

# Быстродействующие предохранители Bussmann

Андрей Черняк

fuse@bussfuse.ru

Новые полупроводниковые приборы, такие как быстродействующие диоды и транзисторы, IGBT-модули, запираемые тиристоры (GTO), твердотельные реле, получают все большее распространение в силовых устройствах, поскольку дают возможность управлять большой мощностью при малых размерах и долговечны при работе в номинальных режимах. Но при этом возможность выдерживать перегрузки и перенапряжения у них гораздо меньше, чем у электромеханических устройств. В силовой цепи в случае короткого замыкания сверхтоки могут достигать десятков и даже сотен тысяч ампер — полупроводниковые же приборы могут выдерживать импульсы токов только в несколько тысяч ампер. В связи с этим во весь рост встает проблема защиты как самих полупроводниковых приборов, так и аппаратуры в целом. Основные требования к ней можно выразить следующими критериями:

- безопасно прерывать возможные сверхтоки за очень короткое время;
- ограничивать ток, протекающий через устройство;
- ограничивать тепловую энергию ( $Pt$ ), пропускаемую к устройству во время отключения цепи.

Сверхбыстрое прерывание больших токов в цепи с индуктивностью создает высокое перенапря-

жение. При этом даже такие простые и надежные устройства, как диодный мост, могут выйти из строя. Поэтому желательно, чтобы защитное устройство предупреждало перенапряжения во время прерывания неисправности. Не менее желательно, чтобы идеальное защитное устройство обладало следующими свойствами:

- не требовало техобслуживания;
- имело срок службы не меньше срока службы аппаратуры;
- не срабатывало при номинальном токе и при штатных переходных процессах.

Представляем вниманию читателей устройство, обладающее всеми этими качествами, — современный высокотехнологичный быстродействующий предохранитель английской фирмы Bussmann. Если обычные предохранители, соответствующие стандарту IEC 60 269-2, предназначены только для защиты промышленного оборудования без полупроводниковых устройств, то быстродействующие модели компании Bussmann разработаны специально для защиты силовых полупроводников (рис. 1). Маркируются они буквенным кодом aR и специальным символом, отображающим последовательно соединенный предохранитель и диод. Возможно, поэтому их иногда неправильно называют полупроводниковыми. На самом деле внутри у этих предохранителей нет полупроводниковых компонентов, и, конечно, при их подключении не надо соблюдать полярность.

Быстродействующие предохранители рассчитаны таким образом, чтобы минимизировать время срабатывания, значение  $Pt$ , пропускаемый пиковый ток и напряжение дуги. Чтобы обеспечить быстрое плавление элемента, «перешейки» быстродействующих предохранителей имеют несколько иную конструкцию, нежели у обычных промышленных предохранителей того же номинала, и, как правило, работают при более высоких температурах, поэтому при их конструировании приходится учитывать более высокое тепловыделение, а также более высокую (буквально взрывную) скорость этого процесса. Чтобы предохранитель эффективно рассеивал тепло, а также противостоял ударным нагрузкам, инженеры Bussmann выполнили его корпус из материалов более высокого класса. Для соответствия размерам защищаемого оборудования быстродействующие предохранители часто производятся в корпусах



Рис. 1. Предохранитель серии NH с характеристикой aR

меньшего размера, что предъявляет еще более высокие требования к их качеству.

Огромное значение для безопасного срабатывания имеет наполнитель предохранителя. Как правило, в этой роли используется кварцевый песок, и здесь кроется ряд особенностей. Если песок будет слишком крупный или слишком мелкий, а размер песчинок неодинаков или они недостаточно плотно утрамбованы, то возможен эффект, когда скорость газа, образовавшегося при расплавлении проводящего элемента, не будет снижена трением о песчинки и произойдет разрыв корпуса предохранителя [5]. Во избежание подобной проблемы фирма Bussmann использует особый — калиброванный кварцевый песок, причем для разных типов предохранителей калибр подбирается индивидуально. При сборке предохранитель проходит через специальный вибростанок, обеспечивающий плотное наполнение песком всех частей корпуса. После сборки каждый предохранитель просвечивается на специальной рентгеновской установке на предмет отсутствия пустот, а также в целях контроля правильности монтажа всех компонентов. Пример рентгеновского снимка представлен на рис. 2.



Рис. 2. Рентген-снимок предохранителя на этапе контроля сборки

Помимо оперативного срабатывания, быстродействующие предохранители обладают еще одним важным качеством — свойством ограничения тока. Традиционные устройства защиты от перегрузки (такие как автоматические выключатели) позволяют сверхтоку короткого замыкания протекать по цепи в течение нескольких периодов. Это приводит к разогреванию, термическому разрушению проводов и их изоляции, взрыву компонентов

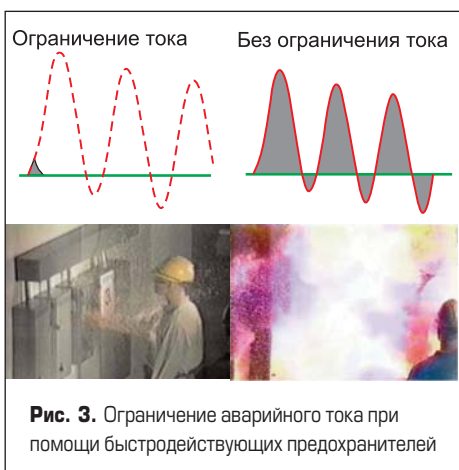


Рис. 3. Ограничение аварийного тока при помощи быстродействующих предохранителей

и, наконец, к пожару. Быстродействующие предохранители разрывают цепь задолго до того, как значение напряжения, а соответственно и тока, достигнет своего максимума в течение первого полупериода (рис. 3). В результате все части устройства не подвергаются разрушительным перегрузкам и остаются целыми.

Для полноценной защиты рекомендуется последовательно с автоматическим выключателем ставить предохранители. Именно для такой комбинированной защиты компания Bussmann выпускает приборы, совмещающие в себе автомат и плавкую вставку (рис. 4).



Рис. 4. Автоматический выключатель со встроенным предохранителем

Для корректной работы предохранителя в цепях защиты чувствительных полупроводниковых устройств необходимо правильно подобрать значение его номинала, а оно зависит не только от параметров защищаемой цепи, но и от многих внешних факторов. Например, при повышенной температуре окружающей среды (в условиях закрытого монтажа или в случае близости теплонагруженных элементов) номинал предохранителя следует увеличить, а при низких температурах либо принудительном охлаждении потоком воздуха, наоборот, понизить. Кроме того, на выбор номинала влияют частота тока, плотность его в контактной площадке, атмосферное давление (при высотах выше 2 км), а также частота и длительность импульсов тока перегрузки. Поскольку факторов, влияющих на номинал предохранителя, очень много, Bussmann рекомендует при разработке новых устройств обращаться за консультацией непосредственно к специалистам компании. По этой же причине при замене сгоревшего предохранителя не рекомендуется использовать другие типы и номиналы без консультации со специалистом Bussmann.

Полупроводники и соответствующие им быстродействующие предохранители используются во многих приложениях, таких как частотные преобразователи для электродвигателей, приводы постоянного и переменного тока, устройства плавного пуска, электролиз, индукционные печи, преобразователи напря-

жения и пр. Конфигурации схемы для этих приложений могут значительно различаться, но некоторые аспекты схем и их защиты являются общими для всех применений. Так, приложения можно разбить на две большие группы: с переменным и постоянным напряжением питания. Многие производители не выпускают отдельных типов предохранителей для постоянного тока, хотя в прерывании цепи при переменном и постоянном токе имеют место существенные различия. В случае переменного или импульсного напряжения предохранитель подвергается напряжению, которое будет уменьшаться до нуля или почти до нуля в соответствии с частотой питающего напряжения. В этих условиях прохождение напряжения через дугу существенно облегчает процесс гашения дуги. При постоянном же токе погасить дугу гораздо сложнее, вот почему и предохранитель в этом случае, как правило, должен быть гораздо больше по размерам (рис. 5).

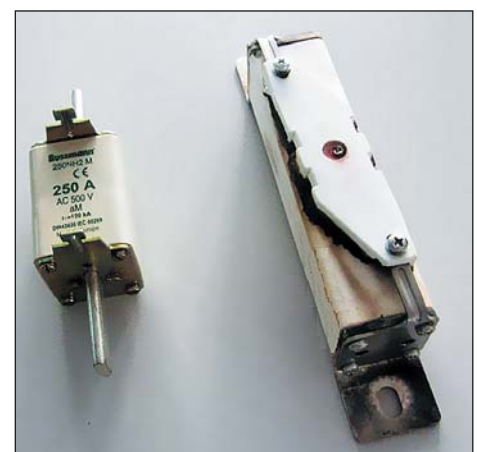


Рис. 5. Предохранители одного номинала для переменного (слева) и постоянного (справа) тока

Многие производители рекомендуют для цепей постоянного тока использовать предохранители для переменного тока, только на большее напряжение. Но не существует универсального метода определения максимального номинала предохранителя для постоянного тока на основании его значения для переменного тока. Напряжение, при котором это устройство может безопасно работать, зависит от того, насколько быстро затухает ток в данной цепи при снятии напряжения. Параметр, характеризующий этот процесс затухания, называют «постоянной времени». Для различных приложений постоянная времени будет существенно различаться. Ниже в таблице приведены характерные значения постоянной времени для некоторых из схем.

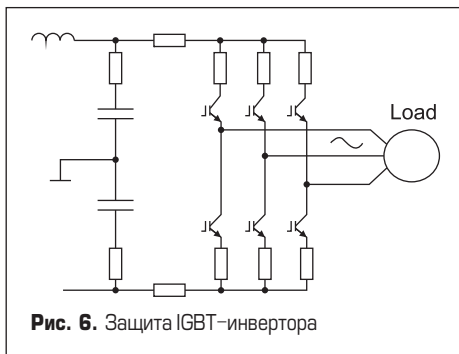
Интересно, что при малых значениях постоянной времени номинал тока предохранителя при постоянном напряжении иногда может оказаться больше, чем при переменном (согласно стандартам IEC или UL). Однако для большинства случаев номинал предохранителей при постоянном токе не превышает 75% от номинала при переменном токе, но по мере

**Таблица.** Типичные значения постоянной времени для различных схем

Тип схемы	Постоянная времени, мс
Схема зарядки аккумуляторов	<10
Инверторы, источники питания	<15
Ротор двигателя постоянного тока	20–60
Статор двигателя постоянного тока	>1000

увеличения постоянной времени он снижает. Компания Bussmann производит широкий диапазон предохранителей, предназначенных специально для работ при постоянном токе в самых разнообразных приложениях: схемах зарядки аккумуляторов, выпрямителях, частотных преобразователях, инверторах с IGBT и ГТО и др.

Появление IGBT в качестве переключающего элемента сделало схемы управления гораздо более простыми, значительно снизило потери в ключах и повысило надежность работы. Более высокая допустимая частота переключения повысила эффективность использования ШИМ-техники, а также улучшила качество выходного сигнала. Однако защита схем с IGBT весьма непростая задача (типовая схема представлена на рис. 6). Силовые транзисторы обычно работают крайне близко к своим верхним пределам по току и напряжению. Случайный выход за пределы безопасного диапазона чреват повреждением, и, если время перегрузки будет небольшим, даже быстродействующие предохранители не успеют защитить транзистор. А когда он выведен из строя, ток ограничен только низким сопротивлением пробитого перехода, в результате чего возникают сверхтоки короткого замыкания. В этой аварийной ситуации активная защита не может помочь, и сверхток приводит к расплавлению проводников и взрыву транзистора, а тот в свою очередь выводит из строя окружающие компоненты и вызывает пожар в оборудовании. Чтобы избежать серьезных материальных потерь, необходимо включать быстродействующие предохранители в силовую цепь каждого полупроводникового элемента.



**Рис. 6.** Защита IGBT-инвертора

Возможно, предохранитель не успеет защитить от сгорания сам IGBT-модуль, но он предотвратит дальнейшие разрушения и ограничит энергию, выделившуюся в процессе неисправности, быстрее и эффективнее любого из прочих устройств защиты. Сравнительный график работы разных устройств показан на рис. 7.



**Рис. 7.** Ограничение энергии короткого замыкания различными устройствами защиты

Зачастую можно встретить нежелание использовать предохранители в подобных схемах, поскольку они занимают место, удорожают работы, влекут дополнительные потери энергии и, наконец, вносят дополнительную индуктивность в схему, что увеличивает постоянную времени цепи. Однако преимущества от применения этих устройств, как то: устранение вероятности взрыва силовых полупроводников, упрощение сертификации, уменьшение затрат на восстановление работоспособности устройства, — перевешивают все эти сложности. Компанией Bussmann производятся специальные предохранители для IGBT в корпусах типа 3P и 4P. Они могут быть установлены в едином монтажном устройстве с press-pack полупроводником, что снижает количество шин в цепи, а значит, и общую индуктивность.

Для снижения потерь можно использовать также параллельное включение предохранителей (пример на рис. 8). Поскольку поверхность двух предохранителей превышает площадь равного им по номиналу одного предохранителя, то охлаждающий эффект также будет больше. Результатом этого является возможность использовать меньшие номиналы, более близкие к номинальному току защищаемого устройства, что обеспечивает лучшую защиту и меньшие потери мощности. Параллельно можно включать только предохранители одного и того же типа и номинала. Все предохранители должны быть смонтированы таким образом, чтобы обеспечить равные условия по протекающему току



**Рис. 8.** Параллельно включенные предохранители

и теплоотведению. В установках на большие токи следует дополнительно подбирать предохранители с максимально близкими значениями сопротивления в холодном состоянии. В ассортименте Bussmann есть готовые параллельные предохранители в заводском исполнении для различных типов и классов устройств.

Для IGBT в пластиковом корпусе характерна и другая проблема, которая возникает еще до наступления расплавления или взрыва кристалла. Дело в том, что внутренние соединения в корпусе IGBT и других компонентов выполнены из тонкой алюминиевой проволоки, и в условиях неисправности она плавится, образуя дугу, в результате чего пластиковый корпус может отделиться от подложки. При этом происходит повреждение корпуса модуля. Предохранитель в этом случае должен быть выбран таким образом, чтобы его полный  $Pt$  был меньше уровня, который может выдержать полупроводник. К сожалению, часто данные по  $Pt$  для IGBT отсутствуют в технической документации. Более того, поскольку полупроводники имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, мгновенная рассеиваемая мощность не пропорциональна квадрату тока. Иными словами,  $Pt$  для полупроводников не является константой и уменьшается по мере снижения длительности импульса. В таких случаях необходимо выбирать предохранитель с наименьшим возможным параметром  $Pt$ .

Если IGBT или соединительные провода повреждены, схема управления может подвергнуться высоким напряжениям и токам силовой части схемы. Чтобы избежать или хотя бы ограничить повреждение схемы управления, необходимо использовать в ней самые быстродействующие из доступных предохранителей, которые также проверены на использование в цепях постоянного тока с напряжением не ниже, чем в данной цепи. Обычные стеклянные, с низкой прерывающей способностью, тут неприменимы. Широкий ассортимент быстродействующих предохранителей Bussmann решает проблему подбора требуемых параметров.

При подборе номинала предохранителей для IGBT необходимо учитывать и особенности при работе с высокими частотами, а именно влияние скин-эффекта и эффекта близости проводников (*proximity effect*), усиливающееся с увеличением частоты, и применять соответствующие поправочные коэффициенты.

Помимо схем с IGBT-модулями, остановимся еще на одном примере применения быстродействующих предохранителей — решениях для защиты диодов и тиристоров. В крупных выпрямительных установках, где важна непрерывность работы, используются схемы с параллельным включением, в каждом из которых свой предохранитель. Это сделано для того, чтобы выход из строя одного диода или тиристора не вызвал нарушений в работе всей схемы. В данном случае важно точно подобрать номинал предохранителя таким образом, чтобы его  $Pt$  был меньше  $Pt$  разрушения полупроводника, но при этом не вызвать срабатывание предохранителей

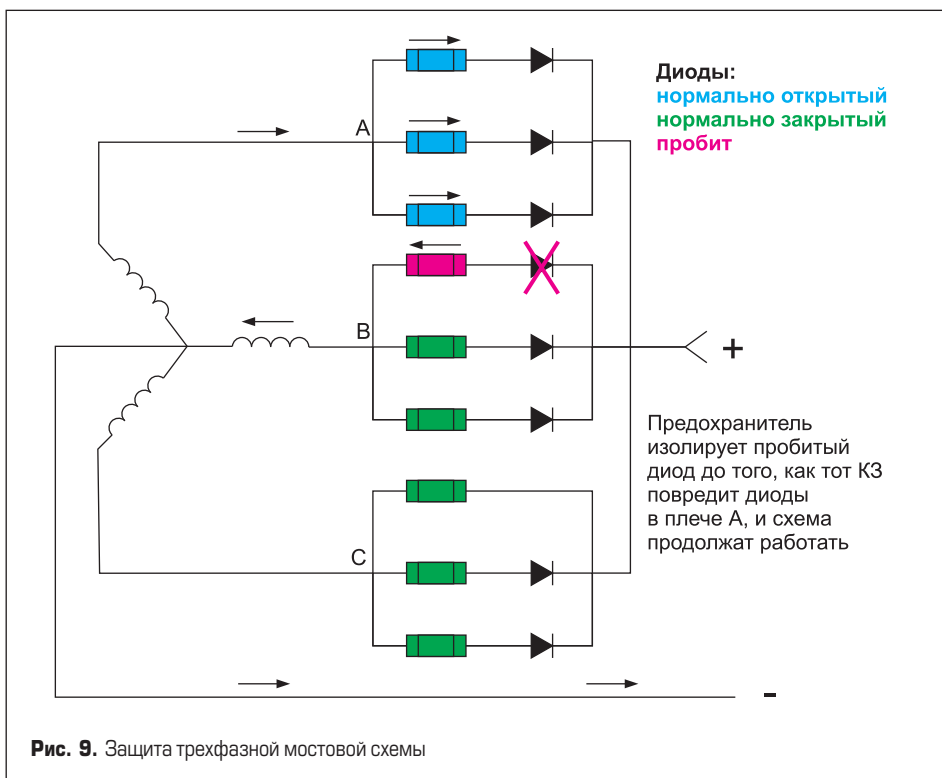


Рис. 9. Защита трехфазной мостовой схемы

в исправных цепях схемы. На рис. 9 приведен пример, когда правильно подобранный предохранитель защищает исправные компоненты от повреждения и позволяет схеме безостановочно функционировать.

В заключение стоит отметить, что быстродействующие предохранители в силу особен-

ностей конструкции обеспечивают защиту только от сверхтока короткого замыкания. Защиту от незначительных перегрузок необходимо обеспечивать иными средствами. Несмотря на это, применение быстродействующих предохранителей крайне необходимо в целях защиты остальной части схемы от раз-

рушения сверхтоками и последствий взрыва ключевого элемента. Не менее важным преимуществом быстродействующих предохранителей является их токоограничивающая и высокая прерывающая способность при работе с постоянными напряжениями.

Компания Bussmann представляет наиболее широкий ассортимент быстродействующих предохранителей на мировом рынке и по праву гордится качеством и надежностью своей продукции. Быстродействующие предохранители Bussmann выпускаются в корпусах всех международных типов, соответствующих стандарту EN60269-4, который объединяет все предыдущие европейские и американские стандарты для этих устройств, а также включает в себя стандартизированные тесты для предохранителей в инверторах (VSI).

### Литература

1. Официальный сайт компании Bussmann: [www.cooperindustries.com](http://www.cooperindustries.com)
2. High Speed Fuse Application Guide, Cooper Industries plc, USA, 2010
3. Fuse Protection of IGBT Modules against Explosions, Frede Blaabjerg, Florin Jov, Karsten Ries, Journal of Power Electronics, vol 2, 2002.
4. Selecting Protective Devices Handbook, Cooper Industries plc, USA, 2009.
5. Видео (взрыв предохранителя) [www.youtube.com/watch?v=OxJLGPiVwfl&feature=youtu.be](http://www.youtube.com/watch?v=OxJLGPiVwfl&feature=youtu.be)