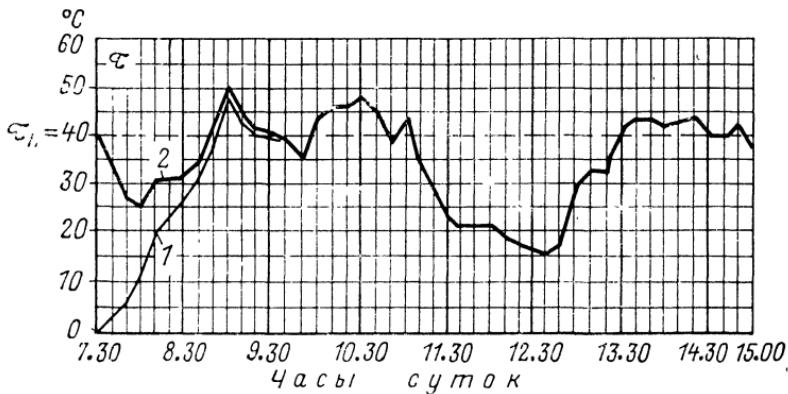


Рис. 5. График изменения превышения нагрева алюминиевых проводников 95 mm^2 , проложенных в одной водогазопроводной трубе, трехфазной линии, загруженной по графику рис. 4.

1 — при отсутствии предшествующего нагрева проводников ($\tau_0=0$); 2 — при предшествующем нагреве, равном длительно допустимому по нормам ($\tau_0=40^\circ\text{C}$).

Из рассмотрения кривых 1 и 2 рис. 5 можно сделать еще один существенный вывод. При расчете нагрева проводников, длительно работающих с переменным графиком нагрузки, в общем случае практически безразлично, правильно или не правильно наше произвольное предположение о том, что в начальный момент расчета превышение нагрева проводников было равно $\tau_0=0$ (табл. 3 и кривая 1 рис. 5), $\tau_0=40^\circ\text{C}$ (табл. 4 и кривая 2 рис. 5) или τ_0 равно любой другой, практически возможной величине. Все равно к концу отрезка времени, равного примерно $(3-4)T$ от начальной точки отсчета, результаты расчета практически совпадают (кривые 1 и 2 на рис. 5 сливаются). Только в пределах этого отрезка времени, $(3-4)T$, наше произвольное допущение может привести к заметной ошибке. Поэтому

Таблица 4

Десятиминутный интервал (часы суток)	Нагрузка в этом интер- вале, I, a	$I : I_{\text{H}}$	$\tau_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} = \tau_t$				
			3	4	5	6	7
1	2						
От 7.30 до 7.40	110	0,55	12	0,308	40	0,692	31,3
" 7.40 " 7.50	110	0,55	12	0,308	31,3	0,692	25,3
" 7.50 " 8.00	144	0,72	21	0,308	25,3	0,692	24,0
" 8.00 " 8.10	200	1,00	40	0,308	24,0	0,692	28,9
" 8.10 " 8.20	175	0,875	31	0,308	28,9	0,692	29,6
" 8.20 " 8.30	180	0,90	32	0,308	29,6	0,692	30,4
" 8.30 " 8.40	210	1,05	44	0,308	30,4	0,692	34,6
" 8.40 " 8.50	225	1,13	51	0,308	34,6	0,692	39,8
" 8.50 " 9.00	270	1,35	73	0,308	39,8	0,692	50,1
" 9.00 " 9.10	165	0,825	27	0,308	50,1	0,692	43,0
" 9.10 " 9.20	190	0,95	36	0,308	43,0	0,692	41,0
" 9.20 " 9.30	195	0,98	38	0,308	41,0	0,692	40,1

в тех случаях, когда по каким-то причинам требуется точно определить нагрев проводников именно в начальный период графика нагрузки, необходимо возможно более точно установить, какую величину превышения нагрева τ_0 имели проводники к моменту начала расчета.

6. Старение изоляции

На практике редко встречаются установки, в которых нагрузка долго не изменяется по величине. Как правило, она изменяется более или менее быстро и при этом в значительных пределах. Пример реального графика рис. 4 в этом отношении может считаться нормальным. По этой причине нагрев проводников обычно тоже непрерывно меняется, как это показано на примере рис. 5. В этих условиях без учета степени старения изоляции, работающей то при повышенных, то при пониженных нагревах, трудно оценить, с какой длительно допустимой нагрузкой необходимо выбрать проводники, чтобы в рассматриваемой установке они были хорошо использованы и в то же время долго не теряли свою изоляцию из-за чрезмерных нагревов.

Старение изоляции оценивается в относительных единицах. За единицу принимается старение, соответствующее длительной работе при температуре, допускаемой нормами. Для расчетов обычно пользуются

простым правилом, известным под наименованием «восьмиградусное правило».

Оно основано на общем физико-химическом законе, согласно которому каждые дополнительные 8° нагрева ускоряют физические и химические процессы в 2 раза. Применительно к закону относительного старения изоляции это значит, что каждые дополнительные 8° нагрева ускоряют старение (сокращают срок жизни) изоляции в 2 раза. Так, например, известно, что провода с резиновой изоляцией по нормам допускают длительное превышение нагрева 40° над температурой среды 25° . Если скорость старения изоляции при таком превышении нагрева принять за единицу, то при превышении нагрева 48° скорость старения будет $2^{(48-40):8} = 2$; при 56° скорость старения будет равна $2^{(56-40):8} = 2^2 = 4$; при 64°C имеем $2^{(64-40):8} = 2^3 = 8$ и т. д. Это значит, что, работая длительно при таких превышениях нагрева, провод состарится соответственно в 2, 4, 8 и т. д. раз быстрее, чем при длительной работе с превышением нагрева 40°C .

В общем виде этот закон относительного старения изоляции может быть выражен уравнением

$$I = 2^{(\vartheta_{ж} - \vartheta_{ж.н}):8} = 2^{(\tau - \tau_n):8}, \quad (9)$$

где I — относительное старение, т. е. величина, показывающая отношение скорости износа изоляции при длительной реально имеющейся нагрузке к скорости износа при длительной нагрузке по нормам, принятой за единицу;

$\vartheta_{ж}$ и $\vartheta_{ж.н}$ — температура жил соответственно фактическая и длительно допустимая по нормам;

τ и τ_n — превышение нагрева соответственно фактическое и длительно допустимое по нормам.

Пример 7. Провод с резиновой изоляцией, для которого $\vartheta_{ж.н} = 65^{\circ}\text{C}$ ($\tau_n = 40^{\circ}\text{C}$), в течение 1 ч нес нагрузку с установленнойся температурой, равной $\vartheta_{ж} = 97^{\circ}\text{C}$, что при расчетной температуре среды $\vartheta_{ср.н} = 25^{\circ}\text{C}$ соответствует превышению нагрева $97 - 25 = 72^{\circ}\text{C}$. Определить относительное старение.

Решение. Находим по (9):

$$I = 2^{(97-65):8} = 2^{(72-40):8} = 2^4 = 16.$$

Это значит, что за 1 ч (день, месяц, год) работы при таком нагреве провод состарится так, как будто он работал 16 ч (дней, месяцев, лет) при обычном нагреве, допускаемом нормами длительно.

При переменном графике с разными значениями нагрузок на разных его интервалах старение изоляции будет таким же, как при работе с длительно допустимой нагрузкой по нормам, если соблюдается условие

$$I = \frac{I_1 t_1 + I_2 t_2 + \dots + I_n t_n}{t} = 1, \quad (10)$$

где I — общее относительное старение изоляции за весь рассматриваемый интервал времени длительностью t ; I_1, I_2, I_n — относительное старение, подсчитанное по (9) для каждого из интервалов графика нагрузки длительностью t_1, t_2, t_n , а $t = t_1 + t_2 + \dots + t_n$.

Если в итоге расчета по (10) получим $I > 1$, то это значит, что при данном графике нагрузки выбранные проводники чрезмерно нагреваются и их изоляция будет стареть быстрее обычного в I раз и, наоборот, при $I < 1$ она будет стареть медленнее обычного, что свидетельствует о недостаточном использовании проводников.

Пример 8. Для облегчения подсчета старения изоляции рассмотренных в примере 6 проводников $3 \times 95 \text{ mm}^2$ с длительно допустимой нагрузкой 200 a при их работе с переменной нагрузкой по графику рис. 4 и соответствующими этой нагрузке превышениями нагрева по кривой 2 рис. 5 заменяем эту кривую эквивалентным

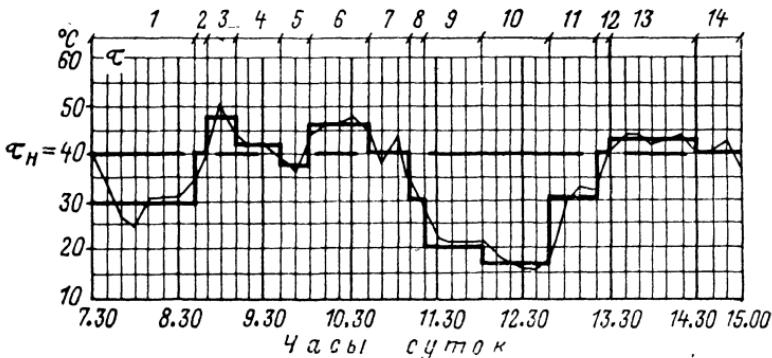


Рис. 6. Эквивалентный график изменения превышения нагрева проводников, построенный по графику рис. 5 для подсчета относительного старения изоляции.

ступенчатым графиком (рис. 6). Этот график строится таким образом, чтобы площадь, ограниченная каждой его прямоугольной ступенью и линией длительно допустимого превышения температуры по нормам (40°C на рис. 6), была равна соответствующей пло-

Таблица 5

Номер интервала по прямоугольному графику рис. 6	Продолжительность интервала, t , мин	Среднее превышение фактического нагрева в рассматриваемом интервале τ , $^{\circ}\text{C}$	$(\tau-40) : 8$	$I = 2(\tau-40) : 8$	It , мин
1	2	3	4	5	6
1	70	30	-1,25	0,42	29,5
2	10	40	0,00	1,00	10,0
3	20	48	+1,00	2,00	40,0
4	30	42	+0,25	1,19	35,6
5	20	38	-0,25	0,84	16,8
6	40	46	+0,75	1,68	67,2
7	30	40	0,00	1,00	30,0
8	10	30	-1,25	0,42	4,2
9	40	20	-2,5	0,176	7,1
10	50	17	-2,88	0,134	6,7
11	30	30	-1,25	0,42	12,6
12	10	40	0,00	1,00	10,0
13	60	42	+0,25	1,19	71,6
14	30	40	0,00	1,00	30,0
Итого	450	-	-	-	381,3

щади, ограничиваемой участком кривой, которую прямоугольная ступень заменяет. Затем для каждой ступени графика определяется относительный износ изоляции по уравнению (9), как это показано в табл. 5. Чтобы определить общий износ за всю смену по уравнению (10), суммируем все данные It по столбцу 6 табл. 5 и делим их на сумму значений t по столбцу 2, получаем:

$$I = \frac{381,3}{450} = 0,85.$$

Следовательно, несмотря на то, что превышение нагрева рассматриваемых проводников при такой загрузке в отдельные моменты времени достигает 50°C вместо длительно допустимых по нормам 40°C , результирующая величина старения изоляции за всю смену составляет всего лишь 85% от величины старения, допускаемого нормами, т. е. от той величины старения, которая имела бы место, если бы превышение нагрева проводников было все время одинаковым и равным 40°C .

Повторив такой же расчет, но при условии, что в примере 6 были бы применены проводники с длитель-

но допустимой нагрузкой не 200 а, а 194 а, мы легко убедились бы, что такие проводники при работе с фактической нагрузкой по графику рис. 4 нагреваются несколько выше и относительное старение их изоляции равно почти точно единице, т. е. они используются полностью. В этом случае мы можем зафиксировать, что для обследованной трехфазной линии наблюдался коэффициент спроса по току, равный $K_{ci} = 194 : 795 = 0,245$.

Пример 9. Интересен рассмотренный выше пример 5. При сквозном коротком замыкании превышение нагрева жил кабеля практически мгновенно достигло 200°C . Процесс снижения этого превышения от 200°C до нуля после отключения тока подсчитан в примере 5 и изображен кривой на рис. 7. Требуется подсчитать относительный износ изоляции за время охлаждения.

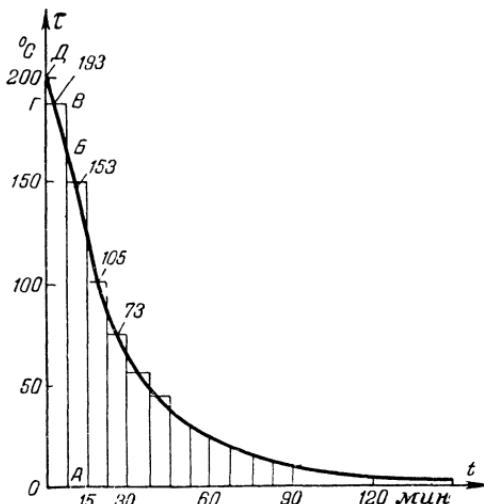


Рис. 7. Основной и эквивалентный графики остыния жил кабеля после отключения тока сквозного короткого замыкания.

Решение. На оси абсцисс откладываем одинаковые, возможно малые отрезки времени; из этих точек восстанавливаем перпендикуляры; кривая заменяется ступенчатым графиком таким образом, чтобы каждый прямоугольный участок графика (например, $OABVG$ на рис. 7) был равновелик по площади тому ограниченному кривой участку, который он заменяет (например $OABD$); для каждой ступеньки прямоугольного графика по масштабу определяем среднее для этой ступени превышение нагрева жилы и по уравнению (9) — относительный износ. Помножив фактическое время по графику на величину относительного износа, определяем относительное время, «прожитое изоляцией». Результаты расчета сводим в табл. 6. Он произведен только для первых

Таблица 6

Ступень графика по рис. 7	Фактическое время по графику, $t, \text{мин}$	Средне превышение нагрева жилы $\tau, {}^\circ\text{C}$	Длительно допустимое превышение нагрева жилы по нормам $\tau_n, {}^\circ\text{C}$	Относительное старение изоляции по уравнению (9), I	Относительное время „прожитое изоляцией“, $I t, \text{ч}$
1	7,5	193	65	$2^{(193-65):8} = 2^{16}$	$\frac{7,5 \cdot 2^{16}}{60} = 8190$
2	7,5	153	65	$2^{(153-65):8} = 2^{11}$	$\frac{7,5 \cdot 2^{11}}{60} = 256$
3	7,5	105	65	$2^{(105-65):8} = 2^5$	$\frac{7,5 \cdot 2^5}{60} = 4$
4	7,5	73	65	$2^{(73-65):8} = 2$	$\frac{7,5 \cdot 2}{60} = 0,25$
Итого	$30 \text{ мин} =$ $= 0,5 \text{ ч}$	—	—	—	8 450 ч

четырех ступеней графика. Дальнейший подсчет лишен смысла, так как он практически заметных уточнений внести не может. Из этого подсчета видно, что за 0,5 ч снижения превышения нагрева жил кабеля от 200 примерно до 65°C изоляция состарится так, как будто кабель нес нормальную длительно допустимую по нормам нагрузку с длительно допустимым превышением нагрева по нормам $\tau_n = 80 - 15 = 65^\circ\text{C}$ в течение 8 450 ч подряд. Иначе говоря, относительное старение изоляции по уравнению (10) в этом случае равно $I = 8450 : 0,5 = 16900$.

При оценке старения изоляции по уравнениям (9) и (10) необходимо учитывать следующее.

Закон старения изоляции в изложенном виде (8-градусное правило) и подсчеты по уравнениям (9) и (10) полностью действительны только для области относительно небольших температур. При больших превышениях нагрева, подобных рассмотренным в примере 9, эти подсчеты приводят к преувеличенным значениям износа. Тем не менее даже в этих случаях можно этими подсчетами пользоваться для относительного сопоставления вариантов.

Ни при каких условиях не следует допускать нагрев проводников выше температур, указанных в табл. 7 даже и в том случае, когда проверкой по (9) и (10) установлено, что относительное старение изоляции за

Таблица 7

Вид и материал проводника	Длительно допустимая темпера- тура жил по нормам, $\vartheta_{ж,н}^*$, °C	Кратковре- менно до-пустимая темпера- туря жилы при регу- лярных перегруз- ках, $\vartheta_{ж,п}^*$, °C	Максимально допустимое иревышение нагрева жилы по нормам при токе к. з., $\vartheta_{ж,м}^*$, °C
1. Шины и голые провода:			
médные	70	125	250
алюминиевые	70	125	150
стальные, непосредственно не соединенные с аппаратами .	70	125	350
стальные, непосредственно соединенные с аппаратами . .	70	125	250
2. Кабели с бумажной пропитанной изоляцией			
до 3 кв	80	125	200
3. Кабели и гровода с резиновой изоляцией:			
обычной	55	100	150
теплостойкой	65	110	150
4. Провода с полихлорвиниловой изоляцией	70	—	150
		с мед- ными жила- ми	с алю- миние- выми жила- ми

весь рассматриваемый период не выходит за пределы допустимого (не превышает единицы). При больших температурах могут быстро ухудшаться контакты, что приводит к местным недопустимо большим перегревам. А это в свою очередь может привести к порче изоляции или даже к ее воспламенению, а также к резкому снижению механической прочности проводников и их устойчивости к токам короткого замыкания.

ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

7. Типы предохранителей

Плавкие предохранители в настоящее время применяются почти исключительно только с закрытыми патронами. Открытые предохранители и предохранители в открытых сверху и снизу трубках почти полностью вытеснены потому, что они не удовлетворяют требованиям

техники безопасности, обладают недостаточной коммутационной способностью (т. е. способностью гасить дугу при больших токах короткого замыкания) и занимают много места, так как расстояние между ними на распределительных щитах и в ящиках должно быть увеличено во избежание переброса дуги.

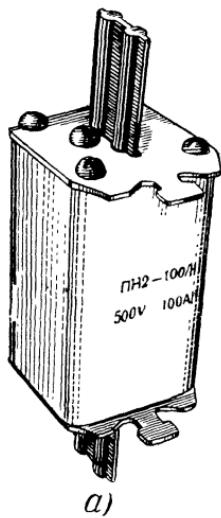
Имеются два основных типа предохранителей с закрытыми патронами.

Предохранители без наполнителя, по типу распространенных предохранителей серии ПР2 (см. рис. 8 и приложение 3). Патроны этих предохранителей на номинальный ток 100 а и более имеют толстостенные фибровые трубы. На концы трубы плотно насажены латунные втулки для предотвращения ее разрыва. Плавкие вставки привинчиваются к ножам. Ножи закрепляются латунными колпаками, которые навинчиваются на упомянутые втулки. У патронов на номинальные токи 15 и 60 а контактных ножей нет; их заменяют сами колпачки, которые при завинчивании создают контакт с плавкой вставкой. Патроны предохранителей ПР2 легко перезаряжаются. Однако у них контакт плавкой вставки с ножами патрона зависит от степени затяжки болта и потому защитная характеристика этих предохранителей нестабильна даже при перезарядке заводскими вставками. Это является их большим недостатком. При появлении дуги фибровая трубка выделяет газы, деионизирующие

Рис. 8. Предохранитель типа ПР.

1 — фибровый корпус;
2 — контакт; 3 — обойма;
4 — плавкая вставка.

дугу и создающие в патроне давление, достигающее иногда 100 ат. Большое давление способствует быстрой деионизации дуги и эффективному ее гашению, но предъявляет особые требования прочности к патронам. Поэтому эти предохранители практически невозможно изготовить на коммутационную спо-



а)

собность такую же, как у предохранителей с наполнителем (см. ниже), а при одинаковых размерах предохранители без наполнителя имеют много меньшую коммутационную способность. Кроме того, они труднее в изготовлении, более дороги, требуют больше места и на них расходуется много дефицитных материалов.

Предохранители с наполнителем, по типу выпускаемых многими заводами предохранителей ПН2, наполненных кварцевым песком¹ (рис. 9 и приложение 4). Зерна наполнителя, обладая в сумме большой поверхностью, хорошо поглощают тепло, охлаждают газы и тем самым резко снижают давление в патроне в момент

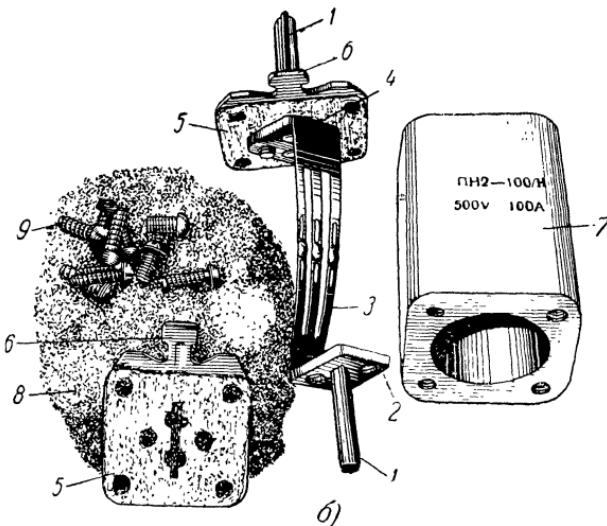


Рис. 9. Предохранитель типа ПН2.

а — общий вид; б — детали; 1 — нож; 2 — контактная шайба (приваренная к ножу); 3 — плавкая вставка; 4 — место приваривания плавкой вставки к контактной шайбе; 5 — асбокементная прокладка; 6 — крышка предохранителя; 7 — фарфоровый корпус; 8 — кварцевый песок; 9 — винты.

¹ В качестве наполнителя иностранные фирмы иногда применяют также мёл или гипс.

испарения вставки. Возникающая дуга в узких щелях с сильно развитой поверхностью охлаждения (в зазорах между песчинками) чрезвычайно быстро деионизируется и гасится настолько интенсивно, что ток не успевает достигнуть того наибольшего значения, которое имело бы место в защищаемой цепи при отсутствии в ней предохранителя. Эти обстоятельства позволяют существенно повысить коммутационную способность предохранителя, например в некоторых конструкциях даже с относительно непрочными патронами коммутационная способность доведена до 80 ка (действующее значение симметричной составляющей тока к. з.). Такая большая коммутационная способность в этих предохранителях получается потому, что вставка состоит из нескольких параллельных ветвей, расположенных в наполнителе таким образом, чтобы полностью использовать для охлаждения весь объем патрона. Во избежание ухудшения условий гашения дуги и увеличения давления в патроне наполнитель должен быть чист и иметь зерна с размерами, не выходящими за определенные пределы (указанные в заводской инструкции). Зерна кварца не должны содержать в заметных количествах примеси. Загрязнения и примеси в наполнителе при малых плавящихся токах (при большом времени плавления) способствуют образованию токопроводящих мостиков, следствием которых может быть отказ предохранителя в отключении и его разрушение. Патроны таких предохранителей обычно выполняются из стеатита или из стеклоткани на теплостойких лаках. У предохранителей ПН2 патроны фарфоровые. Встречаются конструкции с патронами из стекла с очень низким коэффициентом линейного расширения для предохранения от растрескивания (разрушения) патрона при местных перегревах, возможных в момент плавления вставки. Плавкие вставки в этих предохранителях обычно припаиваются или привариваются на точечном аппарате к специальному наконечнику у основания контактного ножа. Пере зарядка таких предохранителей возможна только в мастерской. Но зато при зарядке их по инструкции и при применении надлежащих плавких вставок, изготовленных заводом или по его чертежам, они обеспечивают высокую коммутационную способность, надежность работы и стабильность защитной характеристики, т. е. все, что свойственно высококачественным, не кустарным, за-

щитным аппаратам. При этом такие предохранители дешевы, их конструкция относительно проста и не требует большого расхода дефицитных материалов. Размеры таких предохранителей обычно малы, они могут безопасно располагаться близко друг к другу и потому занимают мало места на распределительных щитах и в ящиках комплектных устройств.

8. Пограничный ток, номинальный ток вставки и испытательные токи

Пограничным током $I_{\text{пог}}$ называется ток, при котором плавкая вставка в патроне плавится через промежуток времени, достаточный для достижения ею установившейся температуры. Время, необходимое для плавления вставки пограничным током, может быть относительно велико, но тем не менее очевидно, что ток, допускаемый для условий длительной эксплуатации, т. е. номинальный ток вставки $I_{\text{в}}$, должен быть меньше $I_{\text{пог}}$ во избежание ложно-аварийных и к тому же частых отключений. С другой стороны, для получения хорошей защиты при малых перегрузках необходимо стремиться к тому, чтобы $I_{\text{в}}$ возможно меньше отличалось от $I_{\text{пог}}$. Эти два противоречивых требования в значительной мере определяют трудности конструирования хороших предохранителей, надежно работающих и в то же время осуществляющих хорошую защиту не только при коротких замыканиях, но и при малых перегрузках.

На практике выявлять значения $I_{\text{пог}}$ трудно, так как это требует много времени. Тем более трудно при массовом выпуске предохранителей контролировать их соответствие определенному соотношению $I_{\text{пог}} : I_{\text{в}}$. Поэтому для каждого типа и конструкции предохранителя ГОСТ или техническими условиями устанавливаются определенные значения испытательных токов и длительность испытания. Эти показатели косвенно гарантируют, что $I_{\text{пог}} : I_{\text{в}}$ будут соответствовать установленным для данной конструкции значениям. Так, например, в ГОСТ 3041-45, которому соответствуют предохранители ПР2, указано, что плавкие вставки не должны плавиться при нижнем значении испытательного тока и должны плавиться при верхнем его значении при длительности его приложения, указанной в табл. 8.

Таблица 8

Номинальный ток вставки I_B , а	Длительность приложения испытательного тока, ч	Испытательный ток, а	
		Нижнее значение	Верхнее значение
6 и 10	1	$1,5 I_B$	$2,1 I_B$
15, 20 и 25	1	$1,4 I_B$	$1,75 I_B$
От 35 до 350 включительно	1	$1,3 I_B$	$1,6 I_B$
От 430 до 1 000 включительно	2	$1,3 I_B$	$1,6 I_B$

По ГОСТ 7541-55, которому соответствуют предохранители ПН2, для всех вставок от 30 до 600 а включительно длительность приложения испытательного тока равна 1 ч, нижнее значение испытательного тока $1,3 I_B$, а верхнее значение $1,6 I_B$.

С достаточной точностью можно считать, что $I_{\text{пог}}$ равно среднему значению между нижним и верхним значениями испытательного тока.

9. Материал плавких вставок

Плавкие вставки изготавливаются из меди, цинка, свинца или серебра. Основные технические данные этих материалов под углом зрения их применимости для плавких вставок приведены в табл. 9.

Таблица 9

Материал плавких вставок	Удельный вес, г/см ³	Температура плавления при нормальном давлении, °C	Электрическое сопротивление при 20° С, ом·мм ² /м	Эксплуатационная температура ¹ , °C
Медь	8,93	1 083	0,0175	250
Цинк	7,10	419	0,06	200
Свинец	11,34	327	0,22	150
Серебро	10,50	961	0,0155	*
Медь с оловянным растворителем	8,93	**	0,0175	***

* Зависит от конструкции предохранителя.

** Зависит от времени воздействия расплавленного оловянного растворителя, может расплываться даже при температуре 280° С и менее.

*** Менее температуры плавления олова (232° С) и обычно около 200° С.

¹ Под эксплуатационной температурой здесь подразумевается предельно допускаемая в современных предохранителях температура плавкой вставки при номинальном токе.

В современных наиболее совершенных предохранителях отдают предпочтение медным вставкам с оловянным растворителем. Широко распространены также цинковые вставки. Медные вставки для предохранителей наиболее удобны, просты и дешевы. Улучшение их характеристик достигается наплавлением оловянного шарика в определенном месте, примерно в середине вставки. Такие вставки применяются, например, в упомянутой серии насыпных предохранителей ПН2. Олово плавится при температуре 232°C , значительно меньшей, чем температура плавления меди, и растворяет медь вставки в месте соприкосновения с нею. Появляющаяся при этом дуга уже расплавляет всю вставку и гасится. Цепь тока оказывается отключенной.

Таким образом, наплавление оловянного шарика приводит к следующему.

Во-первых, медные вставки начинают реагировать с выдержкой времени на столь малые перегрузки, на которые они при отсутствии растворителя вовсе не реагировали бы. Например, медная проволока диаметром 0,25 *мм* с растворителем расплавилась при температуре 280°C за 120 *мин*.

Во-вторых, при одной и той же достаточно большой температуре (т. е. при одинаковой нагрузке) вставки с растворителем реагируют много быстрее, чем вставки без растворителя. Например, медная проволока диаметром 0,25 *мм* без растворителя при средней температуре 1000°C расплавилась за 120 *мин*, а такая же проволока, но с растворителем при средней температуре только 650°C расплавилась всего за 4 *мин*.

Применение оловянного растворителя позволяет иметь надежные и дешевые медные вставки, работающие при сравнительно низкой эксплуатационной температуре, имеющие относительно малый объем и вес металла (что благоприятствует коммутационной способности предохранителя) и в то же время обладающие большим быстродействием при больших перегрузках и реагирующие с выдержкой времени на относительно малые перегрузки. Отношение $I_{\text{пог}}:I_{\text{в}}$ у таких вставок относительно невелико (не более 1,45), что облегчает условия выбора проводников, защищаемых такими плавкими вставками от перегрузок.

Цинк часто используется для изготовления плавких вставок. В частности, такие вставки применяются в упо-

мнутой серии предохранителей ПР2. Вставки из цинка более устойчивы против коррозии. Поэтому, несмотря на относительно малую температуру плавления, для них, вообще говоря, можно было бы допустить такую же предельную эксплуатационную температуру, как для меди (250°C), и конструировать вставки с меньшим сечением. Однако электрическое сопротивление цинка примерно в 3,4 раза больше, чем у меди. Чтобы сохранить ту же температуру, надо уменьшить потери энергии в ней, соответственно увеличив ее сечение. Вставка получается значительно более массивной. Это при прочих равных условиях приводит к понижению коммутационной способности предохранителя. Кроме того, при массивной вставке с температурой 250°C не удалось бы в тех же размерах удержать на допустимом уровне температуру патрона и контактов. Все это заставляет снизить предельную температуру цинковых вставок до 200°C , а следовательно, еще больше увеличивать сечение вставки. В итоге предохранители с цинковыми вставками при тех же размерах обладают значительно меньшей устойчивостью к токам короткого замыкания, чем предохранители с медными вставками и оловянными растворителями.

10. Конструкция плавких вставок

Заводы обычно изготавливают плавкие вставки из нескольких параллельных проволочек или ленточек. При этом улучшаются условия охлаждения вставки, лучше используется весь объем патрона для рассеивания энергии дуги, уменьшается объем металла как в отдельных ветвях, так и во всей вставке в целом, увеличивается быстродействие при отключении токов короткого замыкания и улучшаются условия гашения дуги.

В плавких вставках обычно делают два и более узких коротких перешейка. При коротких замыканиях они представляют собой значительное сопротивление и ограничивают величину тока, уменьшают время отключения и увеличивают разрывную способность. Это обусловливается тем, что дуги возникают прежде всего и обычно поочередно на перешейках, обладающих большими сопротивлениями, сильнее греющихся, а не сразу по всему сечению на всей длине вставки. Такой ход процесса уменьшает перенаряжения, обычно возникающие при быстром плавлении вставки,

и нагрев патрона предохранителя. Наоборот, при малых токах перегрузки, т. е. при относительно больших временах плавления, температура коротких перешейков благодаря интенсивному отсосу тепла уравнивается с температурой остальной вставки и перешейки практически не уменьшают время действия предохранителя.

11. Защитные характеристики

Количество тепла, фактически выделяющегося в плавкой вставке, пропорционально квадрату тока и ее со- противлению (I^2r), а количество тепла, потребное для плавления вставки,— величина постоянная. Поэтому чем больше ток, тем быстрее выделяется необходимое количество тепла и тем быстрее плавится вставка. При одном и том же токе быстрее расплавится вставка на меньший номинальный ток, так как ее сечение меньше, сопротивление больше и при том же токе в ней выделяется больше тепла, а масса металла в ней, наоборот, меньше, и для его плавления требуется меньше тепла.

Под защитной характеристикой предохранителя подразумевается зависимость полного времени отключения (продолжительность расплавления плавкой вставки плюс продолжительность горения дуги) от величины отключаемого тока. Защитные характеристики принято изображать в виде кривых, подобных представленным на рис. 10. На горизонтальной оси отложена кратность тока перегрузки или короткого замыкания по отношению к номинальному току плавкой вставки. На вертикальной оси — время отключения t . Например, на рис. 10 (сплошная кривая) видно, что предохранитель отключает двукратный ток приблизительно через 2,5 мин, пятикратный ток — через 1,0 сек, десятикратный ток — через 0,05 сек. Такая характеристика с указанием на горизонтальной оси кратности токов является типовой. Она относится не к одной плавкой вставке, а к целой серии подобных друг другу плавких вставок на разные номинальные токи. Когда же необходимо судить о каждой плавкой вставке отдельно, на горизонтальной оси откладывается не кратность тока перегрузки, а абсолютная величина тока в амперах и для каждой вставки дается отдельная кривая зависимости времени отключения от тока. В итоге получается семейство защитных характеристик подобно указанному на рис. 11 для предохранителей серии ПН2.

При пользовании защитной характеристикой предохранителя, изображенной в виде одной тонкой линии, необходимо иметь в виду, что она дает средние значения времени отключения при данном токе. В действительности имеют место существенные отклонения

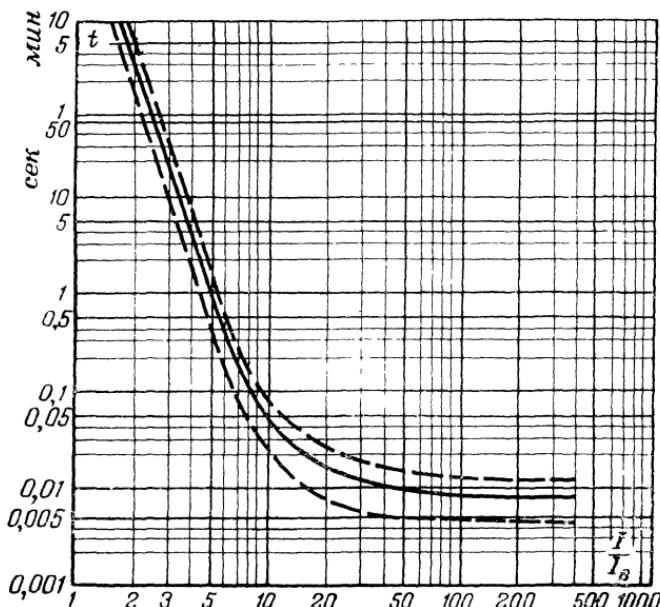


Рис. 10. Типовая защитная характеристика предохранителей серии ПН2.

от этих средних значений за счет производственных допусков в самом материале плавких вставок, в их изготовлении, за счет качества контактов и старения в процессе эксплуатации материала плавких вставок. Эти отклонения могут в крайних случаях наиболее неблагоприятного сочетания всех факторов достигать $\pm 50\%$. Поэтому защитную характеристику каждой плавкой вставки в действительности следовало бы изображать в виде широкой полосы, в пределах которой лежит возможное время отключения. Этого не делают только для легкости изображения семейств кривых. Например, на рис. 10 возможное время отключения лежит в пределах, ограниченных пунктирными линиями: при двукратном токе — в пределах от 1,25 до 4,25 мин, а на основной характеристике показано среднее значение — 2,5 мин;

то же при пятикратном токе — от 0,4 до 1,5 сек, а на основной характеристики показано 1,0 сек и т. д.

С помощью уравнения (8) можно подсчитать, какой должна быть рекомендуемая защитная характеристика, чтобы, с одной стороны, во избежание частых перерывов

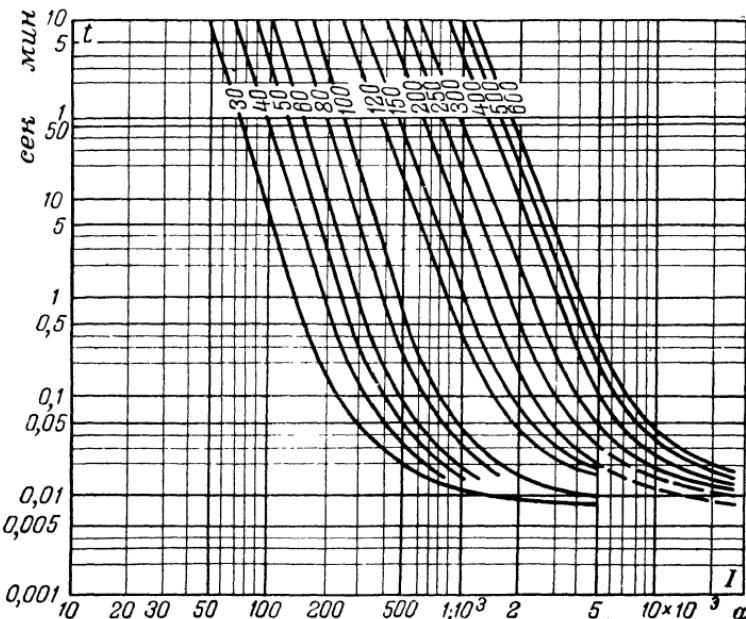


Рис. 11. Семейство защитных характеристик плавких вставок предохранителей серии ПН2. На кривых обозначены номинальные значения тока плавких вставок. Наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания, пропускаемого предохранителями ПН2-100 и ПН2-250, равно примерно 5 000 а. Плавкие вставки 200 и 250 а предохранителя ПН2-400 пропускают большие токи.

в электроснабжении кратковременные перегрузки не отключались слишком быстро, а с другой стороны, чтобы выдержки времени t до момента отключения перегрузок не были чрезмерно большими и превышения нагревов проводников τ_t в момент отключения не были бы больше максимально допустимых величин $\tau_{\text{ж.м}}$ по табл. 7.

Раскрыв в уравнении (8) скобки и сделав необходимые преобразования, находим:

$$t = 2,3T \lg \left(\frac{\tau_y - \tau_0}{\tau_y - \tau_t} \right) \quad (11)$$

или, если обозначить

$$\frac{\tau_y - \tau_0}{\tau_y - \tau_t} = A, \quad (11')$$

получаем:

$$t = 2,3T \lg A. \quad (11'')$$

В уравнении (11'') постоянную времени нагрева T находим для нужных нам проводников по приложению 1, а величины A и $\lg A$ определяем следующим образом.

Для проводов и кабелей с резиновой изоляцией известны: длительно допустимое превышение нагрева по нормам $\tau_{y,n}=40^\circ\text{C}$; до момента появления перегрузки проводники были нагружены длительно допустимым током по нормам («номинальным током»), следовательно, в момент появления перегрузки их превышение нагрева $\tau_0=\tau_{y,n}=40^\circ\text{C}$; максимально допустимое превышение нагрева к моменту отключения тока (по табл. 7) $\tau_t=\tau_{jk,m}=150^\circ\text{C}$.

Для кабелей с бумажной изоляцией при прокладке их в земле ($\vartheta_{cp}=15^\circ\text{C}$) имеем: $\tau_{y,n}=80-15=65^\circ\text{C}$; $\tau_0=65^\circ\text{C}$; $\tau_t=200^\circ\text{C}$; для кабелей, проложенных в воздухе ($\vartheta_{cp}=25^\circ\text{C}$), $\tau_{y,n}=55^\circ\text{C}$; $\tau_0=55^\circ\text{C}$ и $\tau_t=200^\circ\text{C}$.

По вышеуказанным данным и задавшись несколькими значениями кратности тока перегрузки $I:I_n$, мы для каждой заданной величины перегрузки находим следующие данные: τ_y — по уравнению (4); A — по уравнению (11) и, наконец, $\lg A$ — по таблицам из любого справочника по элементарной математике.

Располагая значениями величин $\lg A$ для разных кратностей тока перегрузки и зная постоянные времени нагрева проводников, уже нетрудно по уравнению (11'') найти выдержку времени t , по истечении которой перегрузка данной величины обязательно должна быть отключена во избежание чрезмерно большого повышения нагрева проводников и быстрой порчи их изоляции.

Пример полного расчета величин $\lg A$ приведен в табл. 10 только для проводов с резиновой изоляцией. Для кабелей с бумажной изоляцией при прокладке их в земле и открыто в воздухе в этой же таблице приведены только конечные результаты расчета (значения $\lg A$), необходимые для последующего пользования.

Результаты примеров расчета рекомендуемых защитных характеристик по уравнению (11'') на основе

данных $\lg A$ из табл. 10 и значений T из приложения 1 приведены для наиболее характерных линий в табл. 11. Указанные здесь допустимые выдержки времени отвечают только одному условию: превышение нагрева проводников в момент отключения перегрузки не должно быть больше $\tau_{ж.m}$ по табл. 7. Необходимо, однако, считаться и с уровнем старения изоляции за время нагревания проводников перегрузкой и последующего их остывания после отключения перегрузки.

Таблица 10

Для проводов и кабелей с резиновой изоляцией: $\vartheta_{ж.n} = 65^\circ \text{C}$
 $\vartheta_{ср.n} = 25^\circ \text{C}$; $\tau_{y.n} = 40^\circ \text{C}$; $\tau_0 = 40^\circ \text{C}$; $\tau_t = 150^\circ \text{C}$ (по табл. 7)

При $I:I_n$	2	3	4	5	10	20
$(I:I_n)^2$	4	9	16	25	100	400
τ_y по уравнению (4)	160	360	640	1 000	4 000	16 000
$\tau_y - \tau_0$	120	320	600	960	3 960	15 960
$\tau_y - \tau_t$	10	210	490	850	3 850	15 850
A по уравнению (11)	12,0	1,52	1,22	1,13	1,025	1,007
$\lg A$	1,0792	0,1818	0,0864	0,0531	0,0107	0,0030

То же, но для кабелей с бумажной изоляцией, проложенных открыто в воздухе: $\vartheta_{ж.n} = 80^\circ \text{C}$; $\vartheta_{ср.n} = 25^\circ \text{C}$; $\tau_{y.n} = 55^\circ \text{C}$; $\tau_0 = 55^\circ \text{C}$; $\tau_t = 200^\circ \text{C}$ (по табл. 7)

$\lg A$	0,9191	0,1761	0,0828	0,0531	0,0107	0,0030
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

То же, но для кабелей с бумажной изоляцией, проложенных в земле: $\vartheta_{ж.n} = 80^\circ \text{C}$; $\vartheta_{ср.n} = 15^\circ \text{C}$; $\tau_{y.n} = 65^\circ \text{C}$; $\tau_0 = 65^\circ \text{C}$; $\tau_t = 200^\circ \text{C}$ (по табл. 7)

$\lg A$	0,5119	0,1303	0,0645	0,0414	0,0086	0,0021
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

На рис. 12 для примера показаны кривые нагрева и охлаждения проводников линии 2 из табл. 11.

При 20-кратной перегрузке превышение нагрева проводников этой линии повысится от 40 до 150°C почти мгновенно (за 1,25 сек). Если в этот момент аппарат защиты отключит линию, то проводники начнут охлаждаться и процесс охлаждения изобразится кривой 1, рассчитанной по уравнению (7). Если для этой кривой посчитать относительное старение изоляции, как это показано в примере 5 (рис. 7), мы получим следующие данные: превышение нагрева снизится со 150 до 40°C за 210 сек; относительное старение изоляции за это время $I=400$; это значит, что за эти 210 сек изоляция состарится так, как она старится при длительно допу-

Таблица 11

№ линий (сравни рис. 13)	Типы и сечения проводников, способ их прокладки и их постоянная времени T , сек	Наибольшее время t (сек), по истечении которого аппарат защиты должен отключить линию при кратности перегрузки $I : I_n$					
		2	3	4	5	10	20
1	Три провода с резиновой изоляцией в одной водогазопроводной трубе, сечением по 150 мм^2 ; $T=41 \text{ мин}=2460 \text{ сек}$	6 100	1 030	490	300	60	17
2	То же по 4 мм^2 ; $T=3 \text{ мин}=180 \text{ сек}$	446	75	36	22	4,4	1,25
3	Трехжильный кабель с бумажной изоляцией,ложенный открыто в воздухе, сечением $3 \times 240 \text{ мм}^2$; $T=90 \text{ мин}=5400 \text{ сек}$	11 400	2 200	1 020	660	125	48
4	То же, но $3 \times 4 \text{ мм}^2$; $T=18 \text{ мин}=1080 \text{ сек}$	2 300	440	205	132	25	7,5
5	То же в земле, сечением $3 \times 240 \text{ мм}^2$; $T=45 \text{ мин}=2700 \text{ сек}$	3 180	810	400	256	50	13,6
6	То же, но $3 \times 4 \text{ мм}^2$; $T=6 \text{ мин}=360 \text{ сек}$	425	108	53	34	7,2	1,8

стимом превышении нагрева по нормам ($\tau_{y,n}=40^\circ\text{C}$) за время, равное $(210 \cdot 400) : 3600 = 23,4 \text{ ч.}$

При двукратной перегрузке превышение нагрева проводников той же линии повысится от 40 до 150°C за время, равное 446 (~ 450) сек, после чего аппарат защиты отключит линию и начнется охлаждение проводников. Процесс нагрева и последующего охлаждения в этом случае иллюстрируется кривой 2 рис. 12. Если в данном случае посчитать относительное старение изоляции подобно изложенному выше, мы получим следующие данные: за время (450 сек) повышения нагрева от 40 до 150°C относительное старение изоляции $I=3554$; следовательно, относительное время, прожитое изоляцией, равно $(450 \cdot 3554) : 3600 = 444 \text{ ч.}$ за все время (660 сек) нагрева до 150°C и последующего охлаждения до 40°C получаем $I=2550$ и относительное время, прожитое изоляцией, равно $(660 \cdot 2550) : 3600 \approx 467 \text{ ч.}$

Таким образом мы видим, что в рассмотренном случае при выдержках времени указанных в табл. 11, старение

ние изоляции за время отключения двукратной перегрузки очень велико: относительное время, «прожитое» изоляцией за один такой период (467 с), почти в 20 раз превышает относительное время, «прожитое» изоляцией за один период отключения 20-кратной перегрузки (23,4 с), несмотря на то, что в обоих случаях превышения нагрева проводников в момент отключения одинаковы (150°C). Поэтому на практике в результа-

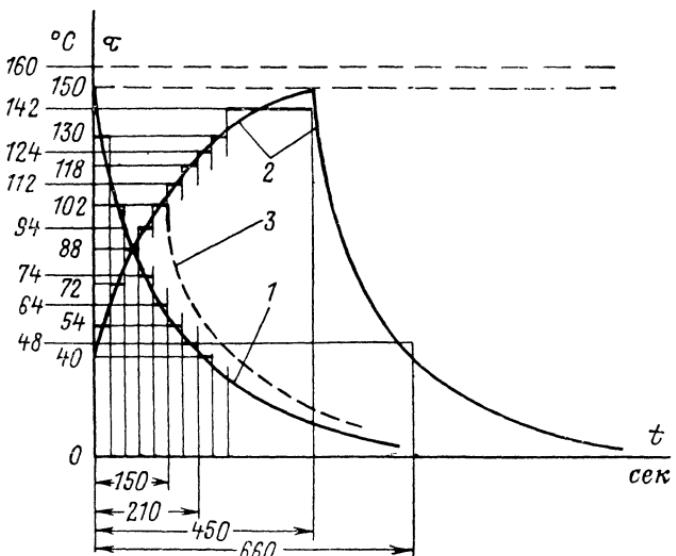


Рис. 12. Нагрев и охлаждение при перегрузках проводов с резиновой изоляцией, $3 \times 4 \text{ mm}^2$, проложенных в трубах.
1 — охлаждение после мгновенного превышения нагрева до 150°C при 20-кратной перегрузке; 2 — превышение нагрева до 150°C при двукратной перегрузке и последующее охлаждение; 3 — превышение нагрева и охлаждение при отключении двукратной перегрузки через 150 сек после ее появления.

четов табл. 11 вносятся поправки таким образом, чтобы показанные там выдержки времени при больших перегрузках ($10 \div 20 I_{\text{n}}$) не изменились, а при малых перегрузках чтобы они были существенно ниже. Обычно рекомендуют, чтобы при двукратной перегрузке выдержка времени не превышала примерно 150 сек, а при 1,5-кратной перегрузке, во всяком случае, не превышала 600 сек (сравните с данными табл. 8). В этом случае, как показано на рис. 12, превышение нагрева рассматриваемых проводников за 150 сек до момента отключения перегрузки достигнет примерно 106°C (вместо максимально

допустимых 150°C) и процесс последующего охлаждения изобразится кривой 3 (рис. 12). В этом случае за все время роста превышения нагрева и последующего его снижения до 40°C (всего ≈ 300 сек) относительное старение изоляции $I \approx 56$ и, следовательно, относительное время, прожитое изоляцией, окажется равным $(300 \cdot 56) : 3600 \approx 4,7$ ч, т. е. примерно в 100 раз меньше, чем в предыдущем случае.

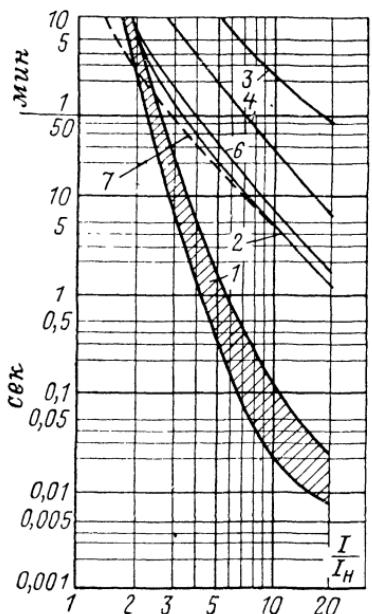


Рис. 13. Сопоставление расчетных защитных характеристик с фактической защитной характеристикой предохранителя.

1 — защитная характеристика предохранителя ПН2 по рис. 10; 2—4 и 6 — расчетные характеристики соответствующих линий по данным табл. 11; 7 — характеристика, рекомендуемая для проводников всех типов и сечений, скорректированная таким образом, чтобы при двухкратных перегрузках выдержка времени не превышала примерно 150 сек.

наименьшие выдержки времени по условиям нагрева допустимы для проводов с резиновой и ей подобной изоляцией, проложенных в трубах (кривая 2 рис. 13). Немного больше допустимые выдержки времени для кабелей, проложенных в земле (кривая 6), и еще больше для кабелей, проложенных в воздухе (кривая 4).

На рис. 13 сопоставлены: расчетные характеристики по данным табл. 11, характеристика, рекомендуемая для всех типов и сечений проводников, скорректированная в соответствии со сказанным выше по условиям старения изоляции за время отключения малых перегрузок и фактически имеющаяся защитная характеристика плавких предохранителей ПН2 по рис. 10. Из этого сопоставления можно сделать следующие выводы:

- При одинаковой кратности тока перегрузки ($I : I_n$) для проводников малых сечений по условиям предельного нагрева допустима значительно меньшая выдержка времени, чем для проводников того же типа, но больших сечений (сравните кривые 3 и 4 рис. 13).

- При одинаково малых сечениях (например, 4 mm^2)

3. Плавкая вставка предохранителей ПН2, имеющая номинальный ток, равный номинальному току проводника (т. е. его длительно допустимому току по нормам), отключает все токи от $I = 2I_n$ и более значительно быстрее, чем это требуется по условиям предельного нагрева даже для проводников малых сечений. А токи большой величины такие плавкие вставки отключают даже в десятки раз быстрее, чем это необходимо. Поэтому в установках со значительными пиками нагрузки (например, с пусковыми токами) плавкие вставки, выбранные по номинальному току линий, не в состоянии обеспечить бесперебойную работу.

4. В зоне двукратных перегрузок плавкие вставки с номинальным током, равным номинальному току проводников, допускают чрезмерно большие выдержки времени; проводники будут нагреваться выше допустимого предела и чрезмерно быстро стариться за время отключения.

5. Аппараты с рекомендуемой защитной характеристикой по кривой 7 рис. 13 будут надежно защищать от чрезмерных нагревов все виды проводников всех сечений при любых токах повреждений. При этом только проводники малых сечений при очень больших кратностях тока повреждения ($10 \div 20 I_n$) к моменту отключения будут нагреваться до допустимых максимальных пределов. Проводники больших сечений будут нагреваться значительно меньше, поскольку выдержки времени по кривой 7 меньше выдержек, допустимых для этих проводников. В какой степени снижается превышение нагрева при уменьшении выдержки времени, можно ориентировочно судить по примеру кривой 2 на рис. 12: при уменьшении выдержки времени с 450 до 45 сек (в 10 раз) превышение нагрева вместо 150°C достигнет примерно 72°C (т. е. снизится всего лишь в 2 раза). Тем не менее это снижение нагрева существенно снизит относительное старение изоляции за время действия защиты.

Факт снижения выдержек времени отключения при перегрузках, например с уровня кривой 3 (рис. 13) до уровня рекомендуемой кривой 7, не может служить причиной необоснованных частых перерывов в электроснабжении: сверхтоки большей длительности, чем это допустимо по кривой 7, не могут рассматриваться как перегрузки, свойственные нормальным условиям эксплуатации, т. е. как перегрузки естественные, преходящие, не

подлежащие отключению; обычно это — сверхтоки по-вреждений в самой защищаемой линии. А в таких случаях лучше отключать линию возможно скорее.

По указанным причинам защитная характеристика по кривой 7 (рис. 13) рекомендована для руководства при конструировании всех вообще аппаратов защиты проводников в электросетях до 1 000 в. Свойства плавких предохранителей таковы, что с их помощью добиться защитной характеристики, близкой к рекомендуемой, практически невозможно. К каким средствам прибегают для повышения чувствительности плавких вставок к малым перегрузкам, указывалось выше в § 10. В зарубежной практике конструируются плавкие предохранители «быстродействующие» с защитными характеристиками, близкими к характеристикам предохранителей ПН2 (кривая 1, рис. 13), и предохранители «замедленного действия» с характеристиками, обеспечивающими более высокие выдержки времени в области больших перегрузок. Последние применяются для защиты сетей с большими пиками нормальных нагрузок, в частности для защиты линий со значительными пиками пусковых токов.

12. Перезарядка патронов предохранителей

В табл. 12 показан набор плавких элементов, из которых составляются плавкие вставки предохранителей ПН2. Они штампуются из медной фольги разной толщины. Имеется всего три типа плавких элементов — одно-, двух- и трехленточные. Все они состоят из деталей одинаковых размеров. Каждая ленточка элемента имеет в центре участок с наплавленным оловянным растворителем. По обеим сторонам растворителя выштампованы отверстия, создающие упомянутые в § 10 узкие перешейки. В табл. 13 показано, какие элементы и какое число их требуется для составления каждой плавкой вставки. Каждый элемент плавкой вставки должен быть определенным образом расположен в пространстве внутри патрона предохранителя, чтобы обеспечить наилучшее использование объема наполнителя для охлаждения и гашения дуги. Поэтому элементы вставки должны привариваться на точечном аппарате (или припаиваться) к контактным шайбам предохранителя определенным образом, строго по инструкции завода. Приварка или припаивание обязательны для обеспечения стабильности защитной характеристики предохранителя и его комму-

Таблица 12

Плавкие элементы, из которых составляются плавкие вставки предохранителей ПН2

№ п/п.	Заводское обозначение	Толщина медной фольги, мм	Эскиз плавкого элемента
1	5БУ.594.061.1	0,1	
2	5БУ.594.061.2	0,15	
3	5БУ.594.061.3	0,2	
4	5БУ.594.060.1	0,1	
5	5БУ.594.060.2	0,15	
6	5БУ.594.060.3	0,2	
7	5БУ.594.058.1	0,1	
8	5БУ.594.058.2	0,15	
9	5БУ.594.058.3	0,2	
10	5БУ.594.058.4	0,25	
11	5БУ.594.058.5	0,3	
12	5БУ.594.059	0,15	Как № 8, но с прямыми концами

тационной способности в условиях длительной эксплуатации. Менее надежные способы осуществления контакта между плавкой вставкой и контактными шайбами (или ножами) предохранителя недопустимы.

Перезарядка должна выполняться в мастерских, где могут быть обеспечены квалифицированное наблюдение и контроль за выполнением инструкции. Должны применяться элементы только заводского изготовления или изготовленные строго по его чертежам. Поверхности внутри патрона и контактных шайб должны быть тщательно очищены. Патроны, имеющие хотя бы волосяные трещины, не должны допускаться к сборке. Применяемый для заполнения кварцевый песок должен отвечать определенным требованиям в отношении состава, быть

Таблица 13

Номера и число требуемых плавких элементов по табл. 12 для составления одной плавкой вставки предохранителей ПН

Тип предохранителя	Номинальный ток плавкой вставки, а	Требуемые плавкие элементы		Тип предохранителя	Номинальный ток плавкой вставки, а	Требуемые плавкие элементы	
		№ по табл. 12	Колич-чество, шт.			№ по табл. 12	Колич-ство, шт.
ПН2-100	30	1	1	ПН2-250	80	{ + ₂ ³	{ + ₁ ¹
	40	2	1		100	8	1
	50	4	1		120	{ + ₁ ⁸	{ + ₁ ¹
	60	{ + ₁ ²	{ + ₁ ¹		150	{ + ₁ ⁶	{ + ₁ ¹
	80	{ + ₂ ³	{ + ₁ ¹		200	8	2
	100	12	1		250	8	3
ПН2-400	200	8	2	ПН2-600	300	{ + ₄ ¹⁰	{ + ₁ ²
	250	{ + ₅ ⁸	{ + ₁ ²		400	9	4
	300	{ + ₄ ¹⁰	{ + ₁ ²		500	9	5
	350	8	4		600	9	6
	400	10	3				

хорошо просушен, быть чистым, мелкозернистым и без посторонних примесей. Песок необходимо хорошо утрясти путем постукивания по патрону деревянным стержнем и постепенно добавлять песок, пока патрон не будет наполнен доверху. Закупорка патрона должна быть плотной, исключающей возможность высыпания песка из патрона в любом его положении. Ни в коем случае не следует допускать к эксплуатации предохранители, плохо заполненные песком после их перезарядки: коммутационная способность таких предохранителей резко снижается и при пользовании ими возможны тяжелые аварии.

Патроны предохранителей без наполнителей также должны перезаряжаться тщательно, по инструкции завода-изготовителя и обязательно тоже только плавкими вставками заводского изготовления или выполненными

по его чертежам. И в этих случаях необходимо строго следить за обеспечением возможно более надежного контакта между плавкими вставками и контактными шайбами (или ножами).

Не следует допускать зарядку патронов медными проволоками взамен заводских плавких вставок. Пограничный и номинальный токи такой вставки, как и вся защитная характеристика предохранителя, в этом случае имеют значения крайне неопределенные, зависящие от ряда факторов, иногда случайных. Проволока одного и того же диаметра может плавиться в разных патронах при совершенно различных значениях тока и с разной выдержкой времени. Кроме того, при таких кустарных вставках весьма вероятны местные перегревы, порча и даже разрывы патронов. Коммутационная способность таких предохранителей резко снижается. Они перестают быть калиброванными надежными защитными аппаратами, могут взрываться, привести к авариям и даже угрожать опасностью для жизни людей.

Никто не рискнет зарядить предохранитель высокого напряжения случайно взятой медной проволокой вместо заводской вставки и никому на ум не придет требовать, чтобы конструкция патрона такого предохранителя давала возможность быстрой перезарядки непосредственно на месте эксплуатации. В отношении же предохранителей в сетях до 1 000 в, к сожалению, укоренилось совершенно неверное представление, что для них такая «быстрая перезарядка» случайными проволоками непосредственно на месте эксплуатации терпима. Дело доходит даже до того, что некоторые эксплуатационники оценивают серии предохранителей не по качеству и стабильности их защитной характеристики, не по коммутационной способности, не по безопасности, надежности, долговечности патрона и не по технико-экономическим показателям, а почти исключительно по условиям их пригодности для «быстрой перезарядки». Между тем применение некалиброванных предохранителей в сетях до 1 000 в может привести к столь же тяжелым последствиям, как и в сетях высокого напряжения, а в сетях с заземленной нейтралью они, кроме того, еще представляют значительную опасность для жизни людей.

В настоящее время уже нет оснований относиться снисходительно к этому явлению. Надо добиваться строжайшего выполнения требований § I-1-30 ПУЭ, чтобы

применяемые в электроустановках аппараты защиты соответствовали ГОСТ или техническим условиям, утвержденным в установленном порядке. На них должны быть таблички с техническими данными, предусмотренными этими ГОСТ или техническими условиями. Эксплуатация должна вестись таким образом, чтобы сгоревшие предохранители могли быстро заменяться заранее подготовленными запасными предохранителями. А перезарядка патронов должна производиться только калиброванными плавкими вставками в условиях мастерских, строго по инструкции завода и с должным контролем.

ВЫБОР ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

13. Требования правил устройства электроустановок

Ниже поясняются основные требования ПУЭ [Л. 1] к устройству защиты плавкими предохранителями электрических сетей в установках до 1 000 в. Требования излагаются в той же последовательности, в которой они приведены в ПУЭ. В необходимых местах в скобках приведены ссылки на номера соответствующих параграфов этих правил.

1. Предохранители пробочного типа должны включаться в сеть таким образом, чтобы при вывинченной пробке винтовая гильза предохранителя оставалась без напряжения. Для этого защищаемый (отходящий) проводник должен быть присоединен к винтовой гильзе (§ III-1-4).

Края винтовой гильзы легко доступны для прикосновения в момент ввинчивания и отвинчивания пробки. Менять пробки со сгоревшими плавкими вставками часто приходится при недостаточном освещении, нашупывая гнездо рукой. Часто эту операцию приходится выполнять из неустойчивого положения на высоте, а в жилых домах это к тому же часто делают необученные люди. Если винтовая гильза при этом будет находиться под напряжением, то прикосновение к ней в неблагоприятных условиях грозит поражением электрическим током, а в других случаях — опасным испугом и падением с высоты. Поэтому подводящий энергию проводник, остающийся под напряжением и после перегорания плавкой вставки, обязательно должен быть присоединен только

к контактному винту, расположенному на дне гнезда, где случайное соприкосновение с ним практически невозможно, а к винтовой гильзе должен присоединяться проводник, отходящий к электроприемнику (например, к лампе).

По этим же причинам ни в коем случае не следует допускать применения вместо стандартных предохранителей всякого рода проволочек. Это опасно не только потому, что нестандартная плавкая вставка может не защитить установку от воспламенения изоляции проводников, но и потому, что при поисках пробки со сгоревшей вставкой иногда ошибочно вывинчивают соседнюю пробку, в которой оставшаяся в гнезде проволочка передает напряжение на винтовую гильзу, создавая опасность поражения людей током.

2. На корпусах предохранителей или на схеме, которая должна вывешиваться вблизи места их установки, должны иметься надписи, указывающие номинальный ток требуемой плавкой вставки (§ III-1-5).

Патроны разборных предохранителей обычно допускают возможность встройки плавких вставок на разный номинальный ток. По остаткам сгоревшей плавкой вставки не всегда можно узнать, каков был ее номинальный ток. Не исключено также, что в процессе эксплуатации в патрон была встроена случайная вставка или просто «жучок» (некалиброванная вставка, проволока).

При ревизии предохранителя или смене сгоревших плавких вставок необходимо знать, какие номинальные токи плавких вставок предусмотрены проектом (допустимы для защищаемой линии). Эти данные проще и легче всего указать для каждой защищаемой линии на схеме, которая должна быть помещена, например, на внутренней стороне дверцы щитка или на видном месте перед щитом подстанции.

При этом, разумеется, сделанные на схеме надписи, указывающие номера групп или назначение защищаемых линий, должны в точности соответствовать тем же номерам или надписям, которые нанесены у соответствующих аппаратов на самом распределительном устройстве.

В квартирах, где щитки с плавкими предохранителями часто установлены не в ящиках, схема с надписями может скоро прийти в негодность. Поэтому здесь лучше всего указать требуемые номинальные токи плавких

вставок надписями масляной краской на корпусах самих предохранителей.

3. Электрические сети должны иметь защиту от токов к. з. с минимальным временем отключения и обеспечением по возможности требования селективности (§ III-1-6).

Во всех случаях надо стремиться к тому, чтобы токи к. з. отключались аппаратом защиты без выдержки времени. Это уменьшает размеры повреждений, снижает опасность возгорания изоляции и возможных пожаров и снижает вероятность прожига металлических труб, в которых проложены провода, что особенно опасно в цехах со взрывоопасной средой.

Однако токи к. з. действуют не только на предохранители, ближайшие к месту повреждения, но и на все другие предохранители, установленные в той же цепи ближе к источнику питания. Если при этом у всех этих предохранителей мгновенно сгорали бы плавкие вставки, то это неизбежно приводило бы к остановке большого числа электроприемников. Это всегда связано со значительными убытками, с простоем оборудования, с расстройством технологического процесса и значительными неудобствами эксплуатации, поскольку отыскать место повреждения в таких условиях трудно. В некоторых случаях такое массовое отключение электроприемников может быть само по себе опасно, так как оно может грозить, например, взрывом технологических аппаратов или образованием в них «козлов».

Отсюда возникает необходимость создания селективной (избирательной) системы защиты, при которой плавкие вставки ближайших к месту повреждения предохранителей отключают настолько быстро, что вставки предохранителей, расположенных ближе к источнику питания, не успевают расплавиться и остаются включенными. А это обычно связано с неизбежной необходимостью иметь у предохранителей разных ступеней защиты различные выдержки времени отключения тока к. з., тем больше, чем ближе предохранитель к источнику питания.

Таким образом, требование минимального времени отключения тока к. з. на практике может вступить в противоречие с требованием выдержки времени для осуществления селективного действия защиты. Кроме того, селективная система защиты может в некоторых случаях потребовать повышения номинальных токов плавких

вставок и соответствующего увеличения сечений проводников.

Поэтому правила не требуют, чтобы отключение токов к. з. во всех случаях происходило обязательно мгновенно (без выдержки времени), так же как они не предписывают во всех случаях обязательно добиваться селективности. Они обязывают добиваться лишь минимального, т. е. наименьшего возможного времени отключения и лишь по возможности удовлетворения требований селективности. Надо по характеру рассматриваемой установки определять, что в данном случае важнее: добиваться наибольшей быстроты отключения токов к. з., пренебрегая вероятными редкими неселективными отключениями, но зато лучше защищая установку от повреждений дугой и от прожига труб, или же, наоборот, добиваться селективности действия защиты, допуская для этого выдержки времени при отключении токов к. з. Во всех случаях эти выдержки должны быть по возможности минимальными.

4. Защита должна обеспечивать отключение аварийного участка при двух- и трехфазных, а в сетях с глухозаземленной нейтралью также при однофазных коротких замыканиях в конце защищаемой линии (§ III-1-6).

Не все уделяют должное внимание тому факту, что во многих случаях в сетях до 1 000 в токи к. з. могут оказаться чрезмерно малыми, недостаточными для приведения в действие аппарата защиты. Это может иметь место как при многофазных замыканиях в конце длинных линий, так и при однофазных замыканиях на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью в линиях обычной длины, поскольку активное и индуктивное сопротивления петли фаза-нуль могут оказаться большими. Так, например, от длинных магистралей в цеховых сетях или от магистралей, проложенных вдоль улиц поселков для электрификации домов, мощность отбирается на всем протяжении и по мере приближения к концу линии передаваемый ток все более и более снижается. Поэтому несмотря на то, что в нормальном режиме потери напряжения в такой линии могут быть и не велики, ток к. з. в конце может оказаться недостаточным для расплавления больших плавких вставок, выбранных по условиям загрузки первого участка линии.

Во всех подобных случаях, когда токи к. з. оказываются малыми, долго не отключаемая дуга может произ-

вести значительные повреждения оборудования и прожиг труб. А в сетях с глоухо заземленной нейтралью долго не отключаемое замыкание на заземленный корпус, как это уже отмечалось выше, кроме того, еще повышает опасность поражения людей электрическим током. Поэтому правила и предписывают строить защиту таким образом, чтобы она надежно действовала при коротких замыканиях в конце защищаемой линии.

Добиваться этого следует путем приближения источника питания к центру нагрузки, выбора соответствующей схемы распределения энергии, встройки в рассечку вышеупомянутых длинных магистралей плавких предохранителей на меньший номинальный ток, способных достаточно быстро реагировать на ток к. з. в конце линии, и т. д. Лишь в крайних случаях для достижения этой цели можно прибегать к увеличению сечений защищаемых проводников.

5. При одно-, двух- и трехфазных коротких замыканиях в конце линии ток повреждения по крайней мере в 3 раза должен превышать номинальный ток плавких вставок, защищающих эту линию (§ III-1-6).

Значительные выдержки времени, как это указывалось выше в § 11, необходимы для исключения возможности необоснованных и к тому же частых перерывов в электроснабжении при перегрузках, свойственных условиям нормальной эксплуатации, или даже при перегрузках случайных, но кратковременных, проходящих. Но такие выдержки времени, как правило, вредны в тех случаях, когда необходимо отключать токи повреждений. Последние должны отключаться возможно быстрее для избежания больших повреждений в установке и снижения опасности поражения людей током. Примирить эти два противоположных требования можно только в тех случаях, где токи повреждений настолько велики, что выдержки времени сами по себе оказываются малыми. Однако требовать, чтобы при коротких замыканиях в конце любой линии сети токи были столь велики, не целесообразно, во-первых, потому, что такие сети практически трудно или даже невозможно выполнить и, во-вторых, потому, что в этих случаях токи к. з. в головных участках сети оказались бы чрезмерно большими. Поэтому, чтобы необоснованно не удорожать установки, правила и ограничиваются требованием, чтобы токи повреждений были по меньшей мере в 3 раза больше

номинальных токов, защищающих линию плавких вставок.

Правила не требуют проверки выполнения этого требования, если соблюдаются условия, изложенные ниже в п. 8.

6. По характеру требований к устройству защиты ПУЭ делят электрические сети в установках до 1 000 в на две группы:

сети, в которых обязательна только защита, автоматически отключающая установку при коротких замыканиях; защита от перегрузок не обязательна (§ III-1-7);

сети, в которых обязательно должны быть предусмотрены и защита от коротких замыканий и защита от перегрузок (§ III-1-9).

Такое деление основано на следующих соображениях.

Совершенно исключить вероятность аварийных замыканий невозможно ни при каких условиях. Задерживать отключение таких замыканий лишено смысла, так как это может привести только к разрушению значительных частей установки и к выводу ее надолго из строя. Поэтому правила и предписывают во всех без исключения случаях предусматривать защиту, автоматически отключающую установку при коротких замыканиях.

Иначе обстоит дело с перегрузками. Они тоже могут принести очень большой вред. Даже при относительно небольших перегрузках, как мы это видели выше, изоляция перегревается, сохнет и более или менее быстро стартится, после чего и при нормальной нагрузке тоже могут часто возникать короткие замыкания, перерывы в питании и длительные простоя. Тем не менее к немедленному выходу установки из строя перегрузки все же не приводят. Кроме того, появление перегрузок во многих случаях крайне мало вероятно. Проводники ответвлений к одиночным электроприемникам не могут перегружаться там, где сами электроприемники защищены от перегрузок своими аппаратами управления (например, магнитными пускателями), а проводники главных питающих линий не могут перегружаться там, где имеется квалифицированный обслуживающий персонал, который не допустит присоединения к ним чрезмерно большого числа электроприемников. Единственная реальная возможность перегрузок проводников в таких случаях— это неполные короткие замыкания. Но место неполного замыкания обычно быстро перегревается и неполное

замыкание переходит в полное короткое замыкание, приводящее к отключению соответствующих аппаратов раньше, чем испортится изоляция всей линии.

Поэтому, несмотря на опасность и большой вред длительных перегрузок, в правилах нет требований ставить такую защиту во всех без исключения случаях. В них имеется лишь перечень случаев, где такая защита обязательна. Тем не менее, учитывая, что защита от перегрузок всегда повышает степень надежности и долговечности установки и что ПУЭ не запрещают добиваться такой защиты также в других случаях, на практике всегда стремятся такую защиту иметь, особенно если это не приводит к необходимости заметного повышения капитальных затрат.

7. Номинальные токи плавких вставок предохранителей, служащих для защиты отдельных участков сети, во всех случаях следует выбирать по возможности минимальными по расчетным токам этих участков сети или номинальным токам электроприемников, но таким образом, чтобы они не отключали электроустановку при пусковых токах и пиках технологических нагрузок (§ III-1-7 и III-1-10).

В ПУЭ указываются наибольшие допустимые соотношения между номинальными токами плавких вставок и длительно допустимыми нагрузками проводников защищаемой линии (см. ниже п. 8). Здесь подчеркивается, что эти соотношения нельзя рассматривать как допускаемые правилами в любых вообще случаях. Они являются **предельно допустимыми**. Их ни в коем случае нельзя превышать, а допускать их можно только в тех случаях, где это продиктовано необходимостью. Вообще же во всех случаях следует выбирать возможно меньшие плавкие вставки, такие, какие необходимы и достаточны для обеспечения бесперебойной работы. Выбрать такие плавкие вставки можно, руководствуясь указаниями, приведенными ниже в § 14. Пользоваться для этой цели заранее заготовленными таблицами, в которых против каждого сечения проводников указана допустимая по нормам наибольшая величина плавкой вставки, не рекомендуется: надо выбирать не наибольшую допустимую по нормам, а наименьшую допустимую по условиям бесперебойности работы.

8. В сетях, защищаемых только от токов короткого замыкания (для которых защита от перегрузки не обя-

зательна), допускается не проверять, выполняется ли указанное выше в п. 5 требование кратности тока к. з., если номинальный ток выбранных плавких вставок $I_{\text{в}}$ не превышает длительно допустимую нагрузку защищаемых проводников $I_{\text{пр}}$ более чем в 3 раза (§ III-1-7):

$$I_{\text{в}}: I_{\text{пр}} \leq 3. \quad (12)$$

Из этого указания правил вытекает, что в сетях, где обязательна защита только от токов к. з., можно для защиты проводников выбирать сколь угодно большие плавкие вставки, лишь бы расчетом было доказано, что при любом виде короткого замыкания в конце защищаемой линии ток будет превышать номинальный ток плавкой вставки не менее чем в 3 раза. И только в тех случаях, где проверка расчетом кратности тока к. з. не выполняется, правила не разрешают применять плавкие вставки большие, чем трехкратные.

Тем не менее допускать применение более чем трехкратных вставок даже при выполнении расчетной проверки тока к. з. не следует, так как это существенно ухудшило бы условия защиты, а трехкратные вставки практически достаточны для обеспечения бесперебойности работы при любых перегрузках, естественных для условий нормальной эксплуатации.

Из сказанного не следует делать вывод, что плавкие вставки трехкратной величины можно в этих сетях ставить не задумываясь, в любом случае. Всегда необходимо выполнять основное требование правил, чтобы плавкие вставки выбирались по возможности минимальными (см. выше п. 7).

9. Защита от перегрузок, в дополнение к защите от токов к. з., обязательна в следующих случаях (§ III-1-9):

для всех видов сетей внутри помещений, выполненных открыто проложенными незащищенными изолированными проводниками с горючей оболочкой;

для осветительных сетей, независимо от типа примененных проводников и способа их прокладки: в жилых и общественных зданиях; в торговых помещениях; в служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий; в сетях для бытовых и переносных электроприемников (утюгов, чайников, плиток, комнатных ходильников, пылесосов, стиральных и швейных машин

и т. п.); в пожароопасных производственных помещениях;

для силовых сетей (независимо от типа примененных проводников и способа их прокладки) в промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях и во взрывоопасных помещениях классов В-Іб и В-Іг (ПУЭ § VII-3-65) только в случаях, когда по условиям технологического процесса или режима работы сети может возникать длительная перегрузка проводов и кабелей;

для всех видов сетей во взрывоопасных помещениях всех классов, кроме В-Іб и В-Іг, независимо от условий технологического процесса, режима работы сети, типа примененных проводников и способа их прокладки.

10. В сетях, для которых обязательна не только защита от токов к. з., но и защита от перегрузок, величина плавких вставок должна выбираться как обычно — наименьшей допустимой по условиям бесперебойности работы (см. выше п. 7). А сечения проводников должны выбираться таким образом, чтобы их длительно допустимая нагрузка $I_{\text{пр}}$, во-первых, не была меньше расчетного тока сети и, во-вторых, чтобы в сравнении с номинальным током выбранных для защиты плавких вставок ($I_{\text{в}}$) она не была меньше нижеуказанных величин (§ III-1-10):

для сетей, выполненных проводниками с резиновой и аналогичной ей по тепловым характеристикам изоляцией, в невзрывоопасных производственных помещениях промышленных предприятий, а также во взрывоопасных помещениях и наружных установках классов В-Іб и В-Іг (§ VII-3-65)

$$I_{\text{пр}} : I_{\text{в}} \approx 1; \quad (13)$$

для сетей выполненных проводниками с резиновой и аналогичной ей изоляцией, во всех остальных случаях (во взрывоопасных помещениях классов В-І, В-Іа, В-ІІ, В-ІІа, в жилых и общественных зданиях и т. д.)

$$I_{\text{пр}} : I_{\text{в}} \approx 1,25; \quad (14)$$

для сетей, выполненных кабелями с бумажной изоляцией, независимо от условий среды, назначения помещения и сети

$$I_{\text{пр}} : I_{\text{в}} \approx 1. \quad (13)$$

Очевидно, что для линий с одинаковым режимом работы (т. е. с одинаковыми расчетными токами и одинаковыми по величине и длительности кратковременными перегрузками) наименьшие допустимые плавкие вставки будут одинаковыми независимо от того, проложены ли линии в установке, где обязательна только защита от токов к. з., или в установке, где обязательна также и защита от перегрузок. Увеличивать плавкую вставку сверх необходимого минимума правила не разрешают, а уменьшать ее нельзя потому, что меньшая вставка не обеспечит требуемой надежности и бесперебойности работы (она будет плавиться). В этих условиях, когда величина плавких вставок фактически задана режимом работы, требуемая защита от перегрузок может быть обеспечена только путем подбора проводников определенных сечений: проводники меньших сечений будут защищены выбранными вставками только от токов к. з., а проводники больших сечений будут ими защищаться также и от коротких замыканий.

Выше, при сопоставлении защитных характеристик (рис. 13), отмечалось, что плавкие предохранители с номинальным током, равным длительно допустимой нагрузке проводников, защищают их вполне удовлетворительно только при перегрузках, превышающих ток провода в 2 и более раз. Поэтому правила требуют, чтобы в особо ответственных случаях соблюдалось соотношение (14), т. е. чтобы длительно допустимая нагрузка проводников превышала номинальный ток вставки примерно в 1,25 раза. В менее ответственных случаях и где, кроме того, имеется квалифицированный персонал, учитывая, что перегрузки до двухкратной величины обычно не являются следствием аварии и без ведома персонала не могут появиться, правила разрешают ограничиваться выбором проводников по соотношению (13), т. е. чтобы допустимый ток провода был примерно равен номинальному току плавкой вставки. По такому же соотношению правила, разрешают выбирать сечения кабелей с бумажной изоляцией во всех случаях, потому что эти кабели более устойчивы к малым перегрузкам и снабжены надежными оболочками.

11. Исключение из вышеуказанных требований защиты сетей от перегрузок допускается правилами для ответвлений к короткозамкнутым двигателям во взрывоопасных помещениях всех классов. Учитывая, что не-

аварийная перегрузка таких ответвлений практически невозможна, правила разрешают (§ VII-3-63) ограничиваться выбором для них проводников с длительно допустимой нагрузкой, не менее 125% номинального тока двигателя, а плавкие вставки выбирать, как обычно — наименьшие допустимые (см. п. 7). Иначе говоря, для таких ответвлений соблюдение соотношений (13), (14), не обязательно.

12. Учитывая изложенное выше в п. 6—10, приходим к выводу, что выбор сечений проводников, удовлетворяющих требованиям правил как по условиям нагрева, так и по условиям защиты, сводится к следующему:

а) по данным режима работы линии (ее расчетного тока и ожидаемых кратковременных перегрузок), руководствуясь приведенными в § 14 практическими указаниями, с учетом требований селективности определяется номинальный ток наименьшей плавкой вставки, пригодной для защиты рассматриваемой линии — I_b ;

б) в зависимости от характера установки и типа выбранных проводников, руководствуясь приведенными выше данными, определяют, какому из соотношений — (12), (13) или (14) — должны удовлетворять выбираемые проводники по условиям защиты; из этого соотношения, зная величину I_b , находят, чему должна быть равна длительно допустимая нагрузка искомых проводников I_{pr} , чтобы они удовлетворяли требованиям защиты;

в) из таблиц, приведенных в гл. I-3 ПУЭ, выбирается проводник такого сечения, длительно допустимая нагрузка которого удовлетворяет следующим двумя требованиям:

во-первых, она ни в коем случае не должна быть меньше расчетного тока линии, что требуется для удовлетворения нормальных условий нагрева;

во-вторых, она должна быть примерно равна найденной выше величине I_{pr} , что требуется по условиям защиты;

если в упомянутых таблицах ПУЭ нет проводника с длительно допустимой нагрузкой, точно равной найденной выше величине I_{pr} , правила (§ III-1-10А) разрешают выбирать проводник ближайшего меньшего сечения, если его длительно допустимая нагрузка не меньше расчетного тока линии.

Само собой разумеется, что в необходимых случаях сечения проводников, выбранных в соответствии с выше-

указанным, должны быть проверены еще и по ряду других условий — по допустимой потере напряжения, по условиям механической прочности (при больших расстояниях между опорами), по динамической устойчивости к пику тока к. з., пропускаемому плавким предохранителем (см. приложение 4), и др. Рассмотрение этих условий в нашу задачу не входит.

14. Практические указания по выбору плавких вставок

Из сказанного выше о защитных характеристиках очевидно, что плавкий предохранитель не реагирует на то, какое сечение (большое или малое) имеет проводник отходящей от него линии. Предохранитель одинаково сгорит и при толстом, и при тонком проводнике, если в линии имеют место нагрузки чрезмерной для него величины, длительности и частоты. Поэтому при выборе предохранителя и плавкой вставки необходимо считаться только с режимом работы установки.

Когда же выбирают сечение проводников, нужно исходить из того, что величина плавкой вставки предохранителя задана режимом работы установки и изменению не подлежит даже в том случае, когда согласно правилам для такого предохранителя требуется несколько завысить сечение провода.

Наименьшая плавкая вставка, способная при данном режиме работы длительно обеспечивать бесперебойную эксплуатацию, должна удовлетворять трем указанным ниже условиям. Если одному из этих условий отвечает вставка одной величины, а другому условию — вставка большая, надо выбирать большую.

Условие 1. Предохранитель в условиях нормальной эксплуатации не должен перегреваться сверх допустимых для него температур. Для этого необходимо выбрать предохранитель с таким патроном и такой плавкой вставкой, у которых номинальные токи равны или немнога больше расчетного тока линии.

Условие 2. Предохранитель не должен отключать линию при перегрузках, свойственных нормальной эксплуатации, например при пусковых токах. Для этого необходимо выбрать плавкую вставку, которая при этих токах не нагревалась бы чрезмерно, так как это влечет за собой окисление поверхности вставки, быстрое ее старение, постепенное ослабление контактов и ложные отключе-

ния. Практикой установлено приближенное правило, согласно которому длительная спокойная, без ложных отключений эксплуатация плавкого предохранителя возможна в том случае, если пусковые токи I_p не превышают примерно половины тока срабатывания I_{cp} вставки, $I_p \approx 0,5 I_{cp}$.

Ток срабатывания определяется по защитной характеристике. Например, известно, что пик нагрузки или пусковой ток длится немногим более 1 сек. Тогда из рис. 10 или 11 для предохранителей серии ПН2 находим, что ток, способный расплавить вставку за 1 сек, приблизительно в 5 раз больше номинального тока вставки, $I_{cp} \approx 5I_b$. Отсюда на основании указанного правила получаем $I_p \approx 0,5 I_{cp} \approx 0,5 \cdot 5 I_b \approx 2,5 I_b$. Иначе говоря, в этих случаях ток вставки должен быть примерно равен $I_b \approx \frac{I_p}{2,5}$. Аналогично нетрудно установить, что при длительности пика нагрузки, например, 3,5 сек $I_b \approx \frac{I_p}{2}$; для длительности примерно 20 сек (время разгона некоторых центрифуг и тому подобных механизмов) $I_b \approx \frac{I_p}{2,5}$ и т. д.

В широкой практике, когда не располагают ни точным знанием длительности разгона или графиком работы установки, ни точной защитной характеристикой предохранителя, принято руководствоваться следующим:

а) для защиты ответвлений к одиночным двигателям при небольшой частоте и длительности пусков, как, например, у металлообрабатывающих станков и подобных механизмов (легкие условия пуска),

$$I_b \approx \frac{I_p}{2,5}, \quad (15)$$

а при большой частоте пусков или при большой их длительности, как например, у двигателей кранов и других механизмов повторно-кратковременного режима работы или у таких механизмов, как центрифуги, которые очень медленно набирают скорость (средние или тяжелые условия пуска),

$$I_b \approx \frac{I_p}{(1,6 \div 2,0)}; \quad (16)$$

б) для защиты линий, питающих более одного двигателя, если известен расчетный ток линии I_p и пусковой ток I_n того двигателя, у которого он больше других,

$$I_b \approx \frac{I_p + I_n}{2,5}. \quad (17)$$

Плавкие вставки, выбранные по уравнениям (15) — (17), в подавляющем большинстве случаев обладают большим запасом прочности. Например, номинальный ток двигателя $I_{de} = 20 \text{ а}$, его пусковой ток $I_n = 100 \text{ а}$, тогда плавкая вставка $I_b = 100 : 2,5 = 40 \text{ а}$. Во время пуска вставка будет нести перегрузку, превышающую ее номинальный ток в $100 : 40 = 2,5$ раза. Из рис. 10 или 11 видно, что при такой перегрузке вставка могла бы расплавиться примерно за 1 мин (60 сек). Это примерно в 40 раз больше, чем обычная длительность пускового тока у двигателей металлообрабатывающих станков (1,5 сек). Грубо приближенно можно подсчитать добавочное превышение нагрева плавкой вставки во время пуска такой длительности по уравнению (6). Если приравнять τ_y температуре плавления медной вставки (по табл. 9 оно равно 1083°C), T — времени плавления при данной перегрузке, т. е. 60 сек, и t — фактической длительности этой перегрузки (1,5 сек), то добавочное превышение нагрева окажется равным примерно

$$\tau_t \approx \frac{1,5}{60} \cdot 1083 \approx 27^\circ\text{C}.$$

Это, конечно, очень малая величина для медной вставки, не могущая сколько-нибудь заметно ускорить ее окисление и порчу. Фактически на время пуска могут быть допущены значительно большие добавочные нагревы. Поэтому расчеты по (15) — (17) носят только приближенный характер: ток вставки приблизительно должен быть равен пусковому току или пику нагрузки, поделенному на 2,5. На практике можно без ущерба для надежности работы выбирать и несколько меньшую вставку. Поэтому лишены оснований встречающиеся иногда рекомендации о выборе плавкой вставки по уравнению более сложному, претендующему на большую точность, чем уравнение (17).

Условие 3. Предохранитель должен отключать линию при появлении опасных для нее токов к. з. в минимальное время, но по возможности селективно, т. е. чтобы в первую очередь отключалось дефектное ответвление,

а основная неповрежденная линия оставалась в работе. Для этого необходимо, чтобы при одинаковом токе к. з. фактическое время отключения большего предохранителя ($t_{\Phi,б}$), защищающего основную линию, было больше фактического времени отключения меньшего предохранителя ($t_{\Phi,м}$), защищающего ответвление. Как это указывалось в § 11 (рис. 11), фактическое время отключения большего предохранителя в крайнем случае может оказаться на 50% меньше, чем время, показанное на его защитной характеристике ($t_{x,б}$), т. е. $t_{\Phi,б}=0,5 t_{x,б}$, а фактическое время отключения меньшего предохранителя в другом крайнем случае может, наоборот, оказаться больше на 50%, т. е. $t_{\Phi,м}=1,5 t_{x,м}$. Следовательно, в случае совпадения этих крайних обстоятельств необходимо, чтобы

$$t_{\Phi,б} > t_{\Phi,м}$$

или

$$0,5t_{x,б} > 1,5t_{x,м},$$

т. е.

$$t_{x,б} > 3t_{x,м}.$$

Таким образом, для получения безусловной селективности необходимо, чтобы время отключения, определенное по защитной характеристике большего предохранителя, превышало более чем в 3 раза время отключения по характеристике меньшего предохранителя.

Пример 10. Ответвление от основной линии к двигателю защищено плавкой вставкой с номинальным током 30 а, и известно, что наибольшее возможное значение тока к. з. в этом ответвлении равно 1 000 а. Определить, какая наименьшая плавкая вставка может быть применена для защиты основной линии по условиям селективности.

Решение. Из характеристики предохранителя 30 а на рис. 11 видно, что его среднее время отключения при токе 1 000 а равно примерно 0,01 сек ($t_{x,м}=0,01$ сек). Следовательно, для безусловного соблюдения селективности необходимо, чтобы большая плавкая вставка, защищающая основную линию, отключала ток 1 000 а за время не менее $3t_{x,м}$, т. е. не менее 0,03 сек. Из тех же характеристик видно, что этому требованию удовлетворяют все плавкие вставки с номинальным током 80 а и более.

На основании сказанного можно для предохранителей серии ПН2 по характеристикам рис. 10 и 11 вывести более удобные для практического пользования соотношения, указанные в табл. 14. Эти соотношения вы-

Таблица 14

$I_{k,3} : I_{v,m}$	10	20	50	100	150 и более
Номинальный ток меньшей плавкой вставки предохранителя ПН2, $I_{v,m}$, а	Номинальный ток большей плавкой вставки предохранителя ПН2, требующейся для обеспечения селективности в особо ответственных случаях, $I_{v,b}$, а				
30	50	60	120	150	200
40	60	80	120	200	200
50	80	100	120	250	250
60	100	120	150	250	250
80	120	120	200	250	250
100	120	120—150	250	250	250
120	150	200	300	300	300
150	200	250	300	300	300
200	250	300	400	400	400
250	300	400	600	Более 600	Более 600
300	400	500	Более 600	—	—
400	600	Более 600	—	—	—

числены в зависимости от отношения тока к. з. ($I_{k,3}$) к номинальному току меньшей плавкой вставки ($I_{v,m}$) и показывают, какую величину большей плавкой вставки ($I_{v,b}$) надо выбрать, чтобы обеспечить условие селективности.

Необходимо иметь в виду, что данные табл. 14 выведены для наибольших возможных отступлений от типовых характеристик и для маловероятных случаев совпадения наихудших сочетаний этих отступлений (фактическое время отключения у большего предохранителя отклонилось от типовой характеристики на максимально возможную величину вниз, а для меньшего предохранителя, наоборот, вверх). Поэтому пользоваться этими соотношениями нужно лишь в особо ответственных случаях.

В обычной практике достаточная степень надежности получается, если исходить не из максимальных, а из средних возможных отступлений от типовых характеристик при наихудшем возможном сочетании этих отступлений (для большего предохранителя время отключения равно времени по типовой характеристике минус 25%, а для меньшего — плюс 25%).

Необходимые для этих случаев соотношения указаны в табл. 15.

Таблица 15

$I_{\text{в.з}} : I_{\text{в.м}}$	10	20	50	100 и более
Номинальный ток меньшей плавкой вставки предохранителя ПН2, $I_{\text{в.м}}, \text{а}$	Номинальный ток большей плавкой вставки предохранителя ПН2, достаточной для обеспечения селективности в серьезных случаях практики, $I_{\text{в.б}}, \text{а}$			
30	40	50	80	120
40	50	60	100	120
50	60	80	120	120
60	80	100	120	120
80	100	120	120	150
100	120	120	150	150
120	150	150	250	250
150	200	200	250	250
200	250	250	300	300
250	300	300	400	Более 600
300	400	400	Более 600	—
400	500	Более 600	—	—

15. Защита, осуществляемая плавкими предохранителями

Для оценки качества защиты, осуществляемой плавкими предохранителями, рассмотрим несколько примеров защиты линии из трех проводников с резиновой изоляцией и алюминиевыми жилами сечением по 4 мм^2 , обладающими малой постоянной времени нагревания $T=0,8 \cdot 3 \approx 2,5 \text{ мин}=150 \text{ сек}$ (приложение 1). Такие проводники при перегрузках и коротких замыканиях за время действия защиты успевают нагреваться до более высоких температур и потому находятся в более трудных условиях, чем проводники толстых сечений. Длительно допустимое по ПУЭ превышение нагрева этих проводов $\tau_{\text{у.н}}=40^\circ \text{ С}$, а максимально допустимое превышение нагрева за время действия защиты при коротком замыкании $\tau_{\text{ж.м}}=150^\circ \text{ С}$ (см. табл. 7).

Вариант 1. Номинальный ток плавкой вставки равен длительно допустимой нагрузке провода по нормам $I_{\text{в}}=I_{\text{пр}}$. Если при коротком замыкании $I_{\text{к.з}}:I_{\text{в}}=I_{\text{к.з}}:I_{\text{пр}}=200$, время отключения (по рис. 10) $t \approx 0,007 \text{ сек}$. По уравнению (4) находим $\tau_y=40 \cdot 200^2$; следовательно, добавочное превышение нагрева провода за время короткого замыкания по уравнению (6) равно:

$$\tau_t = \frac{0,007}{150} 40 \cdot 200^2 \approx 75^\circ \text{ С}.$$

Аналогично для других значений $I_{\text{к.з}} : I_{\text{пр}}$ находим результаты, сведенные в табл. 16, причем в тех случаях, где при малых нагрузках отношение $t : T$ велико, подсчеты велись не по уравнению (6), а по (5), пользуясь данными приложения 2.

Если бы мы имели линию с проводниками не столь малого сечения, а имеющими постоянную времени нагревания, равную, например, $T = 0,85 \cdot 27,5 \approx 23,5 \text{ мин} = 1400 \text{ сек}$ (соответствует 70 мм^2 , см. приложение 1), то

Таблица 16

$I_{\text{к.з}} : I_{\text{в}} = I_{\text{к.з}} : I_{\text{пр}}$	200	100	50	20	10	5	3	2	1,6
Время отключения по рис. 10 $t, \text{ сек}$	0,007	0,008	0,01	0,017	0,05	1,0	15	150	1 200
Возможное превышение нагрева провода $\tau_t, ^\circ\text{C}$	75	21	6,7	1,8	1,3	6,7	36	101 (16)	103 (56)

превышение нагрева было бы значительно меньше, а при 2 и 1,6-кратной перегрузке оно достигло бы величин, указанных в скобках в табл. 16.

Данные табл. 16 подтверждают сказанное в § 11 при рассмотрении защитных характеристик предохранителей, что проводники нагреваются больше всего за время, необходимое для отключения предохранителем перегрузок, превышающих номинальный ток вставки в 1,6—2 раза. При этом подавляющее большинство проводников оказывается в достаточной мере хорошо защищенными. Их добавочные превышения нагрева невелики. Исключение составляют проводники очень малых сечений. Они имеют заметно повышенные превышения нагрева в зоне перегрузок от 1,6 до 2-кратных значений. Однако и это превышение составляет не более 70% величины, допускаемой по ПУЭ.

Вариант 2. Номинальный ток плавкой вставки равен расчетному току линии $I_{\text{в}} = I_{\text{p}}$, а длительно допустимая нагрузка проводов на 25% больше расчетного тока, $I_{\text{пр}} = 1,25I_{\text{в}} = 1,25I_{\text{p}}$. Это соответствует указанному выше соотношению (14), предписываемому правилами для защиты некоторых видов сетей от перегрузок. Очевидно, что в этих случаях наибольшие превышения нагрева не будут превышать значений, указанных в табл. 17, и проводники всех сечений оказываются хорошо защищенными.

Таблица 17

$I_{к.з}:I_в$	2	1,6
$I_{к.з}:I_{пр}$	1,6	1,45
Время отключения (по рис. 10) $t, \text{ сек}$	150	1 200
Возможное превышение нагрева проводка $\tau_t, ^\circ\text{C}$	65 (11)	84 (47)

Вариант 3. Номинальный ток плавкой вставки превышает длительно допустимую нагрузку провода в 3 раза $I_в=3I_{пр}$. Это соответствует указанному выше соотношению (12), допускаемому правилами в сетях, защищаемых только от токов к. з., если это необходимо для избежания ложно-аварийных отключений при пусковых токах, пиках технологических нагрузок, при самозапуске установок и т. п. случаях. Из расчетов, аналогичных вышеуказанным, находим, что в этом случае за время отключения предохранителем перегрузок разной величины могут иметь место превышения нагрева, указанные в табл. 18.

Таблица 18

$I_{к.з}:I_в$	100	50	20	10	5	3	2	1,6	1,0
$I_{к.з}:I_{пр}$	300	150	60	30	15	9	6	4,8	3,0
Время отключения (по рис. 10) $t, \text{ сек}$	0,008	0,01	0,017	0,05	1,0	15	150	1 200	∞
Возможное превышение нагрева проводка $\tau_t, ^\circ\text{C}$	192	60	16	12	60	325 (32)	910 (144)	920 (500)	360 (360)

Очевидно, что в этих случаях достигается удовлетворительная защита проводов только от коротких замыканий и притом только в том случае, если ток к. з. превышает не менее чем в 4—5 раз номинальный ток плавкой вставки или, что то же, превышает не менее чем в 12—15 раз длительно допустимую нагрузку провода. При значениях токов к. з. меньше указанных, а также и при чрезмерно больших его значениях ($I_{к.з}>150I_{пр}$, что практически мало вероятно) перегревы проводников намного превышают предельно допустимые значения. В этих случаях имеет место, вероятно, не только быстрое старение и порча резиновой изоляции, но и не исключается возможность ее воспламенения. Это особенно актуально для разветвленных сетей с заземленнойней.

тралью, где токи однофазного замыкания на землю, превышающие номинальный ток провода не более чем в 6—10 раз, весьма вероятны. Кроме того, из табл. 18 видно, что в этих случаях 6—9-кратные токи провода при однофазных замыканиях на землю отключаются с недопустимо большой выдержкой времени (150—15 сек), создающей опасность для жизни людей, соприкасающихся с корпусами электрооборудования, так как при такой кратности тока в заземленном нулевом проводе напряжение прикосновения может оказаться большим.

По этим причинам надо во всех случаях строжайше добиваться выполнения упомянутых выше в § III-1-7, указаний ПУЭ, предписывающих во всех случаях выбирать номинальные токи плавких вставок «по возможности минимальными». Допускаемое этими правилами загrubление защиты до $I_{\text{в}} = 3I_{\text{пр}}$ следует применять лишь в крайних случаях, когда в этом есть безусловная необходимость, в таких местах, где воспламенение изоляции не грозит пожаром, и только для проводников, проложенных в трубах или снабженных негорючими оболочками.

16. Примеры выбора плавких вставок предохранителей и сечений проводников

Пример 11. Имеется группа двигателей типа АО (т. е. в закрытом обдуваемом исполнении), с к. з. ротором, 380 в, со скоростью вращения 1460 об/мин. Номинальная мощность (P_n), номинальный ток (I_n), кратность пускового тока (k) для каждого из двигателей заимствованы из каталога и указаны в табл. 19. Необходимо выбрать соответствующие требованиям ПУЭ плавкие вставки для защиты проводников ответвлений, пытающих эти двигатели.

Решение. Определяем пусковой ток каждого двигателя $I_n = kI_n$. На основе знакомства с технологией и условиями работы приводных механизмов, руководствуясь сказанным выше в § 14, определяем для каждого из них условия пуска. Требуемые по ПУЭ величины наименьших плавких вставок, способных обеспечить длительную бесперебойную работу в этих условиях, определяем:

для двигателей с легкими условиями пуска (нечастые пуски, длительность пуска не велика) — из уравнения (15);

для двигателей со средними условиями пуска (более частые пуски или пуски более длительные) — из уравнения (16) с коэффициентом, равным 2 в знаменателе;

для двигателей с тяжелыми условиями пуска (весьма частые пуски или пуски большой длительности) — из уравнения (16) с коэффициентом, равным 1,6 в знаменателе.

Учитывая сказанное в § 14 о приближенном характере расчетов по уравнениям (15) и (16), мы округляем полученные результаты

до ближайших (не обязательно больших) величин стандартных плавких вставок. Результаты расчетов записаны в табл. 19.

Таким образом мы выбрали плавкие вставки, удовлетворяющие условию 2 § 14. Нетрудно видеть, что эти вставки удовлетворяют и условию 1: номинальный ток вставок больше номинального тока двигателя; следовательно, в условиях нормальной эксплуатации, при длительной нагрузке током двигателя, предохранители не будут нагреваться чрезмерно. По условию 3 (селективность) проверять

Таблица 19

Номер двигателя	Номинальная мощность, P_n , квт	Номинальный ток, I_n , а	Кратность пускового тока $I_p : I_n$	Пусковой ток, I_p , а	Условия пуска	Номинальный ток требуемых плавких вставок, I_b , а
1	28	54	7,0	378	Легкие	150
2	28	54	7,0	378	Средние	200
3	14	27,5	7,0	192	Легкие	80
4	14	27,5	7,0	192	Средние	100
5	10	20,0	6,5	130	Легкие	50
6	10	20,0	6,5	130	Тяжелые	80
7	7	14,3	6,5	94	Легкие	40
8	7	14,3	6,5	94	Тяжелые	60
Итого	$P_y = 118$	231,6	—	1 588	—	—

эти плавкие вставки нет необходимости: по ходу электроэнергии от источника питания к электроприемнику они являются последней ступенью защиты и могут, не нарушая селективность, отключать токи повреждений сколь угодно быстро.

Следовательно, указанные в табл. 19 плавкие вставки являются наименьшими, надежно обеспечивающими бесперебойную работу и удовлетворяющими требованиям ПУЭ. Очевидно, что именно такие плавкие вставки для защиты проводников ответвлений к этим двигателям надо ставить всегда, независимо от того, каково назначение помещения, в котором устанавливаются двигатели и прокладываются провода, каковы условия среды и каков общий характер производства, в процессе которого эти двигатели участвуют.

Пример 12. Предположим, что все двигатели, указанные в табл. 19, получают питание радиальными ответвлениями от одного силового распределительного пункта № 1 (СП1). Подвод питания от ближайшей подстанции к СП1 осуществляется одной линией. Из расчетов нагрузок известно, что коэффициент спроса рассматриваемой группы электроприемников равен $K_c = 0,55$ при средневзвешенном значении коэффициента мощности $\cos \Phi = 0,5$. Надо выбрать плавкие вставки для устанавливаемых на щите подстанции предохранителей, защиты этой линии.

Решение. Прежде всего определяем расчетную мощность, передаваемую рассматриваемой линией к СП1:

$$P_p = K_c P_y = 0,55 \cdot 118 = 65 \text{ квт.}$$

Затем определяем расчетный ток линии:

$$I_p = \frac{65 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,5} = 197 \text{ а.}$$

Следовательно, по условию 1 (§ 14) необходимо, чтобы номинальные токи патронов предохранителей и плавких вставок были по крайней мере не меньше 200 а.

Проверим, какие плавкие вставки необходимы по условию 2 § 14. В условиях нормальной эксплуатации нет оснований считаться с вероятностью точного совпадения пуска двух и более двигателей, так как, во-первых, время пуска ничтожно мало в сравнении с периодами длительной работы и, во-вторых, запасы устойчивости выбираемых плавких вставок при кратковременных перегрузках, как это отмечалось в § 14, достаточно велики. Поэтому номинальный ток наименьших плавких вставок, способных обеспечить бесперебойную работу в условиях нормальных перегрузок рассматриваемой линии, определяем из уравнения (17), принимая во внимание пусковой ток I_p одного, наибольшего двигателя:

$$I_v = \frac{I_p + I_n}{2,5} = \frac{197 + 378}{2,5} = 230 \text{ а.}$$

Следовательно, условию 2 § 14 в данном случае могли бы удовлетворить стандартные плавкие вставки с номинальным током 250 а.

Осталось проверить, какие наименьшие плавкие вставки для защиты линии, питающей СП1, могут удовлетворить условию 3 § 14 (селективности), если известно, что наибольшее возможное действующее значение тока короткого замыкания в линиях, отходящих от СП1, не превышает 8 000 а (эта величина может быть найдена по кривым § 2-26 [Л. 5], если известно, что на подстанции установлен трансформатор 1 000 ква, а расстояние до СП1 составляет 80 м). Этот ток к. з. превышает номинальный ток самых больших плавких вставок на СП1 в $8000 : 200 = 40$ раз. Зная эту величину ($I_{k.z} : I_{v.m} = 40$), мы по табл. 15 находим, что на подстанции необходимо поставить плавкие вставки с номинальным током по крайней мере 300 а, если мы хотим, чтобы при тяжелом коротком замыкании в линии, питающей двигатель № 2 (табл. 19), плавкие вставки 200 а на СП1 успевали сгореть и отключать ток раньше, чем начнут плавиться плавкие вставки в начале линии, питающей этот силовой пункт. Это необходимо, чтобы обеспечить бесперебойную работу остальных двигателей, присоединенных к СП1.

Таким образом мы окончательно выяснили, что условию 1 могли бы удовлетворить плавкие вставки с номинальным током 200 а, условию 2 — с током 250 а, условию 3 — с током 300 а. Так как рассматриваемая группа двигателей признана ответственной и обеспечение достаточной бесперебойности ее работы необходимо, мы окончательно решаем, что на подстанции для защиты рассматриваемой линии необходимо поставить предохранители ПН2 с патроном 600 а и плавкими вставками 300 а.

Пример 13. Определить, какие необходимы плавкие вставки на подстанции для защиты линии, рассмотренной в примере 12, питающей СП1, если имеется дополнительное требование обеспечить возможность самозапуска трех двигателей: № 1, 2 и 4.

Решение. Когда в питающей сети исчезает напряжение, магнитные пускатели и контакторы осуществляют так называемую нулевую защиту, т. е. они отпадают и отключают двигатели от сети, а при появлении напряжения пуск этих двигателей возможен лишь после нажатия кнопки. Нулевая защита необходима, чтобы исключить возможность несчастных случаев при неожиданных пусках двигателей после длительного перерыва в электроснабжении. Однако в современных установках обычно предусматривается быстрое автоматическое восстановление питания путем автоматического повторного включения отключившейся линии (АПВ) или путем автоматического включения резервного питания (АВР). В этих случаях для особо ответственных механизмов предусматривается специальное устройство, осуществляющее выдержку времени: контакторы отпадут и осуществлят нулевую защиту, если напряжение не восстанавливается долго. Если же напряжение, например через 3—5 сек, восстанавливается, контакторы остаются включенными и двигатели «самозапускаются». Но в этих случаях можно считать, что пусковые токи всех самозапускающихся двигателей складываются. Все происходит так, как будто это пускается один большой двигатель, и плавкие вставки должны быть способны выдержать эту сумму токов, не расплавляясь. В рассматриваемом случае сумма пусковых токов двигателей № 1, 2 и 4 равна:

$$I_{\text{п}} = 378 + 378 + 192 = 948 \text{ а},$$

и тогда номинальный ток требуемых плавких вставок по уравнению (15)

$$I_{\text{в}} = 948 : 2,5 = 380 \text{ а},$$

т. е. для обеспечения возможности самозапуска этих двигателей на подстанции для защиты линии, питающей СП1, пришлось бы поставить стандартные плавкие вставки 400 а.

Пример 14. Определить необходимые сечения алюминиевых проводников, проложенных в водогазопроводных трубах, для питания каждого из двигателей, указанных в табл. 19. При этом рассмотреть два варианта:

а) двигатели и питающие их линии находятся в любом неизрывоопасном помещении, например в механическом цехе;

б) двигатели и питающие их линии находятся во взрывоопасном помещении, например класса В-IIa, где согласно ПУЭ § VII-3-40 [Л. 1] рассматриваемые типы двигателей в закрытом обдуваемом исполнении могут применяться.

Решение. Прежде всего устанавливаем, что ответвления к короткозамкнутым двигателям не относятся к упомянутым выше в § 13, п. 9 силовым сетям, в которых по условиям технологического процесса или режима работы сети может возникать длительная перегрузка. Следовательно, для прокладки в механическом цехе могут применяться проводники с такой длительно допустимой нагрузкой ($I_{\text{пр}}$), которая, во-первых, не меньше номинального тока двигателя ($I_{\text{п}}$) и, во-вторых, удовлетворяет соотношению (12), т. е.

$$I_{\text{пр}} \geq I_{\text{п}} \text{ и } I_{\text{пр}} \approx I_{\text{п}} : 3.$$

А для прокладки во взрывоопасном помещении В-IIa в соответствии со сказанными в § 13, п. 11

$$I_{\text{пр}} \geq 1,25 I_{\text{п}} \text{ и } I_{\text{пр}} \approx I_{\text{п}} : 3.$$

Величины длительно допустимых нагрузок для трех проводов с алюминиевыми жилами и с резиновой изоляцией, проложенных в газовой трубе, принимаем по данным ПУЭ табл. I-3-2 [Л. 1]. Выбранные сечения и результаты проверки указаны в табл. 20. Из рассмотрения этих данных видно, как существенно влияют на выбор сечения проводников условия среды в месте прокладки и увеличение номинального тока плавких вставок по условиям пуска. Так, например, для двигателя одного и того же типа (14 квт, 27,5 а) выбраны проводники $3 \times 4 \text{ mm}^2$ для прокладки в механическом цехе при легких условиях пуска, то же $3 \times 6 \text{ mm}^2$ при средних условиях пуска и $3 \times 10 \text{ mm}^2$ для прокладки во взрывоопасном помещении. Для проводников малых сечений разница в сечениях оказалась не столь заметной только ввиду случайного в данном примере соотношения величин $I_{\text{н}}=20 \text{ а}$ и $I_{\text{пр}}=19 \text{ а}$, а также потому, что проводники с алюминиевыми жилами сечением менее $2,5 \text{ mm}^2$ не применяются ввиду их малой механической прочности.

Таблица 20

№ двигателя по табл. 19	Номинальный ток двигателя $I_{\text{н}}, \text{ а}$	$1,25I_{\text{н}}$	Номинальный ток плавких вставок, защищающих от-вспышение, $I_{\text{в}}, \text{ а}$	$I_{\text{в}}:3$	Требуемые проводники с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией в водогазопроводной трубе для прокладки			
					в механическом цехе		во взрывоопасном помещении	
					Сечение, mm^2	Длительно допустимая нагрузка, $I_{\text{пр}} \geq I_{\text{н}}$; $I_{\text{пр}} \approx I_{\text{в}} : 3$	Сечение, mm^2	Длительно допустимая нагрузка, $I_{\text{пр}} \geq 1,25I_{\text{н}}$; $I_{\text{пр}} \approx I_{\text{в}} : 3$
1	54,0	68,0	150	50	3×16	60	3×25	80
2	54,0	68,0	200	67	3×16	60	3×25	80
3	27,5	34,5	80	27	3×4	28	3×10	47
4	27,5	34,5	100	33	3×6	32	3×10	47
5	20,0	25,0	50	17	3×4	28	3×4	28
6	20,0	25,0	80	27	3×4	28	3×4	28
7	14,3	18,0	40	13	$3 \times 2,5$	19	$3 \times 2,5$	19
8	14,3	18,0	60	20	$3 \times 2,5$	19	$3 \times 2,5$	19

Пример 15. Выбрать сечения проводников для рассмотренной в примере 12 линии, питающей СП1. Расчетный ток линии 197 а. Она защищена плавкими вставками с номинальным током 300 а.

Решение 1. Линия проложена в невзрывоопасном помещении. По условиям технологического процесса и режиму работы возможность длительной перегрузки этой линии признается мало вероятной, тем более что расчетный ток линии получился не на много меньше суммы номинальных токов всех присоединенных к ней двигателей. Следовательно, защита линии от перегрузок не обязательна. Для нее можно выбрать проводники, соблюдая следующие условия:

$$I_{\text{пр}} \geq I_{\text{п}} \geq 197 \text{ а} \quad \text{и} \quad I_{\text{пр}} \geq I_{\text{в}} : 3 \geq 100 \text{ а.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Постоянные времени нагревания некоторых типов проводов и кабелей с медными жилами T_m , мин

Сечение жилы, мм^2	Провода с резиновой изоляцией			Трехжильные кабели с бумажной изоляцией марок СВ, 1–3 кв при прокладке	
	одножильные, про-ложены открыто на опорах	проложены в одной трубе		в земле	в воздухе
		два провода	три провода		
4	2,4	2,5	3,0	4,0	6,0
6	3,0	4,0	4,75	6,25	7,2
10	4,2	6,75	7,5	9,5	8,4
16	5,6	9,3	11,0	13,7	10,8
25	7,2	13,0	15,7	19,5	12,0
35	9,0	15,7	19,5	24,0	14,4
50	12,0	19,0	23,5	28,3	18,0
70	15,0	22,0	27,5	33,0	21,6
95	18,4	26,3	32,0	37,5	26,4
120	21,4	29,5	35,8	42,0	30,0
150	24,4	33,5	41,0	47,0	34,7
185	—	—	—	—	40,0
240	—	—	—	—	45,0

П р и м е ч а н и е. Постоянная времени нагревания проводов и кабелей с алюминиевыми жилами T_a при одинаковом их сечении с медными жилами, при одинаковой конструкции изолирующих и защитных покровов и при одинаковом способе прокладки может быть принята для голых проводов 0,7, приближенно для изолированных проводов 0,85 и для кабелей 0,9 от постоянной времени нагревания T_m соответственных проводов и кабелей с медными жилами.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения величин $e^{-\frac{t}{T}}$ и $1-e^{-\frac{t}{T}}$ при разных значениях $\frac{t}{T}$

$\frac{t}{T}$	$e^{-\frac{t}{T}}$	$1-e^{-\frac{t}{T}}$	$\frac{t}{T}$	$e^{-\frac{t}{T}}$	$1-e^{-\frac{t}{T}}$
0,1	0,905	0,095	1,1	0,333	0,667
0,2	0,820	0,180	1,2	0,300	0,700
0,3	0,742	0,258	1,3	0,273	0,727
0,4	0,671	0,329	1,4	0,248	0,752
0,5	0,607	0,393	1,5	0,224	0,776
0,6	0,550	0,450	2,0	0,136	0,864
0,7	0,497	0,503	2,5	0,082	0,918
0,8	0,450	0,550	3,0	0,050	0,950
0,9	0,407	0,593	4,0	0,015	0,982
1,0	0,318	0,632	5,0	0,006	0,994

П р и м е ч а н и е. Для промежуточных значений $\frac{t}{T}$ соответствующие величины могут быть найдены интерполяцией.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Технические данные предохранителей ПР2

предохранитель	Номинальные токи, а плавких вставок	Наибольший отключаемый ток (действующее значение), а					Назначение	
		Исполнение 1		Исполнение 2				
		при напряжении, в						
		220	380	380	500			
15	6; 10; 15	1 200	800	8 000	7 000		Предназначены для работы в сетях постоянного и переменного тока	
60	15; 20; 25; 35; 60	5 500	1 800	4 500	3 500			
100	60; 80; 100	14 000	6 000	11 000	10 000			
200	100; 125; 160; 200	14 000	6 000	11 000	10 000		Номинальное напряжение у исполнения 1 — 220 в, а у исполнения 2 — 500 в	
350	200; 225; 260; 300; 350	11 600	6 000	13 000	11 000			
600	350; 430; 500; 600	15 000	13 000	23 000	20 000			

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Технические данные предохранителей 500 в переменного тока типов ПН2 и НПН

Тип предохранителя	Предохранитель, а	Номинальный ток		Наибольший отключаемый ток (действующее значение), а	При каком положении предохранителя
		Плавких вставок, а			
НПН-15 НПН-60	15 60	6; 10 15 20; 25; 35; 45; 60		— —	
Патроны разборные	ПН2-100 ПН2-250 ПН2-400 ПН2-600	100 250 400 600	30; 40; 50; 60; 80; 100 80; 100; 125; 150; 200; 250 200; 250; 300; 400 300; 400; 500; 600	50 000* 40 000*	При вертикальном и горизонтальном положении на стене или горизонтальном на потолке
				25 000 25 000	Только при вертикальном положении на стене

* Предохранители ПН2-100 и ПН2-250 являются токоограничивающими. Наибольшие мгновенные значения тока, пропускаемого этими предохранителями при коротком замыкании, не превышают 5 000 а. В таблице указаны действующие значения периодической составляющей тока к. з., которые имели бы место в цепях, где можно ставить эти предохранители, но если бы предохранителя не было.

Этим условиям удовлетворяют:

проводы с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией, сечением $3 \times 95 \text{ mm}^2$ ($I_{\text{пр}}=200 \text{ a}$) при прокладке в водогазопроводных трубах;

кабели до 3 кв с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией, сечением $3 \times 120 \text{ mm}^2$ ($I_{\text{пр}}=220 \text{ a}$) при прокладке в воздухе.

Решение 2. Силовой распределительный пункт СП1 установлен в изолированном помещении во взрывоопасном цехе класса В-IIa таким образом, что линии от подстанции к этому пункту вынуждены проложить внутри этого цеха. В этом случае в соответствии со сказанным в § 13, п. 12 линия должна быть защищена от перегрузок:

проводы с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией, проложенные в водопроводных трубах, должны допускать длительную нагрузку по соотношению (14):

$$I_{\text{пр}} = 1,25 I_{\text{в}} = 1,25 \cdot 300 = 375 \text{ a}$$

и для выполнения этой линии пришлось бы (см. ПУЭ, табл. I-3-2) взять на каждую фазу по два провода сечением по 95 mm^2 каждый, всего шесть проводов, и проложить их в двух трубах, по три провода (три фазы) в каждой трубе;

бронированные трехжильные кабели с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией для напряжений до 3 кв, проложенные в воздухе, в этом случае должны допускать длительную нагрузку по соотношению (13):

$$I_{\text{пр}} = I_{\text{в}} = 300 \text{ a},$$

чему, учитывая сказанное в § 13, п. 12в, удовлетворяет кабель $3 \times 185 \text{ mm}^2$, допускающий длительную нагрузку $I_{\text{пр}}=290 \text{ a}$ (см. ПУЭ, табл. I-3-14).

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), изд-во «Энергия», 1966.
 2. Кузнецов Р. С., Аппараты распределительных устройств низкого напряжения, Госэнергоиздат, 1962.
 3. Каминский Е. А., Предохранители низкого напряжения, «Рабочий энергетик», 1953, № 2.
 4. Лившиц Д. С., Выбор аппаратов защиты электросетей, «Энергетик», 1955, № 9.
 5. Справочник по электроустановкам промышленных предприятий, под общей ред. И. Е. Боричева и др., т. I, ч. 1 и 2, Госэнергоиздат, 1963.
-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Нагрев проводников	
1. Основные определения	5
2. Установившееся превышение нагрева проводника при длительной нагрузке	6
3. Изменение превышения нагрева проводника от нуля до установившейся величины при неизменной нагрузке	8
4. Изменение превышения нагрева проводника после отключения нагрузки	11
5. Изменение превышения нагрева проводника при переменной нагрузке	13
6. Старение изоляции	19
Плавкие предохранители	
7. Типы предохранителей	25
8. Пограничный ток, номинальный ток вставки и испытательные токи	29
9. Материал плавких вставок	30
10. Конструкция плавких вставок	32
11. Защитные характеристики	33
12. Перезарядка патронов предохранителей	42
Выбор плавких предохранителей	
13. Требования правил устройства электроустановок	46
14. Практические указания по выбору плавких вставок	57
15. Защита, осуществляемая плавкими предохранителями	62
16. Примеры выбора плавких вставок предохранителей и сечений проводников	65
Приложения	71

Цена 15 коп.