

# Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей

**Быстрое развитие отечественного рынка энергосберегающих приводов определяет большой интерес производителей электронного оборудования к разработкам и производству преобразователей частоты (ПЧ) на основе IGBT-модулей.**

**При этом некоторые производители, не имеющие достаточного опыта в конструировании подобных устройств, сталкиваются с определенными проблемами в применении таких модулей.**

**В данной работе представлены наиболее часто встречающиеся случаи выходов приборов из строя. Приведены результаты исследований причин и условий, при которых в модулях происходит пробой транзисторов и диодов, даны рекомендации по монтажу и эксплуатации, позволяющие предотвратить выход IGBT-модулей из строя.**

**Алексей Бормотов,  
Валентин Мартыненко,  
Вячеслав Мускатиньев**

martin@moris.ru

## Введение

Энергосберегающие технологии на основе регулируемого электропривода все шире внедряются в различные отрасли промышленности и в транспортных средствах. В последнее время наиболее популярными и используемыми силовыми ключами для преобразователей частоты асинхронных двигателей стали IGBT-модули.

Общеизвестно, что использование в схемах преобразователей быстродействующих полностью управляемых мощных ключей на основе IGBT позволяет преобразовывать электроэнергию на высоких частотах, снизить общие потери в преобразователях, применить современные системы управления, снизить массу и габариты устройств.

Конструкция и параметры IGBT-модулей постоянно совершенствуются, повышается устойчивость

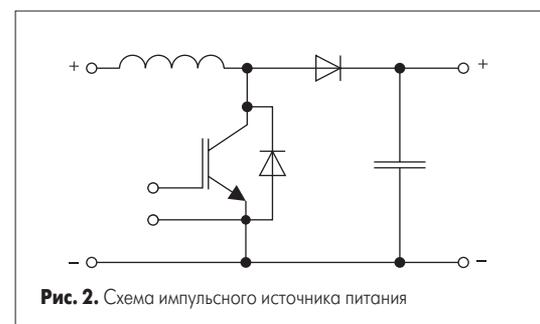
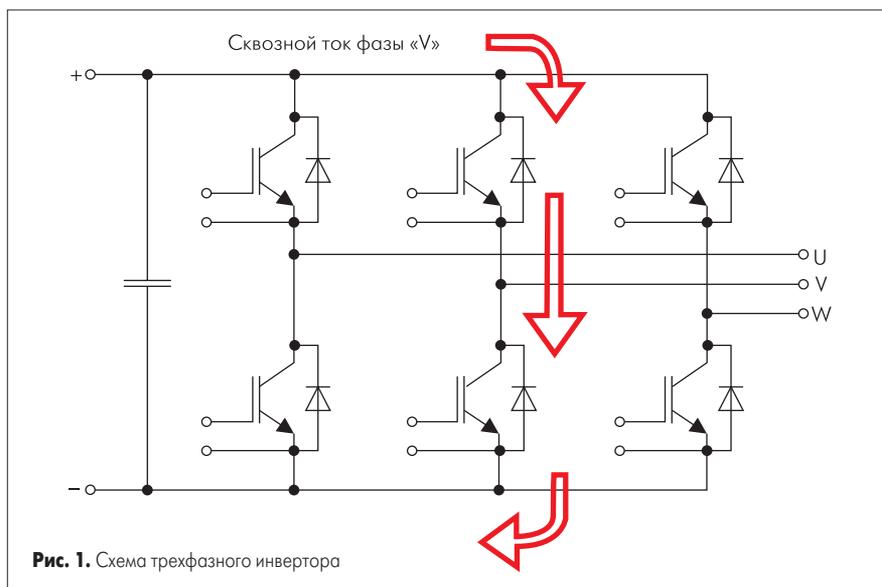
и «живучесть» модулей при жестких условиях эксплуатации и в аварийных режимах. Однако как показывает опыт работы с потребителями, многие разработчики и изготовители аппаратуры не учитывают некоторые особенности этих приборов, что зачастую приводит к неправильной эксплуатации IGBT-модулей и выводу их из строя.

В статье приведены результаты исследований причин выхода их из строя, выявленные при испытаниях или при эксплуатации потребителями. Мы постарались не только перечислить наиболее частые случаи, но и описать характерные признаки повреждения модулей. Одним из главных моментов публикации является также описание мер безопасности при применении IGBT-модулей.

Во всех случаях, когда речь идет не о механическом или электростатическом повреждении IGBT, все выходы модулей из строя происходят из-за теплового воздействия, разными являются только причины такого воздействия.

Чаще IGBT-модули используются в инверторах, где транзисторы соединены по схеме полумоста (рис. 1), и импульсных источниках питания, где используются IGBT-модули, собранные по схеме чоппера (рис. 2).

Рассмотрим наиболее распространенные случаи выхода IGBT-модулей из строя в этих схемах.



### 1. «Жесткое» выключение сквозного тока (тока короткого замыкания)

Самый распространенный и требующий наиболее тщательного рассмотрения случай — выход из строя модулей в результате воздействия сквозного тока в схеме полумоста инвертора. Как известно, сквозной ток (рис. 1) появляется вследствие несанкционированного одновременного включения обоих транзисторов полумоста. К появлению сквозного тока приводят следующие причины:

- малое «мертвое» время;
- сбой в системе управления или ложное включение драйвера в результате электромагнитной помехи;
- неисправность драйверов;
- ненадежные контакты в цепи управления (обрыв цепи управления).

Режим сквозного тока является самым тяжелым для IGBT, так как в этом случае одновременно с приложенным высоким напряжением между коллектором и эмиттером через транзистор протекает большой ток. Например, для стандартных IGBT (NPT) с напряжением коллектор-эмиттер 1200 В при напряжении затвор-эмиттер + 15 В величина сквозного тока достигает пяти-, шестикратного значения относительно максимально допустимого постоянного тока коллектора. Из-за большой пиковой мощности, выделяющейся на транзисторе, длительность тока короткого замыкания должна быть ограничена и для большинства IGBT-модулей не должна превышать 10 мкс.

Во многих преобразователях для диагностики тока перегрузки используется известный метод отслеживания напряжения насыщения транзистора: сигнал выключения поступает на затвор транзистора через 2–4 мкс после появления тока перегрузки. Следующий за этим процесс выключения играет большую роль для безопасного выхода транзистора из режима короткого замыкания.

Зачастую конструкция силовой части схемы, а именно силовых шин между фильтром питания преобразователя и инвертором, имеет достаточно большую индуктивность. Силовая разводка изготавливается потребителями не в виде низкоиндуктивных плоскопараллельных шин, разделенных изолятором, а выполняется из стандартной медной полосы толщиной от 1 до 5 мм, индуктивность которой достигает 0,5–1 мкГн и более. С целью подавления перенапряжений при выключении IGBT-модулей в нормальном режиме работы используются RC- или RCD-снабберы, которые ограничивают напряжение коллектор-эмиттер и рассеивают часть энергии потерь при выключении модуля.

Иная картина возникает при выключении тока короткого замыкания. В этом случае скорость спада тока при быстром запирающем транзистора может достигать очень больших значений (более 1000 А/мкс), вследствие чего на шинах возникают индуктивные пики перенапряжений, от которых не спасают мало-мощные снабберные цепи.

Как правило, IGBT-модули представляют собой два или более соединенных параллельно



Рис. 3. Повреждение кристаллов IGBT в результате воздействия сквозного тока

транзисторных элемента. При пробое модуля от перенапряжений в результате резкого выключения тока короткого замыкания в подавляющем большинстве случаев повреждаются все транзисторные кристаллы в обоих ключах полумоста (рис. 3). При этом ток увеличивается до такого значения, когда начинает разрушаться алюминиевая металлизация чипов, алюминиевая проволока, с помощью которой производилась разводка силовых и управляющих цепей внутри модуля, расплавляется, и окончательно разрушается эмиттерный контакт. В месте разрыва цепи возникает электрическая дуга, которая испаряет часть защитного компаунда, покрывающего кристаллы и металлизацию металлокерамических плат. Величины паразитной индуктивности силовой части ПЧ, а также емкости фильтра питания прямо пропорционально влияют на продолжительность горения электрической дуги. За это время в модуле накапливаются продукты горения, и в итоге разрушается корпус прибора. Как правило, этот процесс сопровождается выбросом плазмы наружу, что зачастую приводит к повреждению других элементов схемы.

Для модулей, пробитых сквозным током, характерны следующие признаки:

- повреждение верхней поверхности кристаллов транзисторов или выгорание почти всех транзисторных чипов в обоих ключах полумоста;
  - большинство диодных кристаллов остаются неповрежденными, диоды повреждаются только из-за воздействия электрической дуги от соседних транзисторов;
  - частичное или полное разрушение корпуса модуля.
- Так как вероятность возникновения тока короткого замыкания в реальной эксплуатации существует всегда, для обеспечения надежной работы IGBT-модулей при разработке преобразователей необходимо учитывать ряд обязательных требований:
- ограничение напряжения «затвор-эмиттер» в любых режимах работы модуля (не более +15 В);
  - минимизация паразитных индуктивностей силовых шин;
  - организация «плавного» выключения тока короткого замыкания (ограничение  $di/dt$  спада тока при выключении) с помощью схемотехнических решений драйвера;
  - максимальное сокращение времени от появления тока короткого замыкания до начала выключения модулей.

### 2. Перегрев IGBT-модулей рабочим током

Основным признаком перегрева IGBT-модуля рабочим током в результате, например, плохого охлаждения, является расплавление припоя под кристаллами транзистора или диода. Иногда перегрев сопровождается растрескиванием кристалла и смещением последнего от первоначального положения. Но во всех случаях в модулях сохраняется неповрежденной верхняя часть кристаллов с приваренной алюминиевой проволокой (рис. 4). Подобная картина обусловлена тем, что процесс перегрева развивается медленно (от нескольких секунд до десятков минут в зависимости от условий охлаждения и режима работы). Мощность, выделяющаяся в кристаллах, значительно меньше по сравнению с мощностью, выделяемой в режиме тока короткого замыкания и не приводит к столь разрушительным последствиям. Пробой в результате перегрева наблюдается, как правило, на всех параллельно соединенных кристаллах поврежденных транзисторов и диодов, так как температура на поверхности медного основания распределена достаточно равномерно.



Рис. 4. Повреждение кристаллов IGBT в результате перегрева

Основные причины перегрева модулей:

- ошибки в расчете полной мощности потерь в модулях;
- неправильный выбор охладителя или условий охлаждения;
- неправильное расположение термодатчика или ошибки при согласовании показаний термодатчика с температурой кристаллов;
- неправильное взаимное расположение модулей на охладителе;
- некачественная теплопроводящая паста (высокая вязкость, ухудшение свойств со временем, низкая теплопроводность);
- некачественная обработка поверхности охладителя;
- недостаточное усилие затяжки или ослабление винтов крепления модуля к охладителю.

### 3. Выход из строя быстродействующих диодов IGBT-модулей

Выход из строя обратных диодов модулей происходит, как правило, из-за перегрузки прямым током. Если на выходной вольт-амперной характеристике транзистора имеется участок стабилизации тока, а на прямой ВАХ диода такой участок отсутствует, то в одина-

ковых условиях ток перегрузки через диод может быть в несколько раз больше, чем через транзистор.

Возможны два случая повреждения диодов током перегрузки:

- 1) Относительно невысокая амплитуда тока (трех-, четырех-, пятикратная перегрузка относительно номинального тока) и большая длительность воздействия (несколько секунд);
- 2) Высокая амплитуда тока (15–20-кратная перегрузка и более) и малое время (десятки микросекунд).

В первом случае, при относительно невысоком значении тока перегрузки, основная мощность рассеивается в высокоомной базе диода и ситуация развивается примерно так же, как и в случае перегрева из-за плохого охлаждения. Рассеиваемая в кремниевой структуре мощность не успевает отводиться через металлокерамическую подложку. В результате происходит расплавление припоя и разрушение нижней части диодного кристалла (рис. 5).



Рис. 5. Повреждение диода при протекании длительного тока перегрузки

Подобные повреждения встречались при ошибках монтажа модулей, когда потребитель, перепутав коллекторный и эмиттерный выводы модуля, включал питание. Через диод в этом случае длительно протекал прямой ток значительной величины, что и приводило к выходу устройства из строя.

Иная ситуация развивается, например, при быстром разряде через диод заряженного конденсатора большой емкости. Из-за высокой плотности тока происходит быстрое тепловыделение в точках присоединения алюминиевых выводов к анодной металлизации



Рис. 6. Повреждение диодной структуры в точках присоединения выводов при прохождении короткого импульса сверхтока

диода, где и наблюдается проплавление структуры (рис. 6). Расплавления припоя под кристаллом при этом не происходит.

Выход из строя обратных диодов может произойти также из-за шнурования прямого тока. Данный вид пробоя был зафиксирован при использовании высоковольтных IGBT-модулей на высокой для этих приборов частоте коммутации. Как известно, чем выше класс прибора, тем хуже его частотные свойства и выше коммутационные потери. Для модулей на напряжение 3300 В оптимальными являются частоты коммутации от 500 до 1000 Гц при условии равенства статических и динамических потерь. При увеличении рабочей частоты и неизменных условиях охлаждения во избежание превышения допустимой мощности потерь некоторые потребители пытаются сильно снизить величину коммутируемого тока. Например в одном из импульсных источников питания с частотой коммутации 8–10 кГц были использованы IGBT-модули с обратными диодами на токи 200А, напряжение 3300 В. Амплитуда коммутируемого тока была значительно ниже величины номинального тока диода. В этих условиях после постепенного увеличения амплитуды тока от нуля до 10–15% номинального значения неоднократно происходил выход из строя диодов, хотя температура корпуса модуля при этом практически не отличалась от температуры окружающего воздуха. Анализ этих диодов показал, что все они пробивались точно по центру кристалла (рис. 7).



Рис. 7. Повреждение высоковольтного диода при высокой частоте коммутации

В данном случае пробой диода может развиваться следующим образом. На прямой вольт-амперной характеристике диодов имеется точка инверсии (рис. 8), в которой меняется знак температурного коэффициента прямого падения напряжения (ТКН). При значениях прямого тока выше точки инверсии значение ТКН имеет положительную величину, если значение тока ниже точки инверсии — отрицательную. Причем величина коэффициента тем больше, чем меньше плотность тока. Высокочастотные диоды, используемые в IGBT-модулях, практически всегда работают при плотностях прямого тока, близких к точке инверсии. Однако при малой величине прямого тока ТКН отрицателен и имеет большее значение, поэтому плотность тока будет максимальной в наиболее нагретой области кристалла (как правило, она расположена в центре кристалла — из-за худших условий охлаждения этой части кристалла диода).

Кроме большого отрицательного ТКН, локализации тока способствует также увеличение плотности заряда обратного восстановления в центральной части кристалла, что приводит к повышению коммутационных потерь и к дальнейшему увеличению температуры в наиболее нагретых точках диода. В итоге лавинообразный процесс локального разогрева приводит к повреждению диодного кристалла.

Поэтому применение высоковольтных IGBT-модулей при повышенных частотах коммутации и низких рабочих токах всегда требует дополнительных исследований в реальных режимах эксплуатации.

#### 4. Пробой затвора

Затвор является самым чувствительным элементом IGBT-модуля, поэтому должны быть приняты соответствующие меры предосторожности. Пробой затвора связан с разрушением тонкого подзатворного диэлектрика и происходит при напряжении на затворе 70–80 В. Максимально допустимое напряжение затвор-эмиттер при эксплуатации ограничено значением  $\pm 20$  В. Тем не менее пробой затвора остается достаточно распространенным видом повреждений, который встречается даже у опытных потребителей.

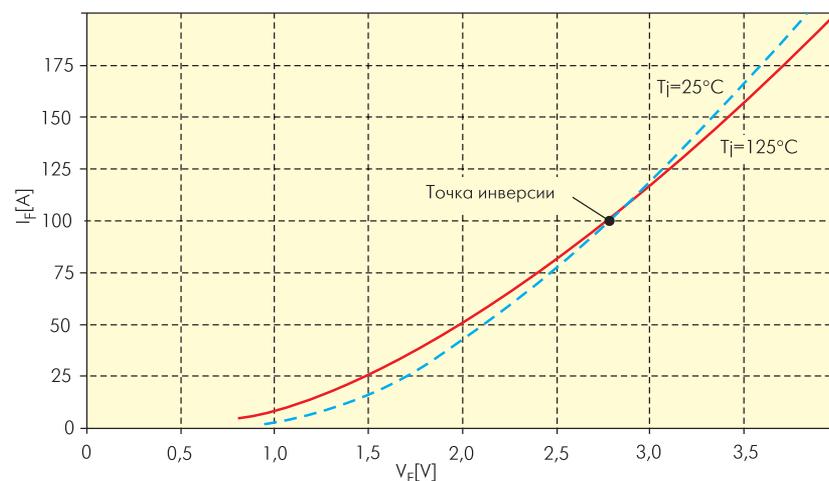


Рис. 8. Прямые вольт-амперные характеристики высоковольтного SFRD

Очень часто для монтажа IGBT-модулей применяют паяльники, работающие от сети 220 В. В этом случае всегда есть вероятность пробоя изоляции в паяльнике и попадания на затвор модуля недопустимо высокого напряжения, которое приведет к пробую затвора.

Еще одна причина повреждения затвора — ненадежные контакты к управляющим выводам. Если в готовом устройстве при наличии высокого напряжения «коллектор-эмиттер» произойдет нарушение контакта или обрыв эмиттерного управляющего вывода, то могут возникнуть осцилляции напряжения в управляющей цепи и высокочастотные колебания тока коллектора, которые в свою очередь через емкость между коллектором и затвором вызывают увеличение напряжения в цепи затвора выше предельно допустимого значения.

Чтобы избежать подобных неприятностей, необходимо соблюдение следующих требований:

- наличие антистатического покрытия на рабочих местах;
- обязательное наличие у персонала подключенных к заземлению антистатических браслетов;
- наличие гальванически развязанных от сети и заземленных паяльников;
- обеспечение надежного соединения управляющих выводов с модулями.

### 5. Пробой при измерениях параметров IGBT-модулей в условиях потребителей

Для исключения вероятности монтажа неисправных элементов и повышения надежности преобразователя многие потребители организуют входной контроль комплектующих, в том числе и IGBT-модулей. При этом специалисты, ранее работавшие с обычными биполярными транзисторами, зачастую проводят измерения параметров аналогичными методами, не учитывая особенности IGBT. Бывали случаи, когда потребители, нарушая методики измерения обратного напряжения «коллектор-эмиттер» и тока утечки коллектора, подавали на транзистор напряжение при подключенном высокоомном (200–500 кОм) резисторе между затвором и эмиттером или вовсе при разомкнутой цепи затвор-эмиттер. В IGBT между коллектором и затвором имеется паразитная емкость Миллера, которая при отсутствии предупредительных мер оказывает сильное влияние на затвор. Поэтому при контроле напряжения пробоя и тока утечки в цепи коллектор-эмиттер затвор должен быть закорочен с эмиттером. Если этого не сделать, то при приложении напряжения к коллектору на затвор через указанную емкость наводится напряжение, которое при достижении порогового значения включает транзистор (при этом он открывается не полностью и остается в активном режиме). IGBT-ключи не предназначены для работы в активном режиме, так как в этом случае они имеют сильную положительную температурную зависимость тока коллектора. Подобный эффект приводит к шнурованию тока через транзистор и локальному тепловому пробую. Если

в цепь «затвор-эмиттер» подключен резистор с высоким сопротивлением, он также не может компенсировать наведенный емкостной ток. Поэтому измерение обратного напряжения и тока утечки цепи «коллектор-эмиттер» необходимо проводить только при закороченной металлической перемычкой цепи «затвор-эмиттер».

Еще один вид выхода из строя при входном контроле — перегрев модулей при измерении напряжения насыщения и прямого падения напряжения на диоде. Для проверки указанных параметров на некоторых предприятиях были организованы измерения на постоянном токе. Конечно, из-за перегрева приборы выходят из строя. Во избежание этого контроль параметров, связанных с большими токами, должен производиться импульсными методами. Длительность импульсов тока должна быть достаточной для завершения переходных процессов в приборах и проведения измерений. Потребители, проводившие измерения статических параметров на постоянном токе, естественно, столкнулись с тем, что параметры «плывут» в результате разогрева структуры. Длительное протекание постоянного тока через модуль в некоторых случаях (при измерениях без хорошего охлаждения) привело к перегреву модуля и выходу из строя (рис. 5).

### 6. Механические повреждения модулей

#### а) Монтаж модуля на охладитель

IGBT-модуль имеет паяные соединения катушки полупроводниковыми кристаллами, платами и основанием. В связи с этим значительное механическое воздействие на корпус или основание модуля может привести к появлению трещин в кристаллах транзисторов и диодов. Кроме того, в конструкции модулей применяются детали из хрупких материалов (керамика  $Al_2O_3$  или AlN, композиционный материал AlSiC), поэтому с модулями необходимо обращаться осторожно, особенно после распаковки из транспортной тары. Запрещается ронять модули, наносить какие-либо удары по корпусу и основанию. Особенно опасны концентрированные удары по основанию модуля и по охладителю с закрепленными на нем модулями. Ударная волна передается от охладителя на основание, в результате чего создаются условия для появления трещин в кристаллах и платах модуля.

Для снижения переходного теплового сопротивления модули-охладители оснований модулей многих производителей имеют выпуклую форму. Перед креплением модуля к охладителю на основание наносится тонкий слой теплопроводящей пасты, которая заполняет пустоты, вытесняя при этом воздух. Слой пасты должен иметь минимальную толщину, так как ее теплопроводность все же относительна. При креплении модуля к охладителю с помощью винтов основание прижимается к охладителю со значительным усилием, поэтому вся лишняя нанесенная паста выдавливается наружу. Применение паст с очень высокой вязкостью может привести при монтаже модуля



Рис. 9. Трещина в кристалле IGBT, появившаяся в результате излома модуля при применении теплопроводящей пасты с высокой вязкостью

к охладителю к недопустимому изгибу медного основания и появлению трещин в металло-керамических платах и кристаллах. На фотографии (рис. 9) показана трещина на кристалле IGBT, которая появилась в результате монтажа модуля на охладитель с применением теплопроводящей пасты КПТ-8. Паста имела густую консистенцию, была нанесена толстым слоем и при монтаже практически не выдавливалась из-под модуля, вследствие чего произошла недопустимая деформация основания и механическое разрушение одного из кристаллов. При последующем приложении к модулю напряжения по трещине произошел точечный пробой, место которого также хорошо видно на фотографии. По результатам проведенных в ОАО «Электровыпрямитель» исследований, наилучшие результаты при монтаже и эксплуатации IGBT-модулей показала теплопроводящая паста НТС фирмы Electrolube.

#### б) Монтаж силовых шин

Монтаж силовых шин к IGBT-модулям должен производиться с точным соблюдением технологии сборки, а также с учетом требований к конструкции и свойствам силовых шин. Силовые выводы модулей имеют внутренние демпферы, которые предназначены для компенсации различий в температурных коэффициентах расширения деталей и практически исключают механические нагрузки в паяных контактах, возникающие при монтаже внешних шин. Тем не менее превышение допустимых механических нагрузок к выводам в процессе монтажа может привести к повреждению прибора.

Внешние силовые шины сделаны, как правило, из твердой меди и имеют высокую жесткость. При больших ( $\geq 1$  мм) зазорах между выводами модуля и шиной существует вероятность сильной деформации выводов и нарушения внутреннего контакта в модуле. В нашей практике встречались случаи, когда потребитель, используя транзисторные и диодные модули разной высоты, соединял их жесткими шинами (рис. 10). Зазор между силовой шиной и выводом центрального модуля составлял ~3 мм.

В этом случае при завертывании крепежных винтов одновременно с упругим изгибом силовой шины происходит вытягивание вывода из корпуса у модуля 2, что приводит к обрыву силового вывода внутри модуля.

Также модули не должны использоваться в качестве опор для крепления массивных силовых шин, особенно с учетом ударных и ви-

брационных нагрузок. Наилучшим решением будет крепление силовых шин на специальные опоры-изоляторы, которые принимают на себя основную механическую нагрузку.

### Заключение

Современные IGBT-модули — надежные и популярные силовые ключи, сочетающие в себе полную управляемость, высокое быстродействие и способность коммутировать большие токи. Однако их конструктивные особенности предъявляют дополнительные требования, которые необходимо учитывать при монтаже и эксплуатации в преобразовательных устройствах.

ОАО «Электровыпрямитель», предлагая широкую номенклатуру современных IGBT-модулей (NPT-standard, NPT-low loss, SPT, Trench Gate), осуществляет полную техническую поддержку потребителям данной продукции.

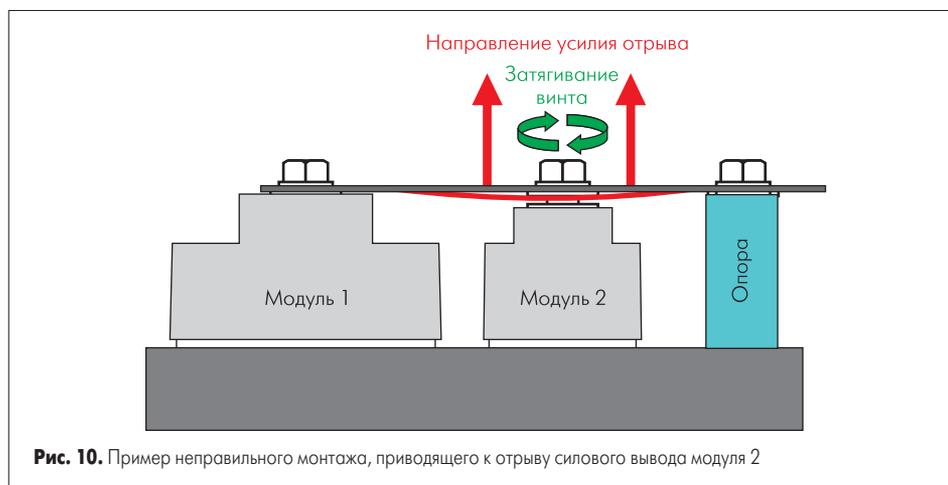


Рис. 10. Пример неправильного монтажа, приводящего к отрыву силового вывода модуля 2

По заявке потребителя производится подбор IGBT-модулей для требуемого режима эксплуатации, расчет допустимой нагрузки модуля, выбор охлаждающих систем с исполь-

зованием трехмерного теплового анализа и другие работы, направленные на обеспечение надежной эксплуатации преобразовательного оборудования.