

Как правильно подобрать быстродействующий предохранитель

**Виталий Хаймин
Руслан Черкбашев**

fuse@bussfuse.ru

Силовая электроника, управляющая киловаттами и мегаваттами энергии, немаловажна без соответствующих мер защиты. Наряду со сложными автоматизированными системами в аппаратуре всегда имеется последний защитный барьер в виде предохранителей. От правильного выбора параметров предохранителя зависят затраты, которые понесет потребитель при последующем ремонте.

При замене сгоревшего предохранителя вопрос корректного подбора не стоит, так как в паспорте оборудования указан конкретный код производителя. В данной статье будет рассмотрен случай, когда при разработке нового оборудования, комплектации силовых шкафов требуется выбрать быстродействующие предохранители, исходя из параметров системы, усло-

вий эксплуатации, особых требований и т. д. Причем наиболее подробно будет обсуждено определение основных параметров, влияющих на подбор предохранителей, — значений номинального напряжения, номинального тока и др.

Определение значения номинального напряжения

Номинальное напряжение предохранителя — это рабочее напряжение переменного или постоянного тока. Чтобы правильно защитить любую систему, номинальное напряжение предохранителя должно быть не меньше напряжения в системе. По требованиям МЭК (Международная электротехническая комиссия) переменное напряжение при тестировании предохранителей должно соответствовать 110% номинального напряжения с коэффициентом мощности 10–20%. По североамериканским стандартам (UL) достаточно, чтобы все предохранители тестировались при их номинальном напряжении с коэффициентом мощности 15–20%. Поэтому на большинстве продуктов BUSSMANN указаны два номинальных напряжения (рис. 1).

Если два предохранителя устанавливаются последовательно, то каждый из них должен быть рассчитан на максимально возможное напряжение в цепи. Заявленные значения переменного номинального напряжения предохранителей BUSSMANN действительны при частотах 45–1000 Гц. Процесс прерывания на более низких частотах аналогичен процессам в цепи постоянного тока. При частоте ниже 45 Гц необходимо внести поправку к номинальному напряжению в соответствии с графиком, представленным на рис. 2.

Определение значения номинального тока предохранителя

Номинальный ток предохранителя — это среднеквадратичное значение тока, которое предохранитель способен пропускать продолжительное время без ухудшения его свойств и выхода температуры за допустимые пределы (рис. 3).

Для корректной работы предохранителя необходимо правильно подобрать значение номинального тока. Оно зависит как от параметров защищаемой цепи, так и от многих внешних факторов. При повышенной температуре окружающей среды номинальный ток предохранителя следует увеличить, а при низких температурах или при принудительном охлаждении потоком воздуха — понизить. Также на это значение влияют частота тока, плотность тока в контактной площадке, атмосферное давление (при высотах выше



Рис. 1. Указание номинального напряжения предохранителя по стандарту МЭК и стандарту UL



Рис. 2. Определение поправки к номинальному напряжению предохранителя при частоте ниже 45 Гц



Рис. 3. Указание номинального тока предохранителя

2000 м над уровнем моря), а также длительность и частота воздействия токов перегрузки. Все эти параметры связаны с номинальным током предохранителя следующей формулой:

$$I_n = I_b / (K_t \times K_e \times K_v \times K_f \times K_a \times K_b),$$

где I_n — номинальный ток предохранителя; I_b — среднеквадратичный максимальный ток нагрузки в цепи, действующий в течение длительного времени; K_t — коэффициент температуры воздуха; K_e — коэффициент контактной плотности тока; K_v — коэффициент воздушного потока; K_f — коэффициент частоты тока; K_a — коэффициент высоты над уровнем моря; K_b — постоянная (const) нагрузки предохранителя.

В технической документации Bussmann номинальный ток предохранителей определен для температуры окружающей среды, равной 20 °С. Однако в реальных условиях эксплуатации температура может отличаться от этого значения. Повышение температуры среды, например в условиях закрытого монтажа или в случае близости теплонагруженных элементов, вызывает необходимость выбора предохранителя большего номинала, так как для плавления перемычки потребуется выделение меньшего количества тепла. И наоборот, понижение температуры окружающей среды требует использования предохранителя с меньшим номинальным током. График определения поправочного коэффициента в зависимости от температуры окружающей среды для типичного быстродействующего предохранителя приведен на рис. 4.

Таким образом, если температура окружающего воздуха составляет около 60 °С, то при токе в цепи 100 А нужно использовать предохранитель $100A/0,8 = 125 A$. Для оценки влияния воздуха используются различные эмпирические формулы и зависимости. При принудительном воздушном охлаждении предохранителей при

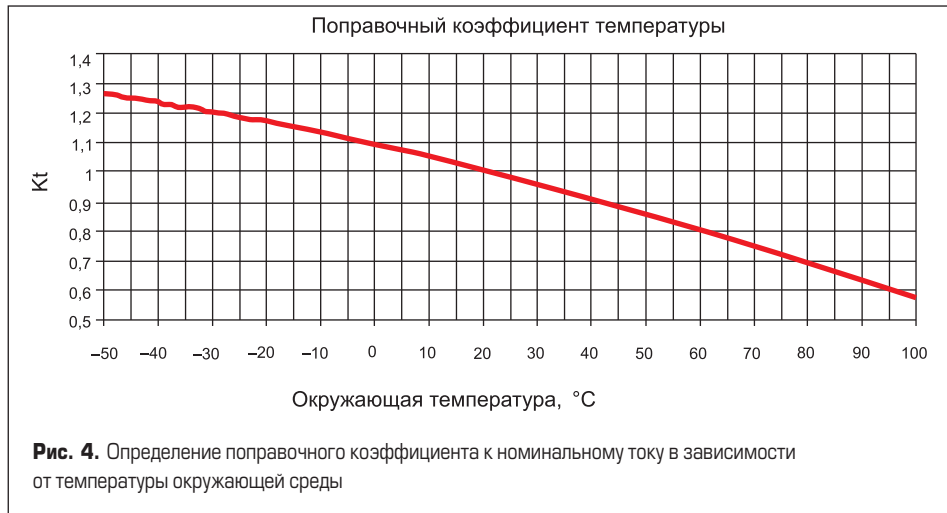


Рис. 4. Определение поправочного коэффициента к номинальному току в зависимости от температуры окружающей среды

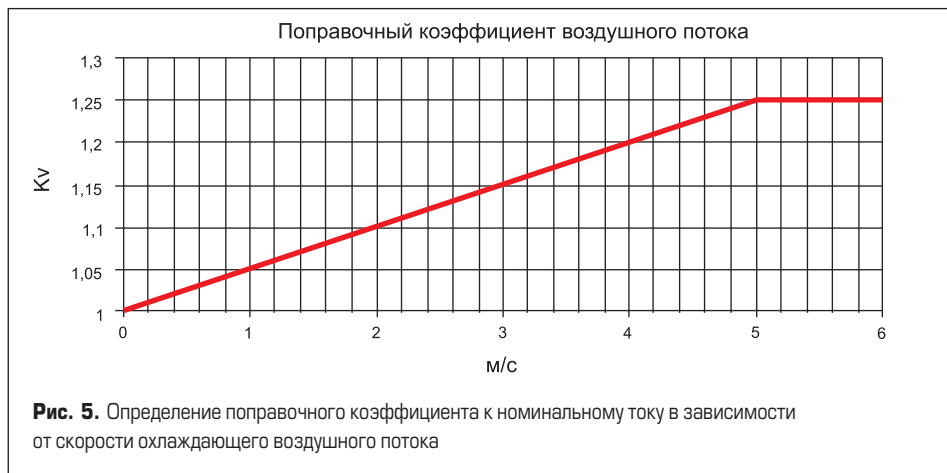


Рис. 5. Определение поправочного коэффициента к номинальному току в зависимости от скорости охлаждающего воздушного потока

скорости потока 2–10 м/с допустимо использовать предохранитель меньшего номинала.

Из графика на рис. 5 видно, что уже при воздушном потоке со скоростью 2 м/с для цепи с максимальным током 1100 А следует использовать предохранитель с номинальным током 1000 А. Следует учесть, что скорость воздушного потока должна браться непосредственно у корпуса предохранителя, а не у крыльчатки вентилятора.

Высокое быстродействие предохранителей достигается повышением плотности тока в перешейках плавких элементов, что вызывает сильный нагрев корпуса предохранителя. Следовательно, сечение и длина токоведущих

шин оказывают большое влияние на характеристики предохранителя. Около 70% выделяемого в предохранителе тепла отводится через токоподводящие шины. Поэтому увеличение их сечения может обеспечить рост номинального тока на несколько процентов. По рекомендациям специалистов компании Bussmann, плотность тока в токоподводящих шинах должна составлять 1,3 А/мм² (по стандарту МЭК 60269, часть 4, плотность тока может быть в диапазоне 1–1,6 А/мм²). Если фактическая плотность тока в шинах больше этого значения, то следует повысить номинал предохранителя, используя для расчета коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рис. 6.

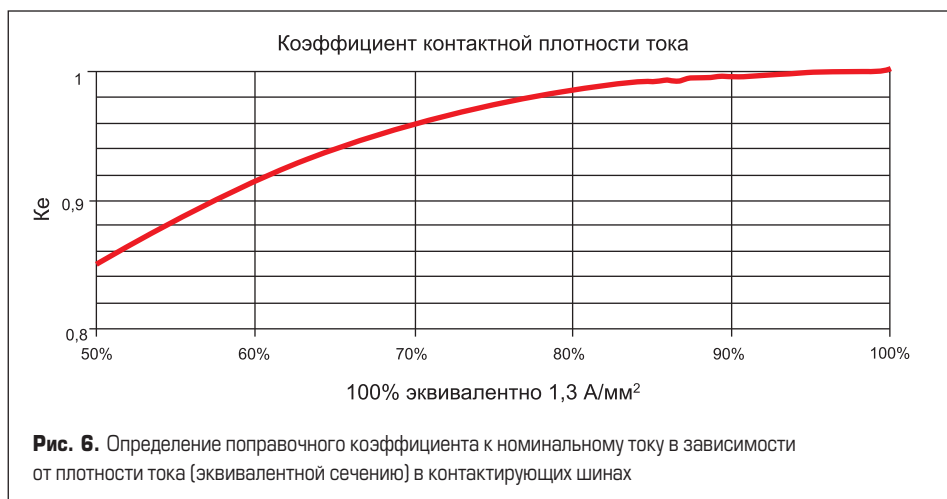
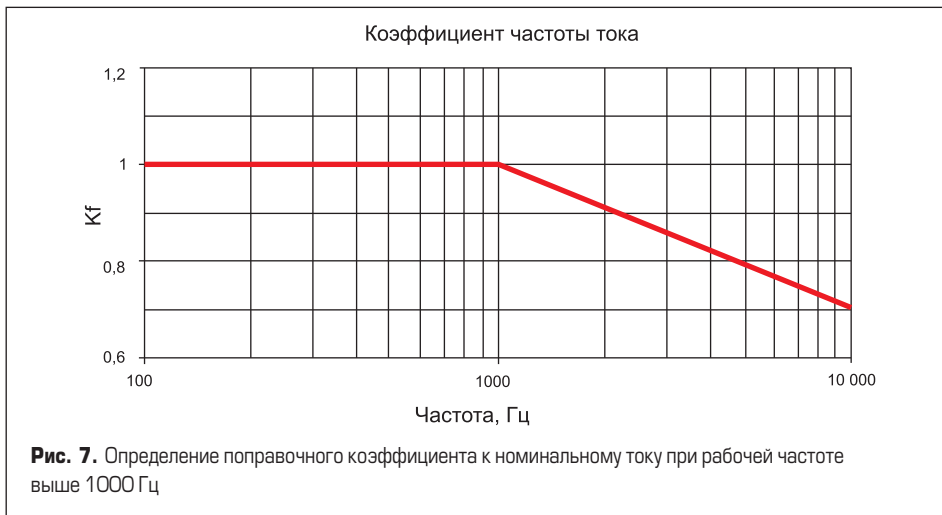


Рис. 6. Определение поправочного коэффициента к номинальному току в зависимости от плотности тока (эквивалентной сечению) в контактирующих шинах



Например, прямоугольный предохранитель на 200 А установлен на шине с сечением 100 мм². Плотность тока при этом равна 200/100 = 2 А/мм². Чтобы удовлетворить требованию 1,3 А/мм², рекомендуемое сечение шины должно быть 200/1,3 = 154 мм². Фактический размер шины составляет 100/154 = 65% от рекомендуемого значения. Определив по графику коэффициент K_e , получаем номинальный ток предохранителя 200/0,94 = 213 А.

Если обе подключаемые шины не одинаковы, то коэффициент K_e можно рассчитать по формуле:

$$K_e = (K_{e1} + K_{e2}) / 2.$$

Предохранители, работающие в высокочастотных цепях, требуют особого внимания. В таких условиях их токопроводящие способности могут быть понижены вследствие воз-

никновения скин-эффекта и эффекта близости на токопроводящих элементах предохранителя. Скин-эффект выражается в увеличении плотности тока от центра к поверхности проводника. Это связано с явлением вытеснения тока в проводнике под действием собственного магнитного поля. Эффект близости выражается в смещении плотности тока из-за действия тока в расположенных рядом проводниках. Оба этих индукционных эффекта создают неравномерное распределение тока по сечению проводника, что приводит к повышенному выделению тепла. Для их учета вводится поправочный коэффициент частоты тока K_f , определяемый по графику, представленному на рис. 7.

Из графика видно, что при токе 100 А с частотой 10 кГц нужно использовать предохранитель на 100/0,7 = 143 А.

Когда предохранители применяются, например, в горах, то из-за снижения плотности атмосферы ухудшается конвекционное охлаждение. Поэтому на высотах более 2000 м над уровнем моря применяется коэффициент высоты над уровнем моря, вычисляемый по формуле:

$$K_a = (1 - (h - 2000)/20\,000),$$

где h — высота в метрах над уровнем моря.

Так, на высоте 5000 м в цепи с током 85 А следует использовать предохранитель на 85/(1 - (5000 - 2000)/20 000) = 100 А.

Постоянная (const) нагрузки предохранителя K_b определяется из технического описания предохранителя. Она зависит от материала корпуса предохранителя. Так, для фарфоровых предохранителей ее значение равно 1, а для корпуса из стекловолкна — 0,8.

Влияние перегрузок

Максимальный ток I_{max} , которому может подвергаться предохранитель, зависит от длительности и частоты импульсов перегрузки. По длительности перегрузки делятся на две категории:

- перегрузки длительностью более 1 с;
- перегрузки длительностью менее 1 с.

В таблице приведены основные рекомендации по определению максимально допустимого тока перегрузок I_{max} .

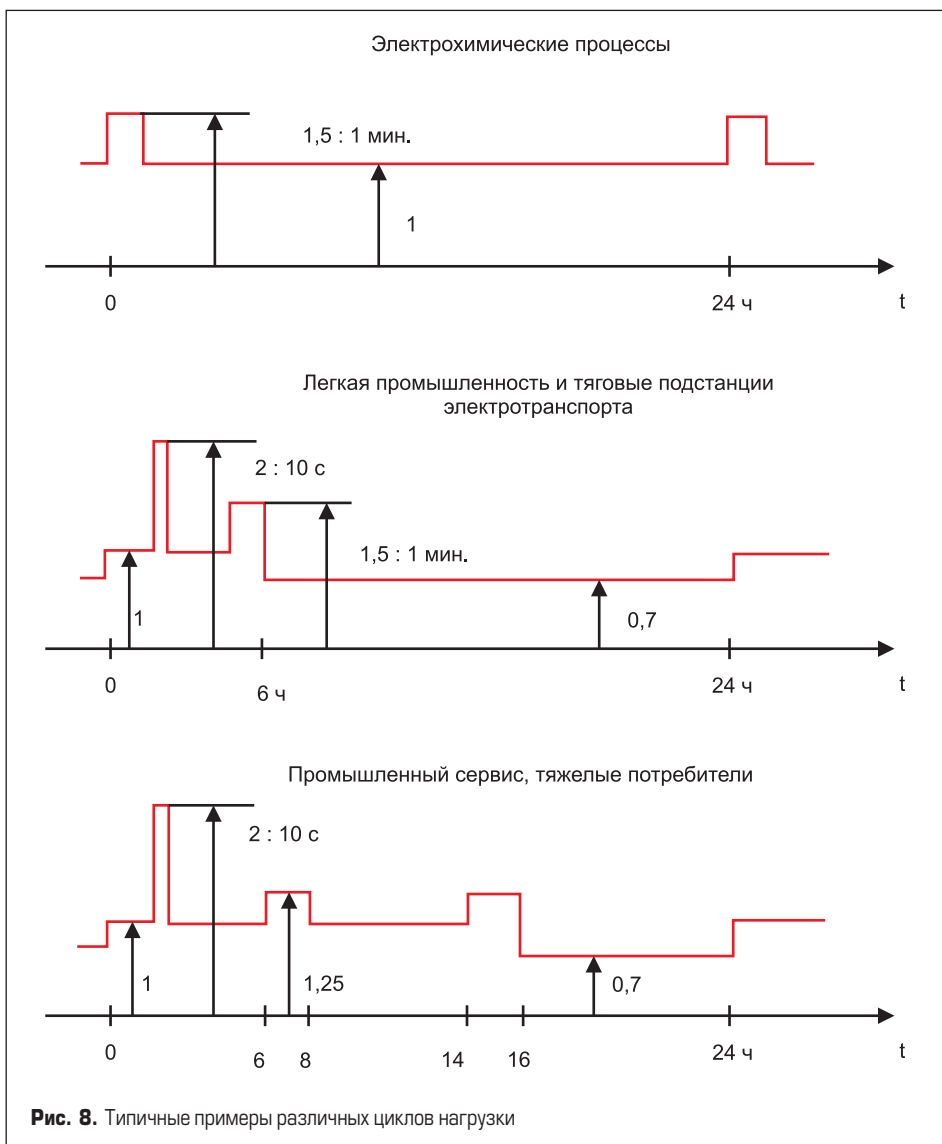
Ток плавления берется из время-токовой характеристики предохранителя. Типичные примеры циклов нагрузки, включая токи перегрузки, приведены на рис. 8.

Возьмем, для примера, предохранитель на 200 А, который 3–5 раз в день подвергается перегрузкам 300 А, каждая из которых длится по 5 с. Для данного типа предохранителя по время-токовой кривой находим, что ток

Таблица. Определение максимально допустимого тока перегрузок I_{max}

Частота случаев	Перегрузки (>1 с)	Импульсные нагрузки (<1 с)
Меньше одного раза в месяц	$I_{max} < 80\% \times I_f$	$I_{max} < 70\% \times I_f$
Меньше двух раз в неделю	$I_{max} < 70\% \times I_f$	$I_{max} < 60\% \times I_f$
Несколько раз в день	$I_{max} < 60\% \times I_f$	$I_{max} < 50\% \times I_f$

Примечания: I_{max} — максимальный ток перегрузки в цепи; I_f — ток плавления, соответствующий времени t длительности перегрузки.



плавления I_p , соответствующий времени длительности перегрузок 5 с, будет равняться 600 А. По таблице определяем, что для данного типа предохранителя максимальный возможный ток перегрузки равен $60\% \times 600 = 360$ А.

Значит, этот предохранитель может выдерживать временные перегрузки до 360 А. Таким образом, выбранный плавкий предохранитель на 200 А, подвергающийся перегрузкам в 300 А в течение 5 с 3–5 раз в день, будет работать правильно.

Циклические нагрузки

Циклическая нагрузка, приводящая к преждевременной усталости предохранителей, определяется регулярными и нерегулярными изменениями тока нагрузки. При этом параметры тока должны достигать величин, приводящих к деформации плавких элементов предохранителя. Для того чтобы избежать этого, при выборе предохранителя закладывается определенный запас прочности. Так как общее правило для всех ситуаций установить невозможно, используется добавочный коэффициент G , определяемый эмпирически. В большинстве случаев достаточным является следующее значение коэффициента $G = 1,6$.

После того как предохранитель был выбран, необходимо провести проверку для определения достаточности запаса прочности в условиях периодической импульсной нагрузки. Для этого нужно определить ток плавления I_t по время-токовой характеристике предохранителя. В качестве аргумента берется длительность одного импульса из цикла. Далее следует по графику (рис. 9) найти коэффициент циклических пульсаций B . Здесь в качестве аргумента используется период импульсов T .

Чтобы предохранитель надежно выполнял свои функции, допустимое значение тока импульса должно быть менее произведения тока плавления I_t и коэффициента B :

$$I_{pulse} < I_t \times B.$$

Рассмотрим пример. Существует следующая циклическая нагрузка: 150 А в течение 2 мин с последующим изменением на 100 А в течение 15 мин (рис. 10).

Рассчитываем действующее значение тока в цепи I_{rms} :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(150^2 \times 2) + (100^2 \times 15)}{17}} \approx 107 \text{ Arms}.$$

Предполагая, что нет ухудшающих параметров, считаем коэффициент G равным 1,6. Получаем

$$I_n > I_{rms} \times G = 107 \times 1,6 = 171 \text{ А}.$$

По первой оценке предохранитель на 200 А в этом случае достаточен. Проверим теперь запас прочности на B -фактор. Длительность импульса (рис. 10) равна 120 с. По время-токовой характеристике (рис. 11) определяем ток плавления I_t для 120 с. Он равен 440 А.

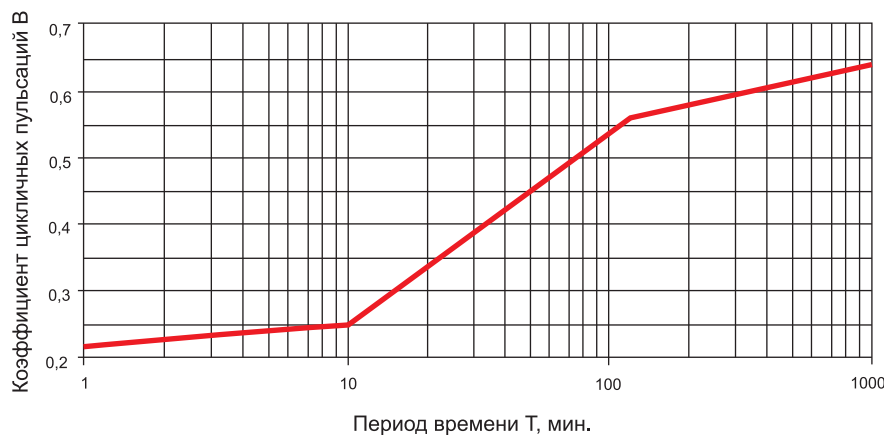


Рис. 9. Определение коэффициента циклических пульсаций В в зависимости от периода цикла импульсов

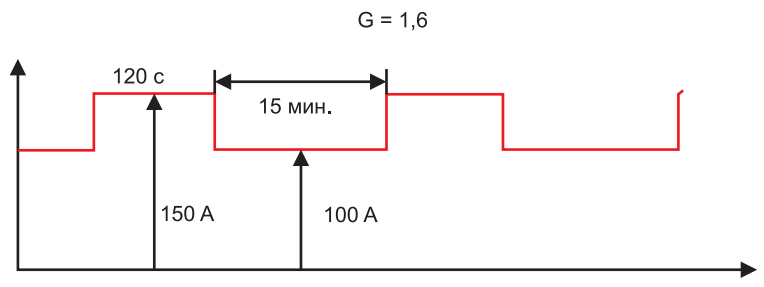


Рис. 10. Пример циклической нагрузки

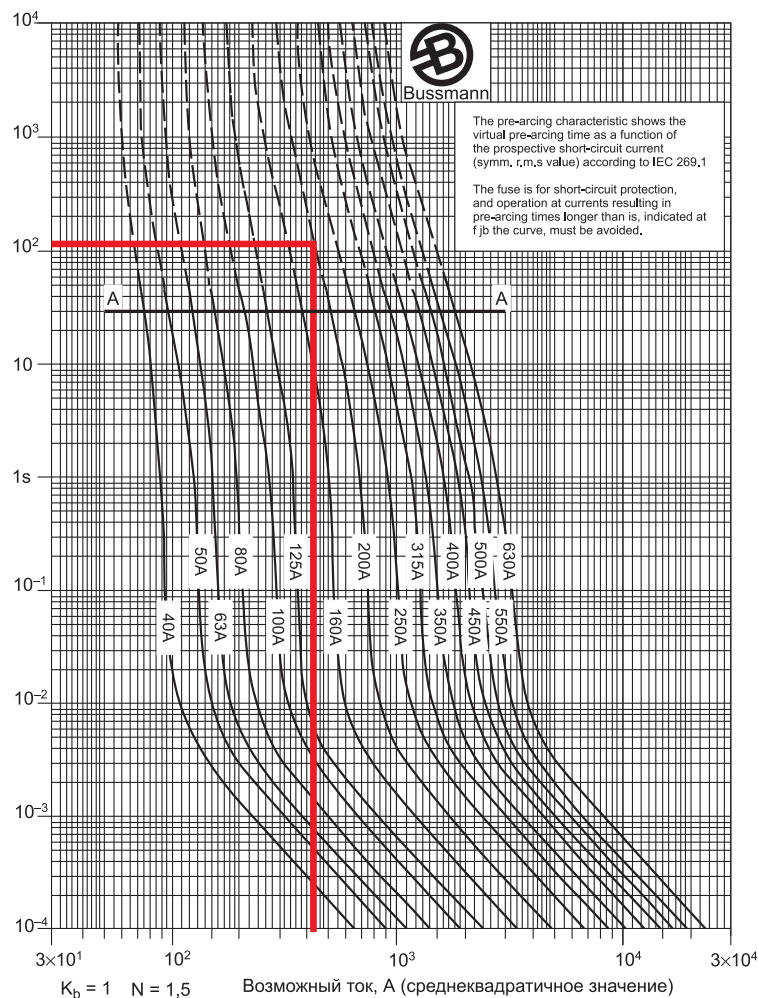
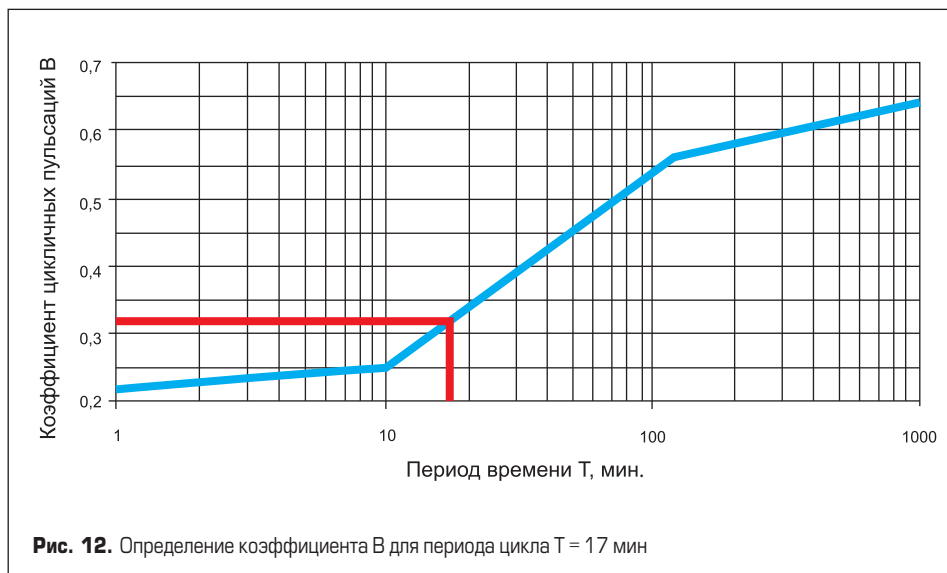


Рис. 11. Определение тока плавления I_t по время-токовой характеристике предохранителя



Далее из графика (рис. 10) вычисляем период цикла T . Он составляет $120 \text{ с} + 15 \text{ мин} = 17 \text{ мин}$. По графику (рис. 12) определяем коэффициент B для 17 мин. Коэффициент B равен 0,32.

Проверим выполнение условия надежности при работе с данной циклической нагрузкой. Умножая коэффициент B на ток плавления, получаем $440 \times 0,32 = 141 \text{ А}$, что меньше тока импульса, равного 150 А. Значит, при такой циклической нагрузке предохранитель на 200 А не будет иметь достаточного запаса

надежности. Необходимо увеличить номинал предохранителя. Проводя такие проверки, мы можем получить гарантию долговременной работы предохранителя в условиях импульсной циклической нагрузки.

Иногда в результате расчетов получается, что показатель тепловой энергии I^2t предохранителя становится больше аналогичного показателя защищаемого устройства, например IGBT-модуля. При этом предохранитель будет неспособен выполнять назначенные ему

функции. В таких ситуациях стоит несколько уменьшить запас прочности предохранителя или, если прочность снижается значительно, придется выбрать другую модель предохранителя.

Кроме выбора основных параметров предохранителя, рассмотренных выше и являющихся определяющими, есть еще и другие критерии, например конструктивное исполнение, вид контактов, наличие индикации срабатывания и т. д. Bussmann является ведущей компанией в мире по количеству выпускаемых моделей плавких предохранителей, а также предлагает наиболее широкий ассортимент быстродействующих предохранителей на мировом рынке. Более подробно познакомиться с технической информацией и подобрать нужную модель предохранителя можно на сайте официального представителя Bussmann в РФ — ООО «Айтекс» (www.bussfuse.ru).

Литература

1. www.cooperindustries.com
2. IEC 60 269 — 1 Low voltage fuses. Part 1/ General requirements.
3. High Speed Fuse Application Guide / Cooper Industries plc, USA, 2010.
4. Намитков К. К. и др. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. — М.: Энергоатомиздат, 1988.