

Начало в №6'2014

Как правильно подобрать быстродействующий предохранитель

В предыдущей статье [6] мы подробно разобрали аспекты определения основных параметров подбора быстродействующих предохранителей — значений номинального напряжения и номинального тока, а также рассмотрели, как влияют на эти параметры перегрузки, цикличность нагрузки и внешние факторы — окружающая температура, атмосферное давление, частота тока, плотность тока в подводящих шинах и т. д. В данной статье будут обсуждены особенности применения быстродействующих предохранителей в цепях постоянного тока. Кроме того, будут представлены конструктивные варианты исполнения различных серий предохранителей и рассмотрены области их применения.

Руслан Черекбашев

fuse@bussfuse.ru

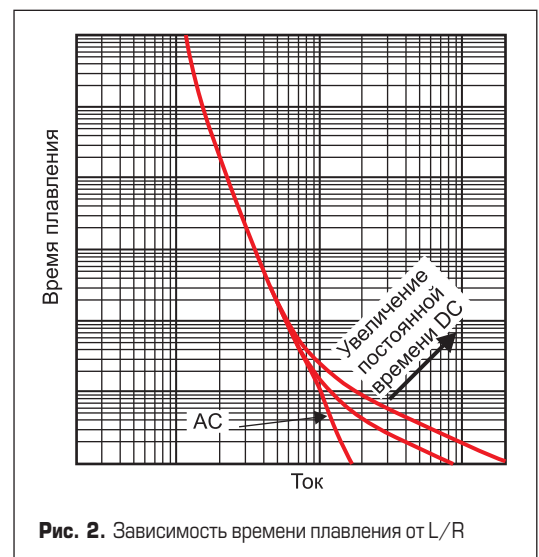
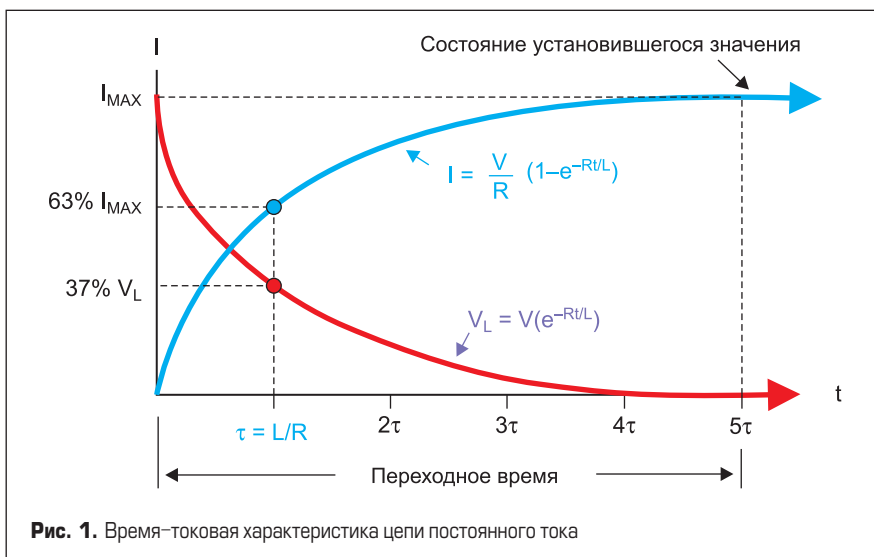
Предохранители в режиме постоянного тока

Использование предохранителей в цепях постоянного тока имеет свои особенности, поскольку из-за большой скорости процессов и отсутствия нулевых переходов тока цепи на работу предохранителя оказывают значительное влияние реактивные параметры цепи. Индуктивность в цепи постоянного напряжения ограничивает скорость нарастания тока. Время, затрачиваемое на достижение током 63% от конечного значения, называется постоянной времени, обозначаемой отношением L/R . Скорость же нарастания тока влияет на начальную энергию плавления элемента предохранителя. Это определяет как время-токовую характеристику плавления, так и максимальный пропускаемый ток (рис. 1).

Для длительного периода времени (более 1 с) тепловой эффект переменного тока такой же, как и для постоянного, их характеристики сливаются (рис. 2).

Большинство схем имеют постоянную времени между 10 и 20 мс, исходя из чего спецификации МЭК (Международной электротехнической комиссии) требуют тестирования в этих пределах. Константы времени, превышающие 20 мс, встречаются нечасто, за исключением тяговых решений электро-транспорта, где большая длина контактной сети дает чрезвычайно высокое отношение индуктивности к сопротивлению. В случае коротких замыканий при срабатывании предохранителя значение постоянной времени цепи может отличаться от постоянной времени в «нормальных» рабочих условиях.

Во многих выпрямительных схемах, даже в условиях срабатывания, плавкая вставка будет



находиться под воздействием переменного напряжения (когда напряжение стремится к нулю или бывает близким к нулю с регулярностью, соответствующей частоте питания). В этих условиях гашение дуги внутри плавкой вставки в случае срабатывания упрощается при снижении напряжения до нуля. Когда предохранитель установлен в цепи постоянного тока, процесс гашения дуги при срабатывании не будет упрощаться периодическим снижением напряжения до 0, как это происходит в случае с переменным напряжением. При постоянном токе погасить дугу гораздо сложнее, вследствие чего предохранитель в этом случае, как правило, должен иметь гораздо большие размеры (рис. 3).

Следовательно, напряжение, при котором плавкая вставка может безопасно работать, зависит от постоянной времени цепи. Следует отметить, что при малых значениях постоянной времени номинал тока предохранителя в случае постоянного напряжения иногда может оказаться больше, чем в случае переменного (в соответствии со стандартом IEC или UL). Однако, как правило, номинал предохранителей при постоянном токе не превышает 75% от номинала при переменном токе и снижается по мере увеличения постоянной времени.

Изменение напряжения дуги в результате самоиндукции относительно приложенного напряжения будет также различным для цепей переменного и постоянного тока. Если это специально не предусмотрено конструкцией, то предохранители не рекомендуется применять для защиты от незначительных перегрузок в цепях постоянного тока. Производительность в этой области может быть ограничивающим фактором при выборе предохранителя.

Компания Bussmann производит широкий диапазон предохранителей, разработанных специально для работы при постоянном токе в самых разных приложениях: в тяговых транспортных решениях, системах бесперебойного питания, выпрямителях, частотных преобразователях, солнечной энергетике и др. Предохранители для цепей постоянного тока выпускаются на типовые напряжения 750,

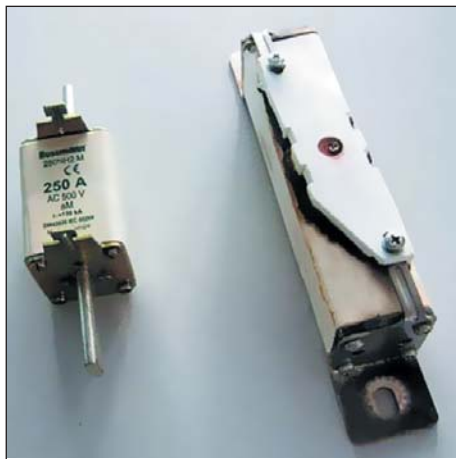


Рис. 3. Предохранители одного номинала для переменного (слева) и постоянного (справа) тока

1000, 1200, 1500, 2000 и 4000 В в диапазоне токов до 1600 А, различного конструктивного исполнения.

Предохранители переменного тока в цепях постоянного тока

Для примера, с учетом указанного выше, проверим, можно ли применить какой-либо конкретный предохранитель в цепи постоянного тока. Приведенная ниже информация относится к прямоугольным предохранителям стандартной серии на 660, 690, 1000 и 1250 В переменного тока. Причем в их каталоге не сообщается о том, могут ли они использоваться в цепях постоянного тока. Тем не менее эти предохранители допустимо применять в цепях с постоянным напряжением. Однако для этого нужно провести определенный проверочный расчет.

Отключающая способность предохранителей зависит от сочетания:

- максимального приложенного постоянного напряжения;
- постоянной времени цепи L/R ;
- минимального предполагаемого тока короткого замыкания I_{pmin} цепи;

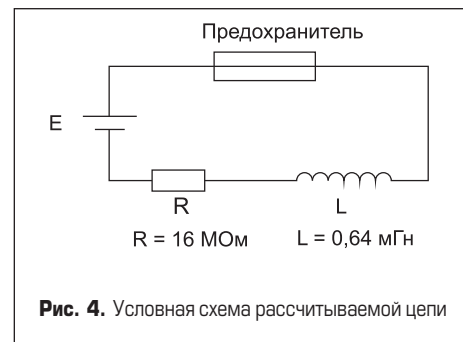


Рис. 4. Условная схема рассчитываемой цепи

- преддугового интеграла I^2t выбираемого предохранителя.

Пример расчета

Исходная информация (рис. 4):

- Используется предохранитель 170M6149 со следующими параметрами: 1100 А, 1250 В АС, I^2t — 575 000 А²с.
- Прилагаемое напряжение $E = 500$ В DC.
- Возможный ток короткого замыкания $I_p = E/R = 500/16 = 31,3$ кА.
- Постоянная времени $L/R = 40$ мс (0,64/16). Расчет проводился в следующем порядке.
- Шаг 1

График на рис. 5 показывает зависимость максимума приложенного напряжения постоянного тока от L/R с тремя уровнями тока I_p в качестве параметра.

Необходимо выбрать кривую 1, 2 или 3 выше точки пересечения известного напряжения и постоянной времени. Находим точку пересечения для прилагаемого напряжения 500 В и постоянной времени, равной 40 мс. Непосредственно выше этой точки пересечения находится кривая 2.

Если выше точки пересечения напряжения и постоянной времени нет никакой кривой, то нужно выбрать плавкий предохранитель с номиналом переменного напряжения более 1250 В.

- Шаг 2

Для правильного применения предохранителя необходимо использовать коэффициент F , связывающий I^2t с предполагаемым током срабатывания I_{pmin} . На рис. 6 показана зависимость коэффициента F от L/R . По параметру 2 (выбранной кривой 2) для

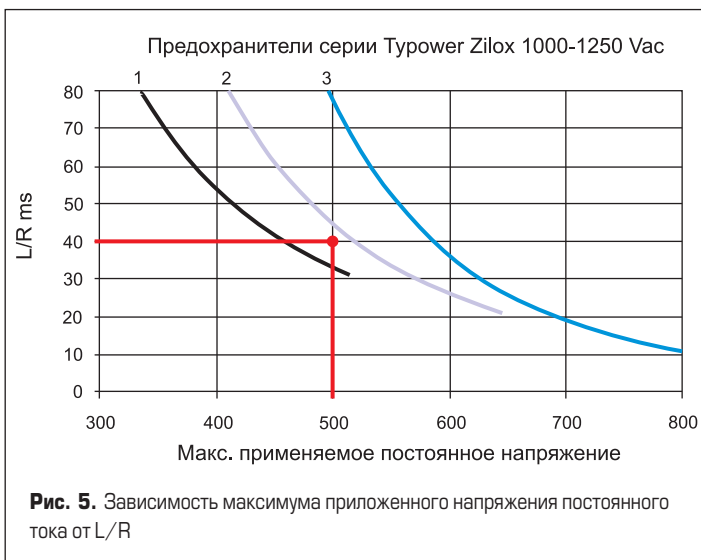


Рис. 5. Зависимость максимума приложенного напряжения постоянного тока от L/R

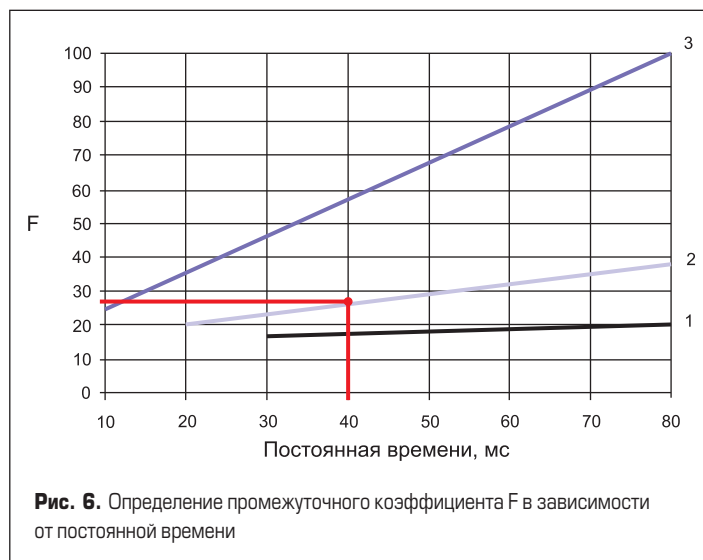
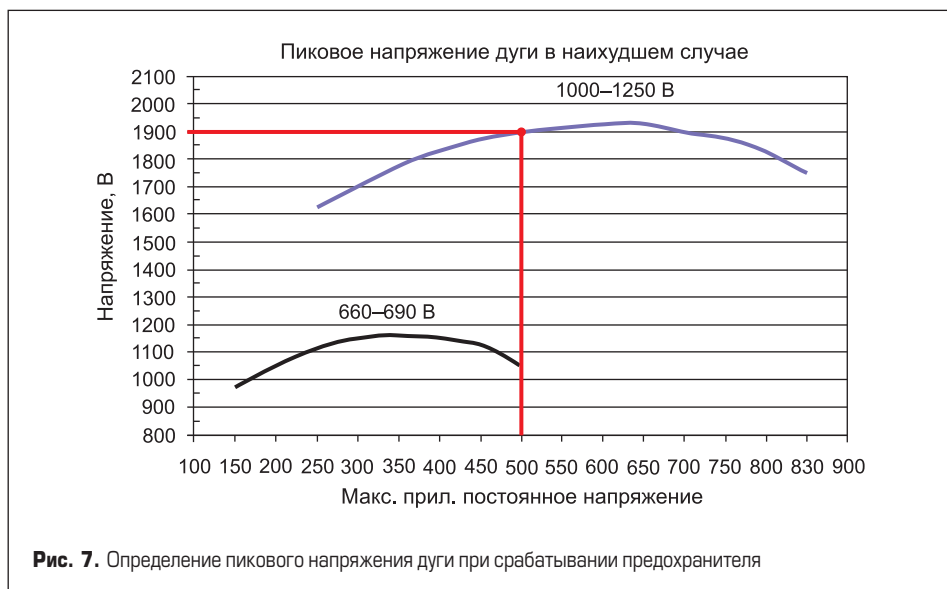


Рис. 6. Определение промежуточного коэффициента F в зависимости от постоянной времени



Выбор конструктивного исполнения быстродействующих предохранителей

В данной статье обсуждается лишь выбор предохранителей, поскольку особенности их внутреннего устройства рассматривались ранее [5, 6]. Кроме правильного определения электрических параметров предохранителя, перед пользователем стоит задача выбора его конструктивного исполнения. Зачастую такой выбор определяется требованиями к его допустимым размерам, обусловленным величиной свободного пространства в месте установки. Но следует учитывать, что размеры предохранителя, как правило, зависят от номиналов тока, напряжения, режима использования (цепи переменного или постоянного тока). Компания Bussmann представляет наиболее широкий ассортимент быстродействующих предохранителей на мировом рынке. Они выпускаются в корпусах всех международных типов, соответствующих стандарту EN60269-4, который объединяет все предыдущие европейские и американские стандарты для этих устройств.

Семейство быстродействующих предохранителей Bussmann включает в себя цилиндрические предохранители (Ferrule Style) различного размера (от 6×32 до 25×146 мм), отлично защищающие небольшие ИБП, малые приводы переменного тока и другое оборудование небольшой мощности, где приоритетом является минимальное занимаемое пространство (рис. 8). Эти предохранители устанавливаются в специальные модульные держатели и держатели открытого типа, имеющиеся в ассортименте продукции производителя. В линейке (в серии FWP) есть и варианты исполнения предохранителей с бойком индикации срабатывания.

Выпускаемые компанией Bussmann предохранители британского стандарта BS88:4 (рис. 9) для защиты полупроводников представлены самой широкой в индустрии линейкой с двумя диапазонами напряжения: 240 В AC/150 В DC и 690 В AC /500 В DC. Здесь использованы инновационные методы гашения дуги, а также материалы высокого класса, обеспечивающие минимальные значения Pt и отличную производительность в цепях постоянного тока. Конструктивное исполнение со смещенными контактами под болт предполагает установку непосредственно на платы, монтажные панели приводов постоянного тока, выпрямителей, преобразователей напряжения, устройств плавного пуска и т. п. Опционально такие предохранители могут оснащаться индикаторами срабатывания.

Еще одна линейка быстродействующих предохранителей — североамериканские цилиндрические, с ножевыми и торцевыми привинчиваемыми контактами (рис. 10). Они представляют собой отличное решение для силового оборудования средней мощности. Их конструкция оптимизирована для обеспечения малых значений Pt , потерь мощности и напряжения дуги, а также для применения

постоянной времени $L/R = 40$ мс находим коэффициент $F = 26,5$.

• Шаг 3

Для прилагаемого напряжения 500 В по пересечению с кривой номинального напряжения используемого предохранителя находим пиковое напряжение дуги при срабатывании предохранителя. Как видно из графика на рис. 7, для данного случая пиковое напряжение дуги при срабатывании предохранителя будет достигать значения 1900 В.

• Шаг 4

Минимальный уровень тока (I_{pmin}) цепи должен соответствовать следующему условию:

$$I_{pmin} \geq F \times \sqrt{Pt} = 26,5 \times \sqrt{575\ 000} = 20 \text{ кА.}$$

Проверка с конкретными параметрами цепи показала, что отключающая способность выбранного предохранителя достаточна при следующих основных условиях:

- максимальное прилагаемое напряжение 500 В;
- постоянная времени 40 мс (допустимо до 46 мс);
- минимальный необходимый ток срабатывания I_p равен 20 кА (имеем для данной цепи 31,3 кА, что вполне соответствует условию);
- пиковое напряжение дуги при срабатывании предохранителя 1900 В.

Следует помнить, что приведенная методика проверки применимости относится конкретно к прямоугольным предохранителям стандартной серии на 660, 690, 1000 и 1250 В переменного тока. Возможность использования в цепях постоянного тока других быстродействующих предохранителей необходимо уточнять в справочных данных соответствующих каталогов.

Таким образом, плавкие предохранители допускают работу в цепях как переменного, так и постоянного тока, но с существенной коррекцией максимально допустимых параметров, в частности напряжения. Однако

не существует универсальной достоверной методики подбора предохранителя для постоянного тока, основанной на его параметрах для переменного тока. Поэтому производитель рекомендует в цепях постоянного тока применять специально разработанные для этого предохранители или предохранители, в справочных данных которых оговаривается возможность работы в режиме постоянного тока.



Рис. 8. Быстродействующие цилиндрические предохранители (Ferrule Style)



Рис. 9. Быстродействующие предохранители британского стандарта BS88:4



Рис. 10. Быстродействующие предохранители североамериканского стандарта



Рис. 11. Быстродействующие предохранители в прямоугольном корпусе

в цепях постоянного тока. Для предохранителей линейки разработаны держатели с фиксированным центром и модульные универсальные держатели.

А самым большим подмножеством будут, пожалуй, быстродействующие предохранители в прямоугольном корпусе (рис. 11). Их конструктивное исполнение обеспечивает минимальные значения I^2t , низкую рабочую температуру и малые потери мощности. Диапазон рабочих напряжений — 400–4000 В, номинальный ток — до 7500А.

Такие предохранители предназначены для защиты полупроводниковых приборов в оборудовании средней и большой мощности. Имеются серии, разработанные специально для использования в цепях постоянного тока. В зависимости от номинала и спецификации Bussmann производит целый диапазон различных типов корпусов быстродействующих предохранителей, от 0000 до 5-го типоразмера (рис. 12).

Кроме того, широкая линейка прямоугольных быстродействующих предохранителей делится на несколько подгрупп, характерных для определенных локальных стандартов и различающихся преимущественно исполнением контактов (рис. 13).

Это дает возможность пользователю подобрать наиболее подходящий вариант для используемого оборудования и обеспечивает гибкость при разработке новых специфичных приложений. Одни из них (например, предохранители стандарта DIN 43 620) могут быть установлены только в предназначенные специально для таких устройств держатели, другие допускаются устанавливать как в специальные держатели, так и непосредственно на токоподводящие шины (стандарт DIN 43 653). В пределах практически каждой из этих подгрупп имеются варианты исполнения предохранителей с разными типами индикации: визуальный индикатор срабатывания, боек на торцевой части предохранителя (тип Т), адаптер индикации срабатывания на теле предохранителя (тип К). Для обоих типов доступны специальные микропереключатели, которые выбираются опционально (рис. 14).

Области применения быстродействующих предохранителей

Широкое распространение силовых полупроводниковых преобразователей определило рост применения быстродействующих предохранителей. Силовые полупроводнико-

| Типоразмер | Габариты | Кодировка BUSSMANN |
|------------|------------|--------------------|
| 0000 | 17×17 мм | 0000U/80 |
| 000 | 21×36 мм | 000/80 |
| 00 | 30×47 мм | DIN 00 |
| 0 | 35×45 мм | 0S/55 |
| 1* | 45×45 мм | 1*BKN/90 |
| 1 | 53×53 мм | DIN1 |
| 2 | 61×61 мм | 2TN/110 |
| 3 | 76×76 мм | 2//3SBKN/55 |
| 4 | 105×105 мм | 4PKN/150 |
| 4+ | 115×115 мм | 24+BKN/55 |
| 5 | 159×159 мм | 5BKN/65 |

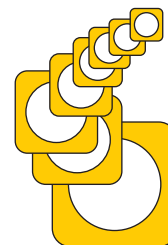


Рис. 12. Типоразмеры быстродействующих прямоугольных предохранителей

Исполнение контактов:

US Style

French Style

Flush End Contact

DIN 43 620

DIN 43 653

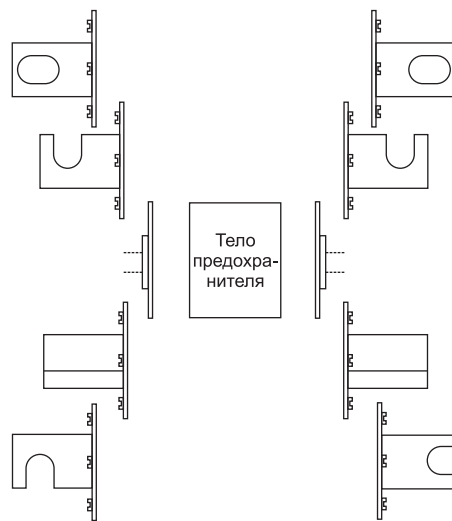


Рис. 13. Стандарты предохранителей в прямоугольном корпусе с различным исполнением контактов

вые преобразователи используются для экономичного преобразования электрической энергии при автоматизации производственных процессов, механизации трубопрокатных и трубоэлектросварочных производств, питания и управления компрессорами и насосными станциями нефте- и газопроводов, а также в горнодобывающей промышленности. Обсудим специфику применения быстродействующих предохранителей в отдельных отраслях.

Компания Bussmann имеет, в частности, специально разработанные решения для железнодорожного и электротранспорта.

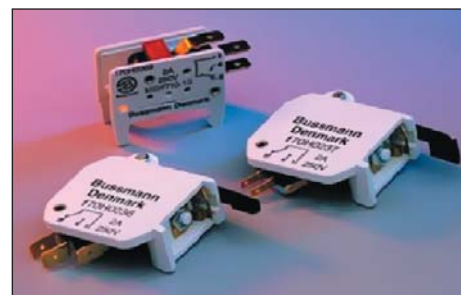


Рис. 14. Микропереключатели индикации срабатывания прямоугольных предохранителей

Линия питания
 Catenary High Wire
 Pantograph High Wire
 Fuse Solutions
 170E Series
 170M Series
 ABWN Series

Тяговый преобразователь
 Fuse Solutions
 170M Series
 SF75X Series

Система управления и контроля
 Relays
 Lights
 Controls
 Meters
 Fuse Solutions
 DMM Series
 FWL/FWS Series
 WRC Series
 054 Series
 CHM Series*
 CH127 Series*

Вспомогательные системы
 Shed Supply
 Heating and Lighting
 Motors (Medium Voltage)
 Fuse Solutions
 NBC Series
 WC Series
 RC Series
 FWL/FWS Series

Преобразователи напряжения
 Fuse Solutions
 170M Series
 SF75X Series

Контакторы
 Compressor Motors
 Enbray Contactors
 2D Series
 130 Series

Рис. 15. Применение предохранителей Bussmann в цепях подвижного состава

Их специфика определяется, в первую очередь, применением в цепях постоянного тока для широкого диапазона токов и напряжений. Об особенностях применения в цепях постоянного тока мы уже говорили выше, в частности, в связи с более сложным процессом гашения дуги требуется использование более качественных материалов и увеличение физических размеров предохранителя. Кроме того, тяговые пре-

образователи электроподвижного состава эксплуатируются в условиях непрерывных механических воздействий, циклических токовых перегрузок, большой индуктивности нагрузки, широкого диапазона климатических факторов, что ужесточает требования к применяемым предохранителям. В линейке для железнодорожного и электротранспорта у Bussmann есть предохранители для тяговых преобразователей, систем управле-

ния и контроля, преобразователей напряжения и вспомогательных систем подвижного состава (рис. 15).

Еще одной областью использования быстродействующих предохранителей Bussmann является металлургия.

Для производства стали в дуговых сталеплавильных печах необходима величина тока до 100 кА при напряжении более 1000 В. Процесс хлорного электролиза требует постоянных токов до 300–350 кА и напряжения постоянного тока до 1000 В. Медь, цинк, свинец, никель, кадмий и т. п. производятся также с применением больших токов.

В цветной металлургии для питания электролизных ванн применяются силовые выпрямительные установки на номинальный ток до 100 кА при напряжении до 1000 В. Они характеризуются большим количеством параллельно соединенных выпрямительных модулей и необходимостью обеспечивать непрерывное питание. В ряде случаев, при аварии, вызванной одиночным отказом полупроводникового модуля, когда аварийный ток достигает 150–200 кА, существует возможность образования дуги, сопровождающейся взрывом. Взрывы полупроводников, вызванные отсутствием либо невысоким качеством защитных устройств, приводят к тяжелым последствиям: разрушению конструкции преобразователя, нарушению сложных технологических процессов, дорогостоящему ремонту. Быстродействующий предохранитель должен при пробое соответ-



Рис. 16. Специальные предохранители Bussmann 5-го размера для металлургической отрасли



Рис. 17. Предохранители с характеристикой gPV для защиты солнечных батарей

ствующего полупроводника (тиристора, IGBT), последовательно соединенного с ним, своевременно сработать и отключить его, причем это не должно критически сказаться на работе преобразователя. Чтобы удовлетворять растущий спрос на допустимые нагрузочные способности по току, специалисты Bussmann разработали предохранитель 5-го размера в единой конструкции, которая оптимизирует температурный режим предохранителя как при принудительном обдуве, так и при одно- или двустороннем водяном охлаждении (рис. 16).

Еще одно специфическое применение предохранителей Bussmann — в оборудовании для солнечной энергетики (рис. 17). Солнечные системы для выработки электроэнергии состоят из массивов фотоэлементов и инверторов. Предохранители используются для защиты линеек элементов солнечных панелей, подмассивов и массивов, так и для защиты связанных инверторов. Такие особенности оборудования для солнечной энергетики, как высокое напряжение постоянного тока, низкий выходной ток, очень низкие токи короткого замыкания, чувствительность к повреждению вследствие перенапряжения, и определяют специфику защитных устройств. Компания Bussmann производит весь спектр предохранителей, предназначенных для сол-

нечных систем, в том числе цилиндрические с различным исполнением контактов для защиты линеек фотоэлементов (10×38 мм 600 В, 14×51 мм 1000/1100 В, 14×65 мм 1300/1500 В постоянного тока) и прямоугольные разных типов размеров на 1000/1500 В постоянного тока для защиты целых массивов. В ее ассортименте также есть различные держатели и прочие аксессуары. Предохранители с характеристикой gPV способны срабатывать при токе, всего в 1,3 раза превышающем номинальный, что является их характерной особенностью.

Также быстродействующие предохранители применяются для защиты полупроводников частотных преобразователей, устройств плавного пуска, приводов электродвигателей, использующихся в составе производственного оборудования различных отраслей промышленности, источников бесперебойного питания, преобразователей напряжения, оборудования альтернативных источников энергии и т. д.

Bussmann — ведущая мировая компания по производству плавких предохранителей, выпускаемых множеством ее предприятий по всему миру. Однако вследствие появления на рынке большого количества подделок необходимо убедиться, что приобретаемые модели являются оригинальным продуктом Bussmann. Для этого стоит обратиться к единственному официальному представителю Bussmann в России — компании «Айтекс». Более подробно познакомиться с технической информацией и выбрать нужную модель можно на сайте www.bussfuse.ru.

Литература

1. www.cooperindustries.com
2. IEC 60 269 1 Low voltage fuses. P. 1 // General requirements.
3. High Speed Fuse Application Guide // Cooper Industries plc, USA, 2010.
4. Намиток К. К. и др. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Андрей Черняк. Быстродействующие предохранители Bussmann // Силовая электроника. 2013. № 6.
6. Хаймин В., Черекбашев Р. Как правильно подобрать быстродействующий предохранитель // Силовая электроника. 2014. № 6.