

# Параметры и характеристики IGBT-модулей

## на напряжение 1200 В при низких температурах

**В статье представлены результаты исследований параметров и характеристик IGBT-модулей производства ПАО «Электровыпрямитель» на напряжение 1200 В при отрицательных температурах, даны рекомендации по эксплуатации приборов в условиях воздействия низких температур.**

**Вячеслав Мускатиньев**

**Михаил Тогаев**

**Валентин Мартыненко**

**Алексей Бормотов**

nicpp@elvpr.ru

### Введение

Эксплуатация полупроводниковых приборов всегда связана с их нагревом, а большинство их выходов из строя происходит из-за перегрева полупроводниковой структуры (общего, локального и пр.). Поэтому подавляющий объем информации, касающийся эксплуатации полупроводниковой техники, особенно силовых полупроводниковых приборов (СПП), посвящен именно предотвращению перегрева. В настоящее время развитие IGBT-модулей направлено на увеличение рабочей температуры кристалла, с этой целью проводится совершенствование как параметров полупроводниковых структур IGBT и FRD, так и конструкции и технологии сборки готовых приборов.

В течение нескольких последних лет деятельность человека значительно активизировалась в направлении дальнейшего освоения холодных климатических зон Земли, в том числе Арктики. Кроме этого, многие территории России регулярно подвергаются воздействию низких температур. Отказы и нестабильная работа преобразовательной техники, которая во многих случаях обеспечивает функционирование важных объектов, в таких условиях могут ставить под угрозу работоспособность всего оборудования. Поэтому вопрос надежной эксплуатации IGBT-модулей, как одного из основных компонентов современной преобразовательной техники, в условиях сильных морозов сегодня представляется весьма актуальным.

С одной стороны, при эксплуатации любой СПП нагревается под воздействием выделяемой энергии потерь, и низкая температура окружающей среды оказывается полезной, так как прибор более эффективно охлаждается. Например,

в авиационной технике, которая эксплуатируется при температурах за бортом  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, в настоящее время успешно используется большое количество силовых полупроводниковых модулей повышенной надежности для управления электроприводом различных механизмов. Однако начало работы и прогрев авиационного оборудования происходит в относительно «теплых» условиях, и на мороз полупроводники попадают уже нагретыми и во включенном состоянии остаются в ходе всего полета, поэтому полупроводниковые структуры не подвергаются сильному охлаждению. Надежные преобразователи для суровых климатических условий должны обеспечивать безотказный холодный пуск после глубокого и длительного охлаждения.

В информационных материалах на IGBT-модули имеются полноценные сведения по их применению, однако приведенные характеристики относятся только к нормальным ( $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и предельно допустимым ( $+125$  или  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температурным условиям. Из низкотемпературных параметров присутствуют только сведения о минимальных температурах хранения и эксплуатации. Для высоковольтных модулей с максимально допустимыми напряжениями коллектор-эмиттер 2500 В и выше некоторые производители указывают информацию о снижении предельно допустимого напряжения коллектор-эмиттер при минимально допустимой температуре полупроводникового элемента. Этой информации, как показала практика, крайне недостаточно для разработчиков преобразователей, особенно для расчета режимов холодного пуска.

В данной статье приведены результаты исследований параметров и характеристик IGBT-модулей на напряжение 1200 В при низких температурах,

проведенных в ПАО «Электровыпрямитель». Исследования выполнены для четырех типов модулей:

1. M2TKI2-50-12 (NPT Standard).
2. M2TKI-50-12K (Trench Gate 3).
3. M2TKI-50-12Ч (NPT Fast).
4. M2TKI-50-12ЧШ (NPT Fast + SiC Schottky diode).

Выбранные модули являются основными типопредставителями выпускаемых ПАО «Электровыпрямитель» нескольких серий IGBT-модулей, отличающихся структурой чипов IGBT и FRD, поэтому результаты исследований могут быть применены ко всем модулям соответствующих серий.

Измерения динамических параметров проводились по стандартной методике в соответствии со стандартом IEC 60747-9 [1].

### Статические параметры

Важнейшими параметрами любого полупроводникового прибора являются блокирующее напряжение и обратный ток утечки. Общеизвестно, что с ростом температуры *p-n*-перехода величины как напряжения лавинного пробоя, так и тока утечки растут. Соответственно, при низких температурах наблюдается обратный эффект, который необходимо оценить численно. Сразу нужно оговориться, что значения обратных токов утечки, а также токов утечки затвора оказались настолько малы, что далее рассматривать их не имеет смысла.

На рис. 1 представлены температурные зависимости напряжения лавинного пробоя коллектор-эмиттер и порогового напряжения затвор-эмиттер при температурах до +25 °С.

Зависимости на рис. 1а подтверждают, что напряжение пробоя  $V_{BR(ces)}$  практически линейно снижается с уменьшением температуры, при этом модули M2TKI-50-12Ч и M2TKI-50-12ЧШ при температуре до -50 °С имеют наименьшее значение, практически равное 1200 В.

Пороговое напряжение затвор-эмиттер (рис. 1б) растет с уменьшением температуры, однако при максимальном охлаждении у всех модулей остается в пределах нормы.

На рис. 2 представлены температурные зависимости напряжения насыщения коллектор-эмиттер IGBT и импульсного прямого напряжения диода обратного тока.

Зависимости на рис. 2а наглядно характеризуют рост напряжения насыщения при понижении температуры, связанный со снижением эффекта модуляции проводимости высокоомной *n*-области коллектора из-за уменьшения подвижности носителей заряда. При этом модули M2TKI-50-12Ч и M2TKI-50-12ЧШ демонстрируют очень резкий рост  $V_{CESat}$ , поскольку чипы IGBT оптимизированы для работы на высоких частотах, а высокий уровень модуляции проводимости увеличивает время выключения IGBT. При температуре -50 °С напряжение насыщения модулей «Ч» и «ЧШ» достигает 40–50 В.

С понижением температуры значение импульсного прямого напряжения диода  $V_F$

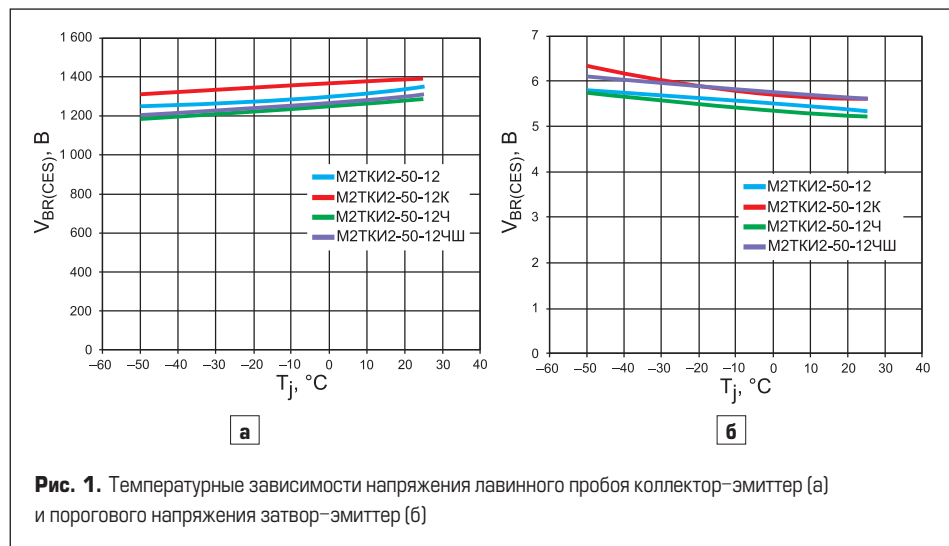


Рис. 1. Температурные зависимости напряжения лавинного пробоя коллектор-эмиттер (а) и порогового напряжения затвор-эмиттер (б)

всех модулей (рис. 2б) изменяется незначительно.

### Динамические параметры

Коммутационные характеристики IGBT и FRD очень сильно связаны между собой при включении IGBT, поэтому испытания проведены в схеме полумоста в режиме, аналогичном работе транзистора и диода в реальной схеме преобразователя. Режим испытаний для всех модулей одинаков ( $V_{CC} = 600$  В,  $I_C = 50$  А), но при различных значениях резистора в цепи затвора  $R_G$ . Значения  $R_G$  соответствуют минимальным рекомендованным значениям сопротивлений из информационных материалов на данные модули.

На рис. 3 представлены обобщенные сведения о температурных зависимостях динамических параметров для всех испытанных модулей.

Из зависимостей, представленных на рис. 3, видна очень слабая температурная зависимость времен задержки  $t_{d(on)}$  и  $t_{d(off)}$ . Времена нарастания также практически не изменяются, за исключением модуля Trench gate, у которого  $t_r$  при низкой температуре снижается примерно на 15%.

Наиболее заметны изменения значений времени спада (рис. 3б). При температуре -50 °С модуль M2TKI2-50-12 снизил время спада на 20%, M2TKI-50-12K — на 40%, а частотные M2TKI-50-12Ч и M2TKI-50-12ЧШ — на 45%. Соответственно, снижение  $t_f$  ведет к уменьшению коммутационных потерь при выключении  $E_{off}$  (рис. 3в).

Резкое увеличение энергии потерь при включении у модулей M2TKI-50-12Ч и M2TKI-50-12ЧШ с понижением температуры (рис. 3б), несмотря на слабую зависимость  $t_r = f(T)$ , связано с существенным повышением напряжения насыщения  $V_{CESat}$ , которое влияет на расчет значения  $E_{on}$  в соответствии с методикой IEC 60747-9.

Что касается диодов, результат исследований оказался предсказуемым: для всех кремниевых диодов наблюдается плавное снижение  $t_{rr}$  и  $E_{rec}$  с уменьшением температуры (рис. 3г), а SiC-диоды Шоттки показывают очень низкие и слабо зависящие от температуры значения  $t_{rr}$  и  $E_{rec}$ .

### Рекомендации по применению

Обобщая результаты проведенных исследований, можно выделить два момента, на которые

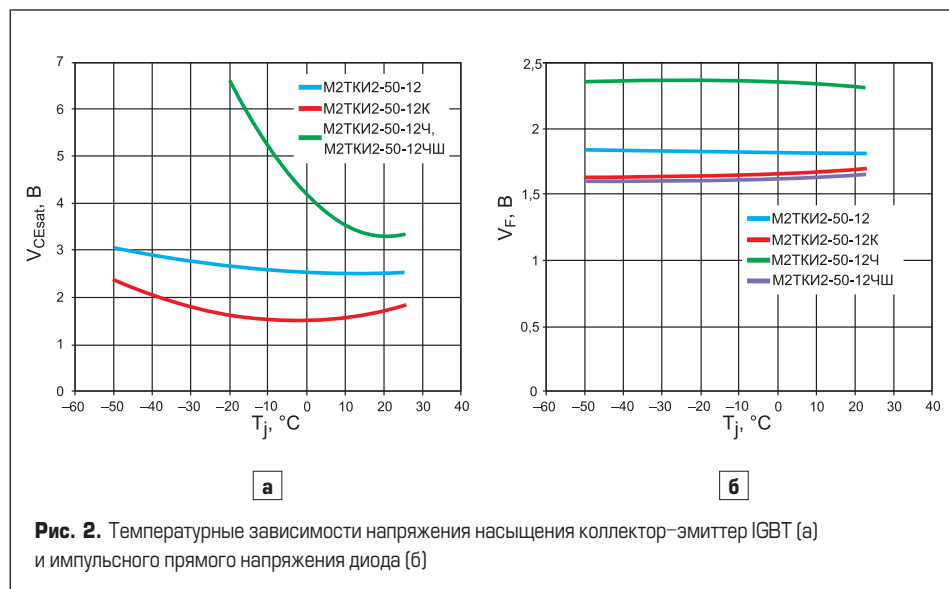


Рис. 2. Температурные зависимости напряжения насыщения коллектор-эмиттер IGBT (а) и импульсного прямого напряжения диода (б)

необходимо обращать внимание при разработке преобразовательной техники, предназначенной для эксплуатации при низких температурах.

1. Сочетание эффектов снижения напряжения лавинного пробоя  $V_{BR(ces)}$ , уменьшения

времени спада тока  $t_f$  и, соответственно, увеличение  $di/dt$  при выключении модуля могут привести к возникновению коммутационных перенапряжений из-за паразитных индуктивностей силовой цепи, сравнимых

с напряжением пробоя IGBT. Варианты решения: оптимизация конструкции с целью снижения паразитных индуктивностей, обеспечение КТЗ по рабочему напряжению и применение эффективных снабберов. Увеличение значения  $R_C$  нецелесообразно, поскольку слабо влияет на скорость выключения модуля.

2. Большинство драйверов имеет аппаратную систему защиты IGBT от короткого замыкания, которая основана на непрерывном мониторинге напряжения насыщения транзистора. При холодном пуске преобразователя, в котором применены частотные модули серий «Ч» и «ЧШ», аппарат может просто не включиться, так как напряжение насыщения в этом случае может быть выше порога срабатывания защиты и драйвер при попытке включения сразу заблокирует пуск. Для этого может быть использовано несколько решений: предварительный подогрев силовой части от внешнего источника тепла, применение взамен модулей серий «Ч» и «ЧШ» менее быстродействующих приборов (стандартных или Trench Gate), временная блокировка мониторинга драйвером напряжения  $V_{CE}$  при пуске преобразователя на период прогрева модулей. Последний вариант нежелателен, поскольку чреват повышенной вероятностью выхода из строя силовой части преобразователя при коротком замыкании в нагрузке из-за невозможности своевременного выключения IGBT.

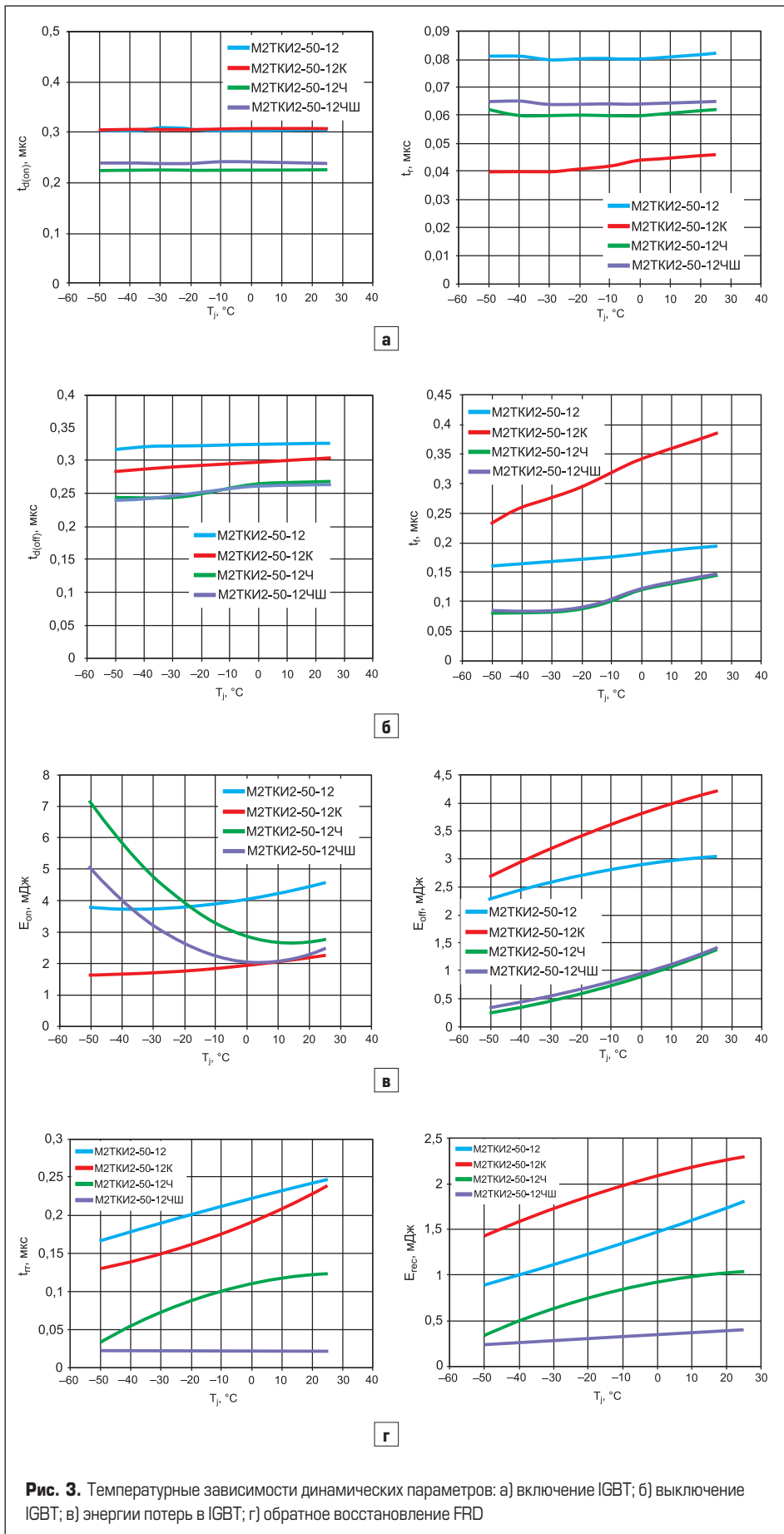
**Заключение**

В большинстве случаев подробные информационные материалы (datasheets) разрабатываются с учетом эксплуатации силовых полупроводниковых приборов в нормальных условиях. Низкие эксплуатационные температуры могут одновременно с некоторой пользой (улучшение охлаждения СПП) принести неожиданные сюрпризы, способные вырасти в существенные проблемы. Чтобы это предотвратить, разработчики IGBT-модулей ПАО «Электровыпрямитель» всегда готовы ответить на вопросы потребителей и провести необходимые дополнительные тесты своих изделий.

Пока проведены низкотемпературные исследования только модулей на напряжение 1200 В. На очереди — высоковольтные IGBT. Испытания продолжаются...

**Литература**

1. IEC 60747-9 Semiconductor devices — Part 9: Discrete devices: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs).
2. Volke A., Hornkamp M. IGBT Modules. Technologies, Driver and Application. Infineon Technologies AG, Munich, 2010.
3. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability. Springer, 2011.



**Рис. 3.** Температурные зависимости динамических параметров: а) включение IGBT; б) выключение IGBT; в) энергии потерь в IGBT; г) обратное восстановление FRED