

Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей.

Часть 2. Еще раз о высокой частоте и малых токах

В статье представлены результаты анализа особенностей эксплуатации и причин выходов из строя IGBT-модулей при высоких частотах коммутации.

**Вячеслав Мускатиньев
Михаил Тогаев
Дмитрий Немаев
Алексей Бормотов
Денис Пышков
Игорь Федяев**

nicpp@elvpr.ru

Введение

В 2005 году была опубликована наша первая статья, обобщившая опыт эксплуатации IGBT-модулей как отечественного, так и зарубежного производства [1]. В то время многие российские предприятия только начинали осваивать разработку преобразовательного оборудования с применением силовых IGBT-модулей, опыт был не всегда достаточным, поэтому представленные материалы оказались для них дополнительным инструментом, помогающим решить вопросы надежной эксплуатации IGBT.

С тех пор IGBT-технологии ушли далеко вперед, у ведущих фирм сменилось несколько поколений чипов. Для разработчиков и производителей преобразовательной техники открыт широкий выбор IGBT в разных конструктивных исполнениях (дискретные приборы, беспотенциальные модули, прижимные модули в герметичных корпусах), охватывающих большой диапазон токов (почти до 5000 А) и напряжений (200 В — 6,5 кВ), позволяющий решить практически все требуемые задачи. Высокая конкуренция на рынке преобразовательной техники диктует теперь основное требование — снижение цены и массогабаритных размеров готового изделия при сохранении потребительских характеристик, которое заставляет «выжимать» из преобразователя и, соответственно, из силовых ключей максимум возможностей для увеличения коммутируемой мощности в расчете на единицу массы (объема) оборудования.

Вопрос: MOSFET или IGBT?

Одним из путей снижения себестоимости преобразователя является повышение частоты коммутации силовых ключей, что сразу влечет как уменьшение емкости фильтра питания звена постоянного тока, так и снижение массы и габаритов дросселей и трансформаторов (при их наличии). С одной стороны, вопрос повышения частоты жесткой коммутации может быть решен применением мощных МОП-транзисторов (MOSFET), однако они уступают IGBT по блокирующему напряжению (до 1500 В), номинальному току

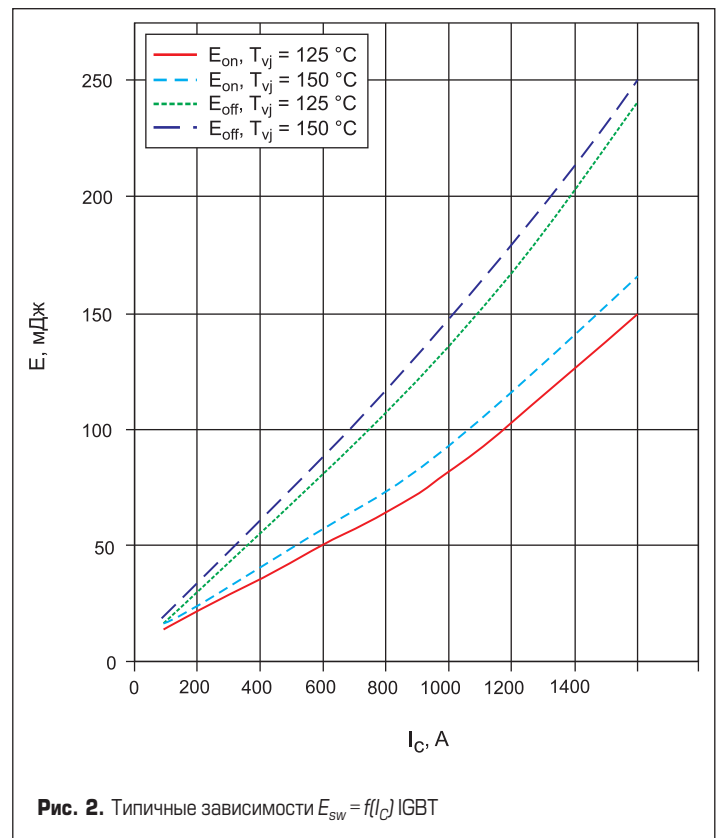
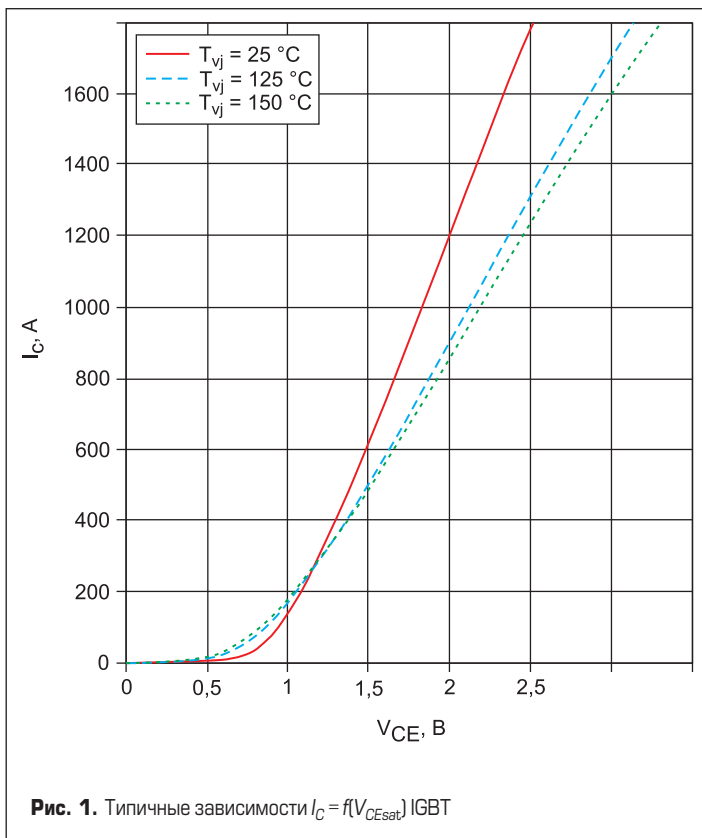
на единичный ключ и статическим тепловым потерям. Силовые MOSFET массово выпускаются в малогабаритных корпусах TO-247 и им подобных, в беспотенциальных модульных корпусах эти приборы изготавливаются в очень ограниченном ассортименте и на малые токи. В маломощных преобразователях MOSFET используются давно и успешно, для применения же в мощных ПЧ МОП-транзисторы необходимо соединять параллельно, попутно решая вопросы статической и динамической симметрии, изоляции, группового охлаждения, что также отрицательно сказывается на себестоимости преобразователя.

В мощных системах предпочтительны полностью управляемые силовые ключи в виде готовых модулей на необходимые ток и напряжение для исключения их параллельного и последовательного соединения. С этой точки зрения оптимальны именно IGBT.

В таблице представлены сведения по оптимальным частотам коммутации в зависимости от технологии и класса по напряжению IGBT-модулей [2], выпускаемых ПАО «Электровыпрямитель».

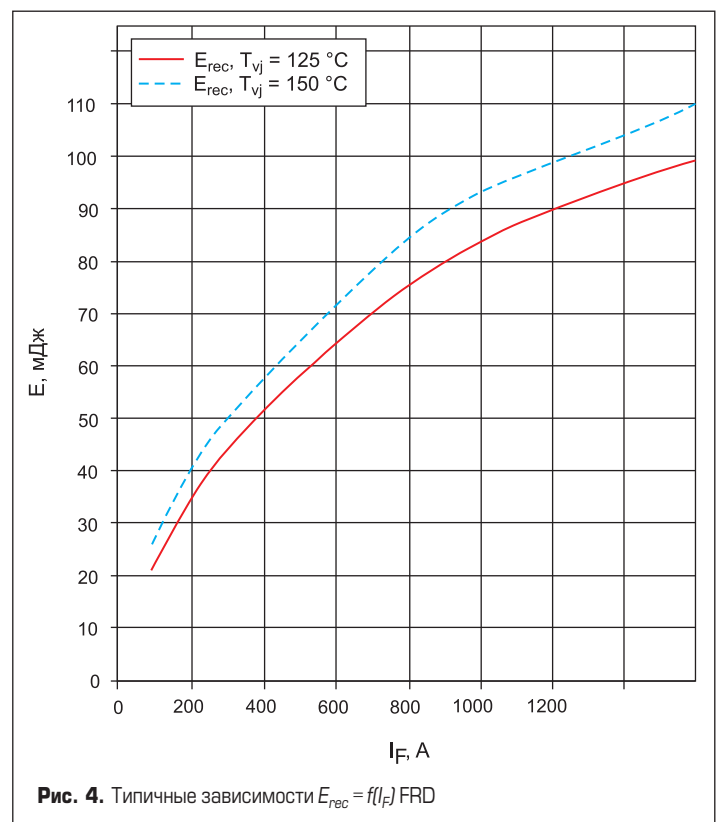
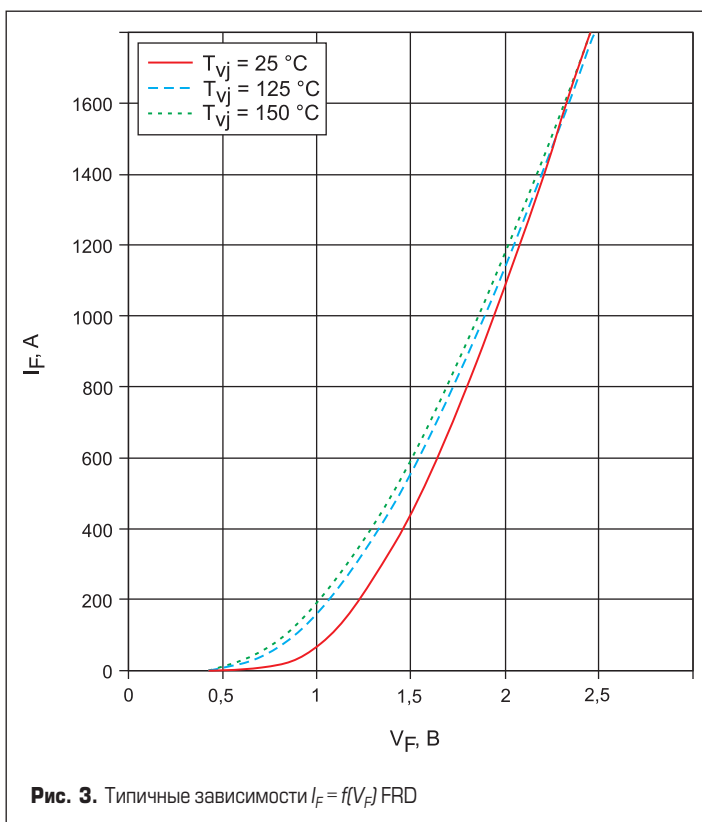
Таблица. Оптимальные частоты коммутации в зависимости от технологии и класса по напряжению IGBT-модулей, выпускаемых ПАО «Электровыпрямитель»

Напряжение, В	IGBT-технология	Диапазон оптимальных частот коммутации, кГц
600	NPT Low Loss	10–20
	IGBT3 Trench	2–5
1200	IGBT4 Trench	2–8
	IGBT4 Fast Trench	8–20
	NPT Standard	4–12
	NPT Ultrafast	15–25
	NPT Ultrafast с диодами Шоттки	25–50
1700	IGBT3 Trench	1–3
	IGBT4 Trench	1–5
3300	SPT Low Loss	0,5–1,5
	SPT Standard	1–2
4500	SPT Low Loss	0,5–1
	SPT Standard	0,5–1,5
6500	SPT Low Loss	0,2–0,5



С одной стороны, оптимальной принято считать частоту коммутации, при которой суммарные статические потери энергии в IGBT и FRD равны суммарным динамическим ($E_{on} + E_{off} + E_{rec}$). Потери рассчитываются по соответствующим зависимостям (рис. 1–4), приведенным в информационных материалах (datasheets). С другой стороны, это не догма, рабочая частота может варьироваться в зависимости от решаемой задачи. Снижение рабочей частоты вплоть до нуля, когда IGBT используется в качестве ключа постоянного тока, безусловно, допустимо. Также допустима и повышенная частота коммутации. Главным условием во всех случаях является одно: не превышать предельно допу-

стимуемую температуру полупроводниковой структуры в любом режиме. На низких частотах величина рабочего тока IGBT-модуля может быть и выше, чем классификационное значение, указанное в информационных материалах, при условии эффективного охлаждения, например жидкостного [3]. Казалось бы, аналогично можно поступить и для повышенных частот коммутации — снизить рабочий ток через модуль, выбрать режим охлаждения, чтобы расчетная температура кристалла была несколько меньше предельно допустимой с заданным запасом (обычно +10...+15 °C), — и достаточно! Однако все просто только на первый взгляд...



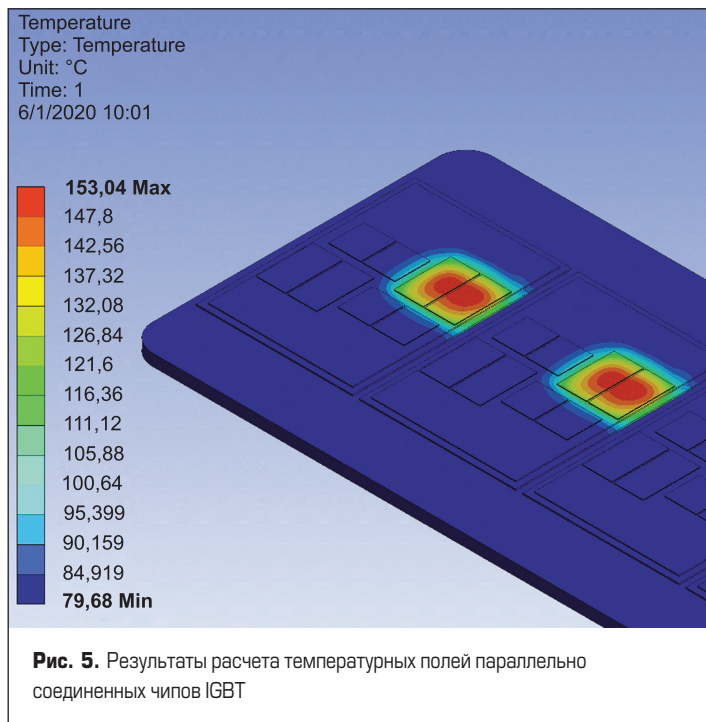


Рис. 5. Результаты расчета температурных полей параллельно соединенных чипов IGBT

Все хорошо, если бы полупроводниковая структура нагревалась по всей площади одинаково. Обеспечение максимально равномерного нагрева полупроводникового ключа — одна из главных задач в силовой электронике, так как ее решение дает возможность эксплуатации силовых полупроводниковых приборов (СПП) при максимальной нагрузке, что также снижает суммарную себестоимость оборудования. Но нет ничего идеального, неравномерность распределения температур в силовом ключе всегда существует и связана со многими факторами. Это и разброс электрофизических параметров полупроводниковой структуры, и технологические допуски, и различная эффективность отвода тепла по площади кристалла, и взаимное влияние чипов в многокристалльных модулях, и т. д. (рис. 5).

Если рассматривать только IGBT, то эти СПП имеют замечательную особенность — положительный температурный коэффициент напряжения насыщения коллектор-эмиттер (V_{CEsat}) [4]. В информа-

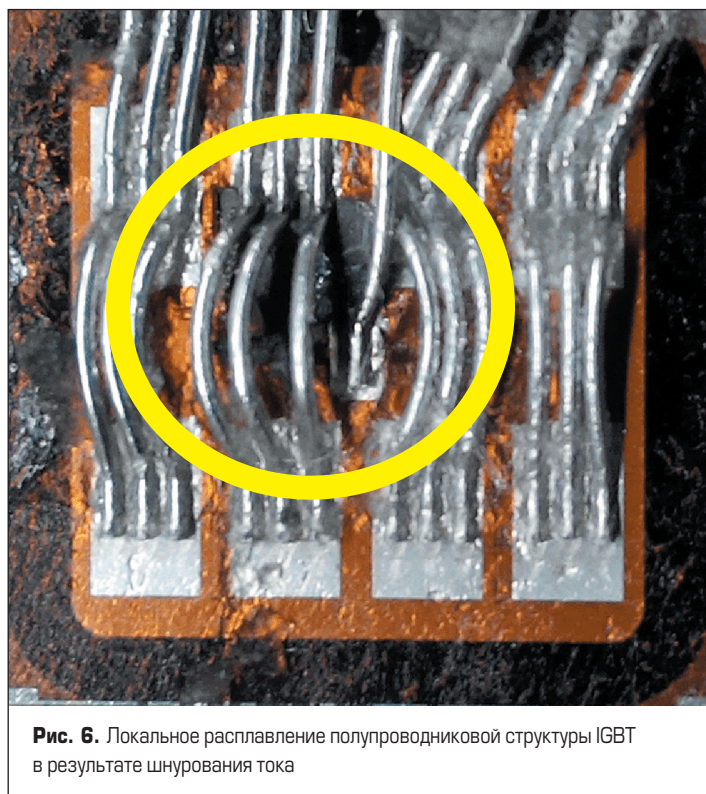


Рис. 6. Локальное расплавление полупроводниковой структуры IGBT в результате шнурования тока

ционных материалах на IGBT-модули всегда приводятся два значения напряжения насыщения: при комнатной и максимально допустимой температурах кристалла, и всегда в «горячем» состоянии значение V_{CEsat} больше, чем в «холодном». Положительная температурная зависимость V_{CEsat} и является системой обратной связи, которая обеспечивает снижение плотности тока в наиболее нагретых транзисторах, соединенных параллельно. Это относится и к единичному кристаллу IGBT, состоящему из большого числа элементарных транзисторов, и к мультичиповым модулям, и к нескольким модулям или дискретным приборам, соединенным в параллель в силовой схеме. Однако вернемся к информационным материалам. Значения V_{CEsat} указаны при одном (классификационном) значении тока коллектор-эмиттер, который соответствует максимально допустимому постоянному току через модуль при заданной температуре корпуса (например, +80 °C). При реальной эксплуатации ток через IGBT всегда ниже классификационного (обычно 0,5–0,7 I_{Cmax}), поскольку к статическим потерям добавляются коммутационные, следовательно, растет разность температур между кристаллом и теплоотводящим элементом корпуса (основанием). И чем выше частота, тем больше вклад динамических потерь в суммарную греющую мощность.

Решаем задачу № 1: увеличиваем частоту и улучшаем охлаждение

Применение жидкостных охладителей несколько повысит себестоимость преобразователя, при этом может позволить (в сравнении с воздушными системами) увеличить суммарную допустимую мощность потерь в IGBT в самом лучшем случае в 2–2,5 раза (при снижении температуры корпуса IGBT до комнатной температуры). Примерно в такой же пропорции можно увеличить и рабочую частоту при неизменном значении тока. Дальнейшее улучшение эффективности охлаждения, в том числе с помощью низкотемпературных испарительных и криогенных систем, повлечет за собой несоизмеримые экономические издержки.

Решаем задачу № 2: увеличиваем частоту и снижаем рабочий ток

Статические потери снижаются (несмотря на то, что при высокой частоте их вклад в общие потери уменьшается, их нужно учитывать), динамические — увеличиваются (с уменьшением тока потери на один период коммутации также снижаются, но суммарные коммутационные — растут с повышением частоты). Общие потери мощности остаются прежними, поэтому расчетная температура кристалла IGBT также должна остаться неизменной, при этом нельзя не учитывать один фактор, который часто оказывается решающим при малых токах коллектор-эмиттер. Речь идет об упомянутом ранее температурном коэффициенте напряжения насыщения (ТКН).

Выходные вольт-амперные характеристики IGBT (рис. 1) и прямые ВАХ диодов (рис. 3) имеют точки инверсии температурных зависимостей напряжения, в которых ТКН меняет знак. Если постоянный ток через кристалл выше точки инверсии, то ТКН положительный, если ниже — отрицательный. Например, для модуля M2ТКИ-900-12КН, имеющего классификационный ток 900 А, точка инверсии соответствует току 250–270 А (рис. 1). Поэтому при токе коллектор-эмиттер менее 250 А через более нагретые области кристалла будет протекать ток большей плотности, чем в более холодных. И этот тепловой разбаланс будет тем больше, чем меньше ток через IGBT (точнее — плотность тока через полупроводниковую структуру). Поэтому фактическая температура в отдельных точках кристалла будет выше, чем расчетная. И в определенный момент, при дальнейшем повышении частоты и снижении тока, процесс локального нагрева становится лавинообразным, тепло от наиболее нагретых областей IGBT не успевает отводиться, происходит шнурование тока и точечное расплавление полупроводникового кристалла (рис. 6). Этот процесс происходит без разрушения корпуса модуля, так как пробой в большинстве подобных случаев наблюдается на одном кристалле IGBT (в мультичиповых модулях).

Безусловно, при эксплуатации отрицательный ТКН не всегда приводит к фатальным последствиям. Если дополнительно снизить общую

расчетную (и фактическую) температуру эксплуатации IGBT, то тепло из областей локального нагрева будет успевать отводиться и распределяться по кристаллу и значительного перегрева может не произойти. Несмотря на эти рассуждения, на практике бывают случаи, когда у потребителя модули выходят из строя уже через несколько секунд после включения, не успев прогреться. Анализ показал, что они эксплуатировались при частотах на порядок выше рекомендуемых, а ток нагрузки не превышал 10% от классификационного значения. Повреждения чипов имеют вид, аналогичный показанному на рис. 6.

Шнурование тока не происходит, если ТКН отрицательный, но его температурная зависимость незначительная или скажженность импульсов достаточно большая. Например, диоды обратного тока в том же модуле M2TKI-900-12KH при типичном рабочем токе 450 А функционируют ниже точки инверсии (1650 А) при отрицательном ТКН. Однако режим работы диодов таков, что через них протекает прямой ток в течение очень малой длительности (только в течение «мертвого времени» IGBT в инверторе), далее следует процесс обратного восстановления, после чего на диоде в течение периода энергия не выделяется и происходит выравнивание температуры и отвод тепла от кристалла. Следует повторить, что диод нормально работает при оптимальных частотах коммутации. Если частота существенно повышается, то при неизменном «мертвом времени» увеличивается суммарное время нахождения диода в прямом направлении, что значительно увеличивает риск локального разогрева диода и выход его из строя [1].

В общем, повышение частоты коммутации с целью снижения общей себестоимости и массогабаритных параметров оборудования допустимо в разумных пределах, и это решение должно обязательно проверяться всесторонними испытаниями преобразователя. И все же основным критерием выбора IGBT-модуля должен быть рабочий ток модуля, который должен быть выше (в крайнем случае можно допустить незначительно ниже) точки инверсии ТКН. И только после этого можно переходить к следующим этапам проектирования преобразователя: расчетам суммарных потерь и температуры кристалла, выбору системы охлаждения и при необходимости переходу к более высокочастотным модулям с таким же классификационным током, в том числе к гибридным IGBT с диодами Шоттки или MOSFET.

Заключение

Современные IGBT — силовые ключи, обладающие уникальной надежностью. Предельные температуры, указанные в информационных материалах, даны с очень солидным запасом. Большой объем исследований и экспериментов, проведенный инженерами ПАО «Электровыпрямитель» с начала освоения производства российских IGBT-модулей, показал, что IGBT могут сохранять работоспособность даже в экстремальных режимах (при надежных исследованиях некоторые IGBT-модули сохраняли работоспособность даже при температурах кристалла выше температуры плавления припоя). Однако для надежной многолетней эксплуатации преобразовательной техники крайне важно выбрать силовые ключи, максимально соответствующие исходной задаче, в первую очередь по частотным характеристикам, с учетом особенностей охлаждения и температурных зависимостей. Тем более что выбор модулей в настоящее время есть практически для решения любых задач [2].

Коллектив разработчиков IGBT-модулей ПАО «Электровыпрямитель» всегда готов оказать всестороннюю техническую поддержку потребителей, включая выбор модулей, расчет режимов эксплуатации и охлаждения, анализ причин выходов из строя (в том числе импортных модулей) и всестороннюю помощь в решении проблем с IGBT.

Разработки и исследования продолжаются...

Литература

1. Бормотов А., Мартыненко В., Мускатиньев В. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей // Компоненты и технологии. 2005. № 5.
2. www.elvpr.ru
3. Биктиев Р., Немаев Д., Мускатиньев В., Кучумова М., Мещеряков В., Гришанин А. Высокоэффективные жидкостные охладители для изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2019. № 6.
4. Volke A., Hornkamp M. IGBT Modules. Technologies, Driver and Application, Infineon Technologies AG, 2011.