

# Преимущества замены IGBT на SiC-модули

## В СИЛОВЫХ СБОРКАХ

**В последние годы карбидокремниевые (SiC)MOSFET с рабочим напряжением 1,2 и 1,7 кВ стали реальной альтернативой для проектировщиков силовых конвертеров, в настоящее время использующих транзисторы IGBT. На сегодня большинство «побед» SiC MOSFET принадлежит маломощным преобразователям в диапазоне до 20 кВт, разрабатываемым «с чистого листа». В первую очередь эта тенденция обусловлена необходимостью повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей и других промышленных устройств силовой электроники.**

**Джон Мооккен  
(John Mookken)**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

**Валерия Смирнова**

cree@macrogroup.ru

Специалисты начали применять коммерчески доступные мощные All-SiC силовые модули и драйверы (рис. 1) как для модернизации существующих систем на основе Si IGBT, так и при разработке новых конструкций, специально адаптированных для максимально эффективного использования преимуществ новых SiC-приборов, позволяющих создавать компактные и более эффективные преобразователи энергии.

### Замена Si IGBT на SiC в силовых сборках

Преимущества SiC, как материала, перед Si в силовых приборах хорошо изучены и не требуют дальнейшего анализа [1, 2]. Таким образом, наши усилия будут сосредоточены на применении All-SiC модулей в мощных преобразовательных системах. Выпускаемая

серийно сборка на основе 62-мм модулей Si-IGBT (1200 В/400 А), содержащая конденсаторы звена постоянного тока, радиатор и вентилятор системы принудительного воздушного охлаждения, плату управления с устройством защиты, а также датчики, была выбрана для переделки на карбидокремниевые ключи и испытаний для оценки улучшения производительности.

На рис. 2 показана готовая сборка на базе стандартных модулей 62 мм, которая используется в качестве референтного IGBT-инвертора (до преобразования) или SiC-инвертора (после преобразования). Ее основные технические характеристики представлены на рис. 2, дополнительные сведения доступны в спецификации производителя. При номинальной справочной выходной мощности 140 кВт (ток 200 Arms) на частоте переключения  $F_{sw}$  3 кГц, эта 200-А сборка является самой маленькой в семействе. Она представляет собой хороший



**Рис. 1.** Мощные All-SiC модули 12-го и 17-го класса с драйверами затворов — реальная альтернатива IGBT

пример универсального преобразователя, построенного на базе стандартных модулей, широко используемого в солнечной энергетике и электроприводах.

Процесс замены IGBT-ключей в сборке на SiC-приборы оказался достаточно простым благодаря наличию All-SiC силовых модулей в таком же конструктиве, а также совместимых драйверов затворов, выполняющих функции, имеющиеся в типовых схемах управления IGBT.

На рис. 3 представлены все произведенные изменения. Дополнительные конденсаторы в звене постоянного тока добавлены для тестирования устройства при больших выходных токах. Три 400-А IGBT-модуля заменены на All-SiC-ключи с номинальными параметрами 1200 В/300 А, а вместо трехфазного драйвера затворов IGBT установлены три двухканальные платы управления SiC.

Одна из немногих механических модификаций сборки состоит в изменении положения драйверов затворов относительно исходного положения (примерно в 20 см от силовых модулей). В окончательном варианте они смонтированы непосредственно на карбидкремниевых модулях. Это связано с более высокой скоростью переключения SiC-ключей и необходимостью минимизации влияния паразитных индуктивностей и емкостей соединительных цепей.

Модули SiC MOSFET (1200 В/300 А) со встроенными встречно-параллельными диодами Шоттки имеют пять основных преимуществ относительно замененных в сборке 400-А модулей IGBT 12-го класса:

- меньшие потери коммутации;
- меньшие потери проводимости;
- пренебрежимо малые динамические потери SiC-диодов Шоттки;
- большее блокирующее напряжение;

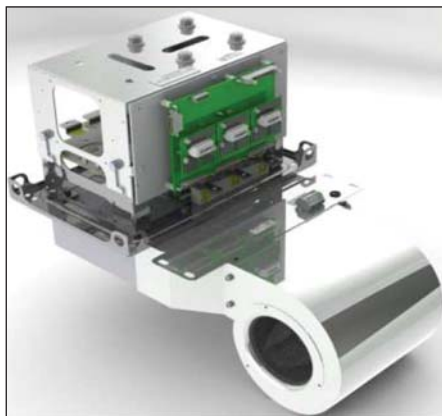


Рис. 2. Коммерческая сборка IGBT и ее основные параметры

Key Max. Parameters		Units
$I_{out}$	200	Arms
$V_{out}$	400	Vac
$V_{bus}$	900	VDC
$F_{out}$	500	Hz
$F_{sw}$	25	KHz
$P_{out,max} @ F_{sw} = 3 \text{ kHz}$ 750 VDC, PF = 1, 400 Vac & 900 m3/hr @ 40 C cooling	140	kW

• высокий иммунитет к космическому излучению, воздействие которого сокращает срок службы и даже приводит к единичным отказам.

Общеизвестно, что SiC-транзисторы имеют низкие потери переключения, что видно из сравнения Si-IGBT с быстрым антипараллельным диодом (FRD) и аналогичного SiC MOSFET с SiC-диодом Шоттки в полумостовой схеме (рис. 4а). Графики на рис. 4б демонстрируют, что SiC-диоды Шоттки практически не имеют заряда обратного восстановления и это свойство сохраняется в диапазоне температур +25...+150 °С, что способствует снижению энергии включения  $E_{on}$  MOSFET и заметно снижает потери переключения диода.

Менее известен факт, что общее значение коммутационных потерь  $E_{top}$  представляющее собой сумму потерь включения и выключения, в SiC-транзисторах фактически остается неизменным или уменьшается (в некоторых случаях на 10–25%) с ростом температуры кристаллов,

в то время как у кремниевых IGBT наблюдается обратный эффект. Таким образом, при реальных рабочих температурах разница  $E_{tot}$  между Si IGBT и SiC MOSFET более выражена, чем при комнатной температуре.

Чтобы оценить потери проводимости  $E_{cond}$  сравним прямые характеристики IGBT с номинальным током 50 А и SiC MOSFET с различными токовыми номиналами. На рис. 5 видно, что эквивалентный 50-А SiC-транзистор имеет примерно половину потерь проводимости. Кроме того, нет необходимости заменять 50-А IGBT на такой же SiC, чтобы получить аналогичную производительность. SiC MOSFET с номинальным током 40 А и 50-А IGBT имеют одинаковые потери проводимости при номинальном токе  $I_{Cnom}$  IGBT. Соответственно, можно предположить, что оба прибора имеют близкие показатели  $E_{cond}$ .

Необходимо отметить, что величина  $I_{Cnom}$  IGBT — это предельный постоянный ток при заданной температуре корпуса без учета дина-

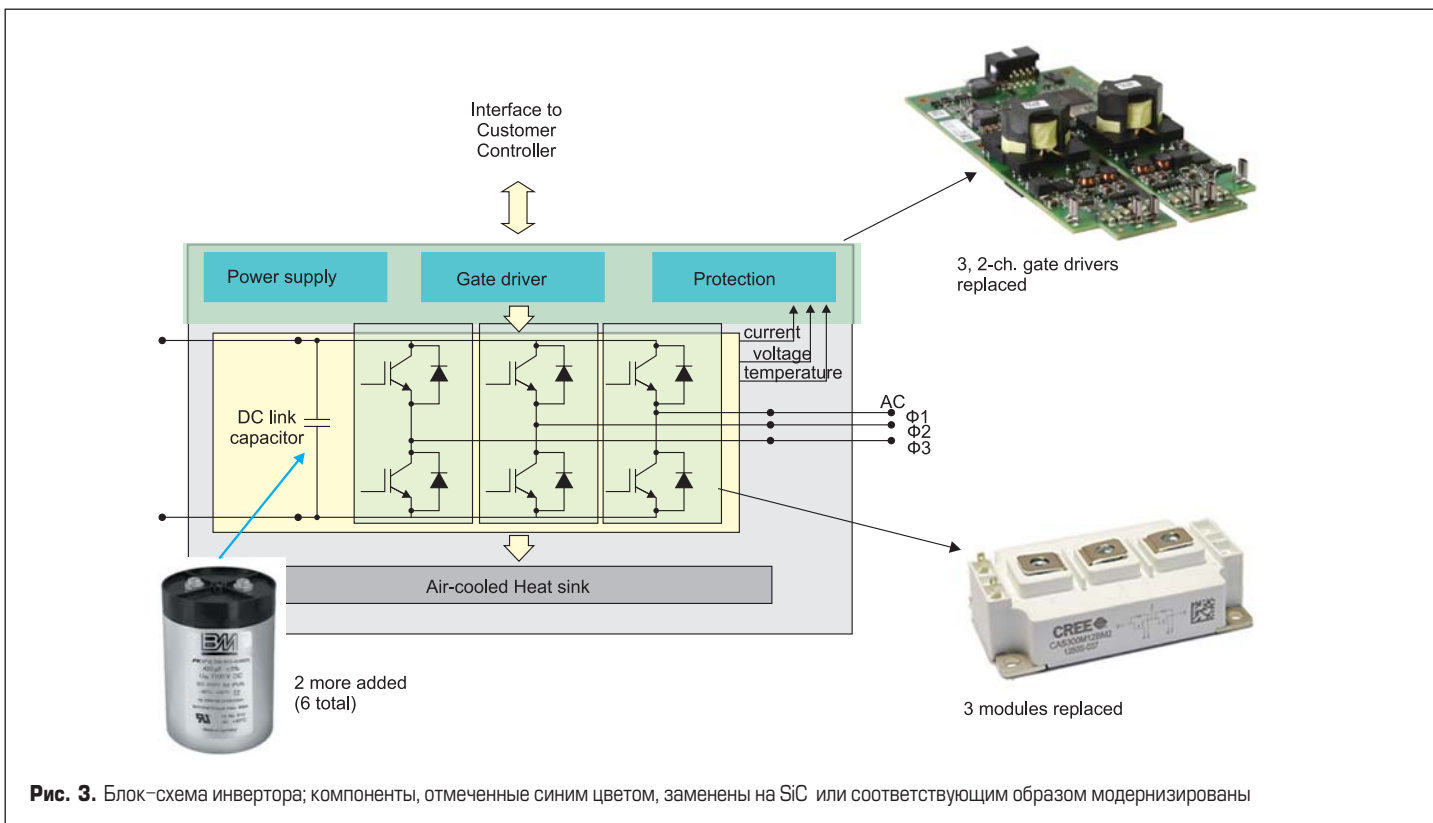
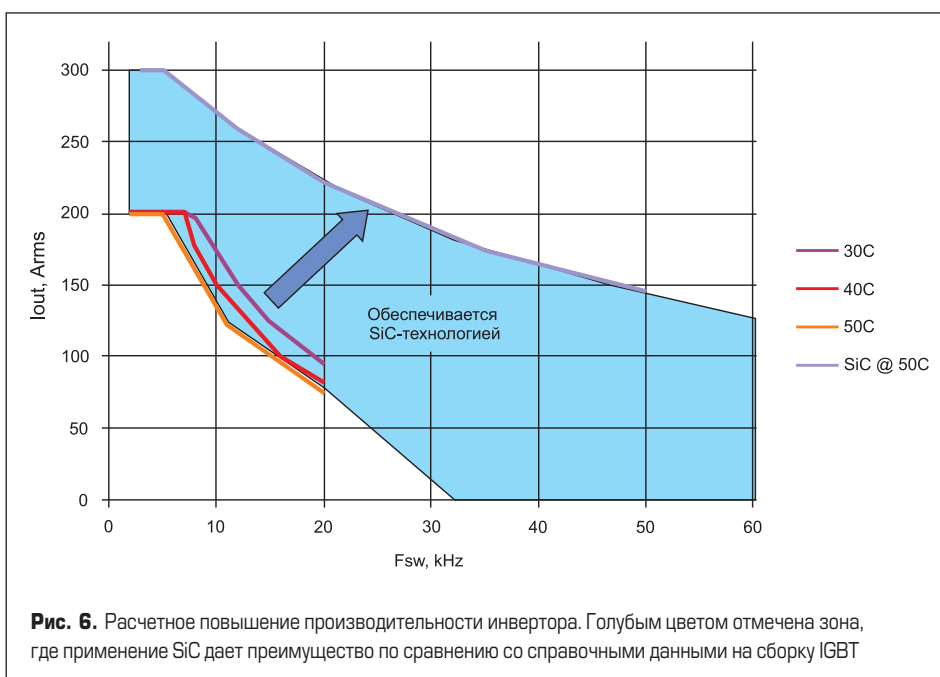
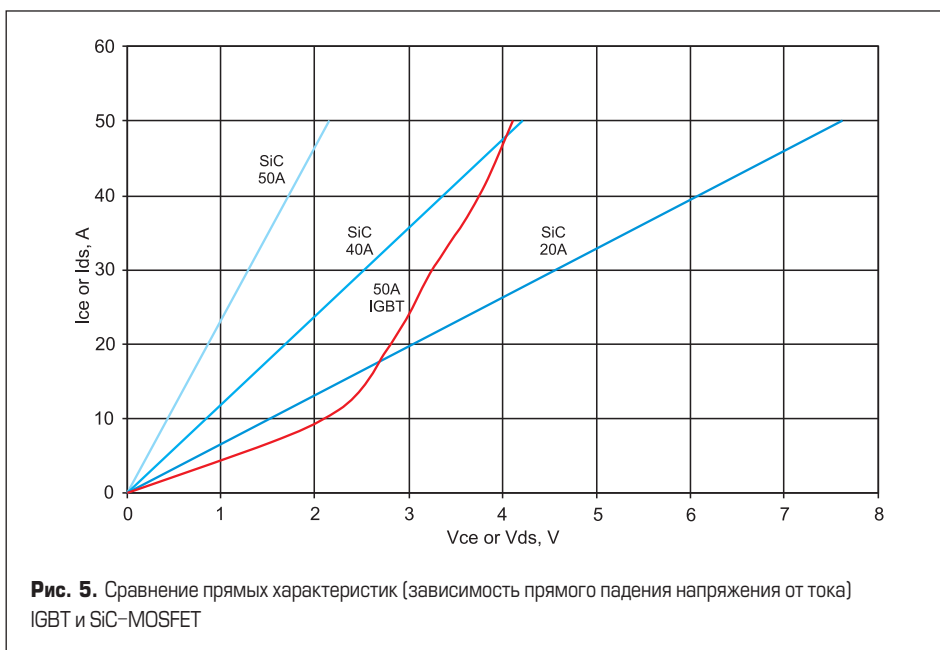
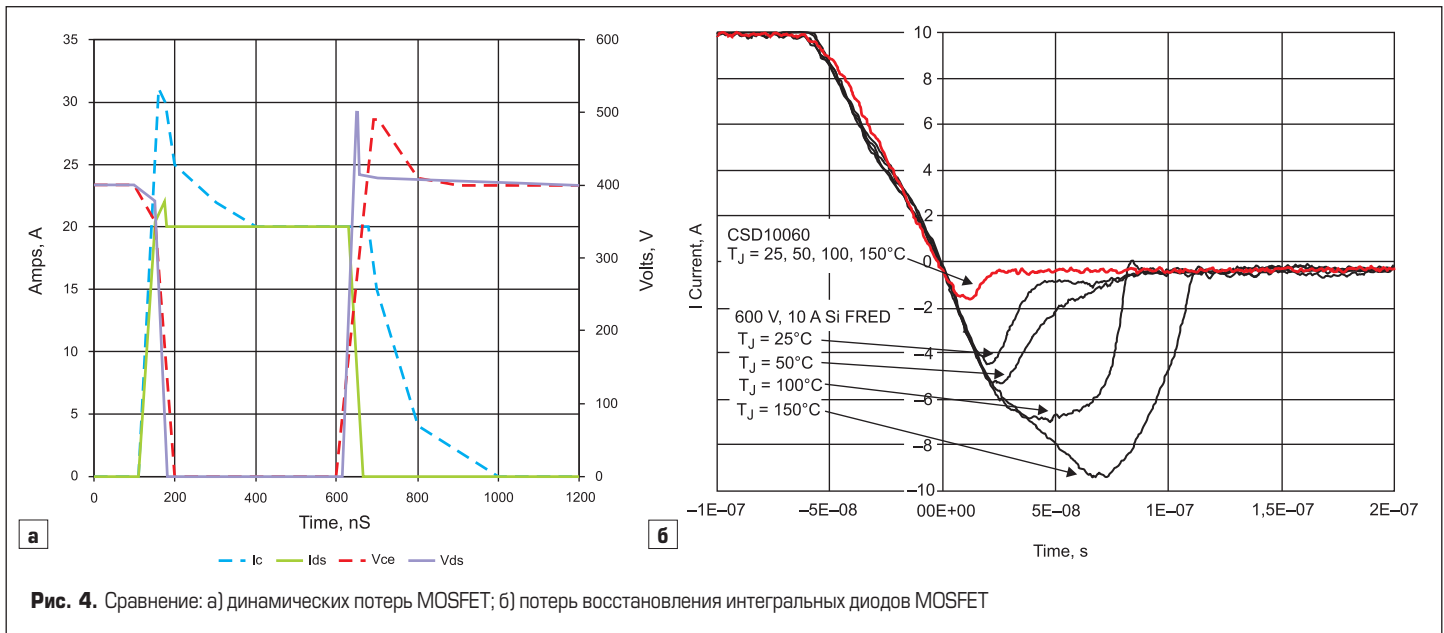


Рис. 3. Блок-схема инвертора; компоненты, отмеченные синим цветом, заменены на SiC или соответствующим образом модернизированы



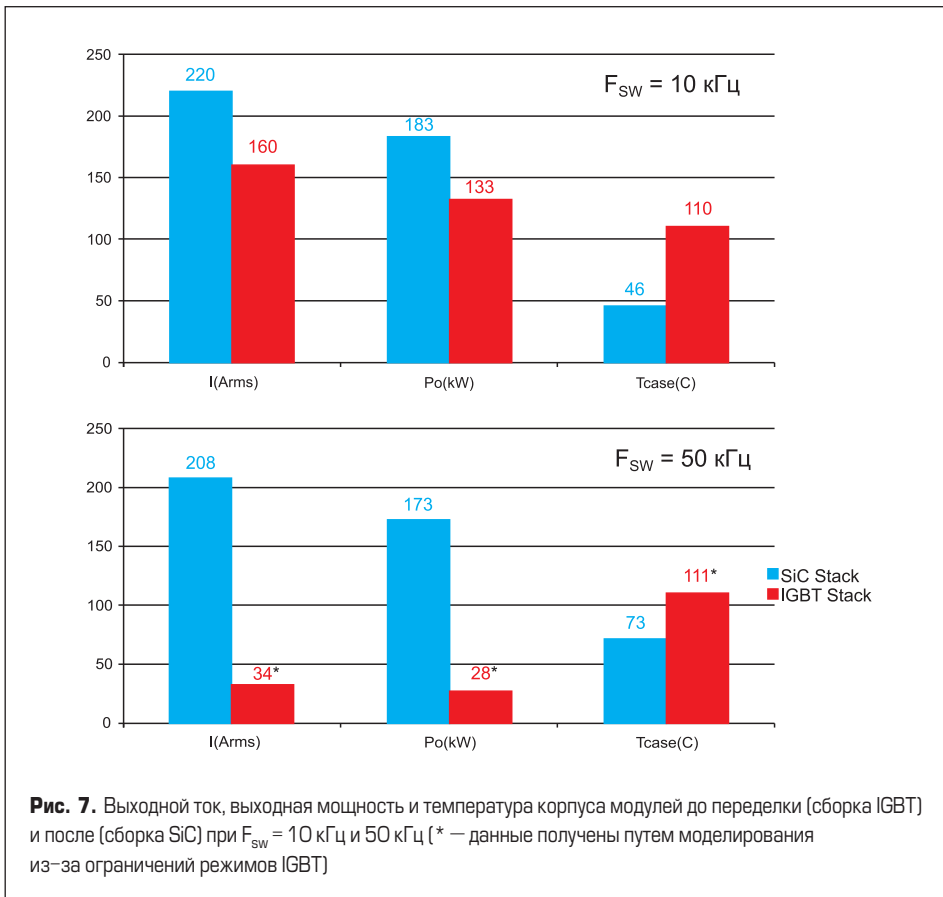
мических потерь. При коммутации IGBT необходимо снижать рабочий ток пропорционально росту частоты, чтобы не произошло превышение допустимой мощности рассеивания ( $P_{Dmax}$ ) устройства. Из графиков на рис. 5 видно, что при токах менее 50 А 40-А SiC-транзистор имеет преимущество по  $E_{cond}$  благодаря чисто омической характеристике потерь MOSFET. Учитывая существенные различия в динамических параметрах этих двух приборов, коэффициент снижения тока SiC MOSFET на высоких частотах будет существенно ниже, чем у аналогичного Si IGBT.

Кроме уменьшения потерь переключения и проводимости SiC-транзисторов, а также коммутационных потерь SiC-диодов, важно оценить их высокий иммунитет к воздействию космического излучения высокой энергии, приводящего к снижению надежности и даже повреждению кремниевых структур. Ожидается, что карбидокремниевые транзисторы будут значительно менее чувствительны к этому механизму отказа.

Три основных фактора определяют стойкость полупроводникового прибора к космическому излучению: материал кристалла, его площадь и блокирующее напряжение [4]. Ширина запрещенной зоны карбидокремниевых структур в три раза больше, чем у кремния, площадь SiC-кристаллов составляет только 33% от поверхности аналогичных Si приборов, а напряжение пробоя SiC-модулей в 1,33 раза превышает величину номинального напряжения. Таким образом, нетрудно понять, что технология SiC, по сравнению с Si, позволяет минимизировать влияние трех основных факторов, влияющих на надежность полупроводниковых структур.

**Повышение производительности инвертора**

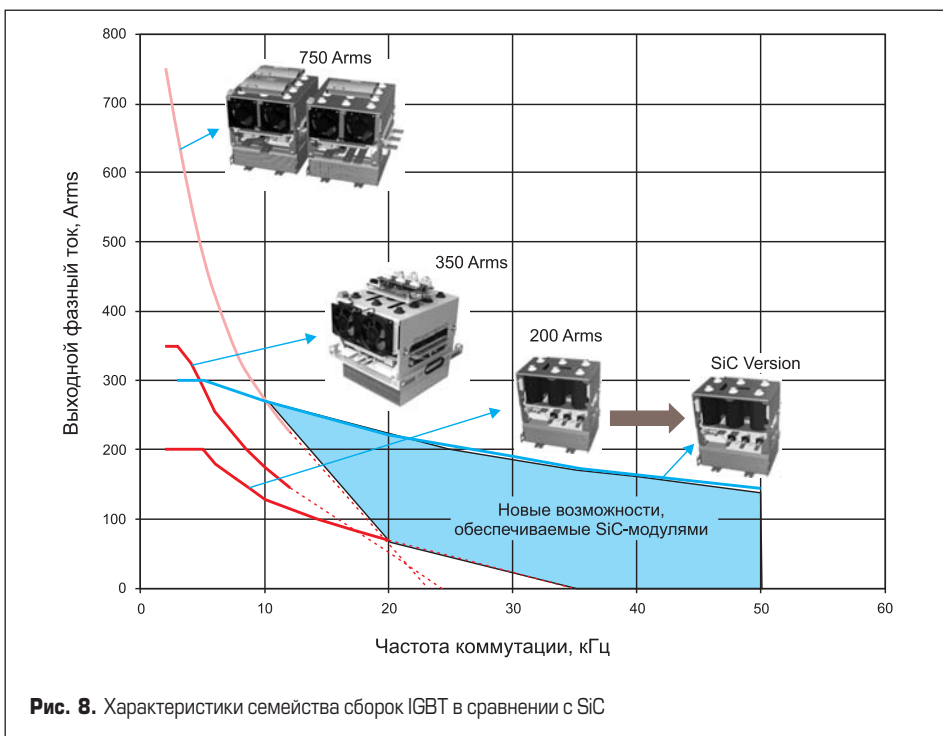
В результате замены IGBT на SiC-модули в сборке инвертора ожидается значительное снижение рассеиваемой мощности, что может привести к соизмеримому увеличе-



нию выходной мощности и эффективности на более высоких частотах переключения. Это позволяет уменьшить размер и вес системы или увеличить ток нагрузки на той же рабочей частоте, повысить плотность мощности, улучшить удельные экономические показатели (\$/Вт) или просто снизить температуру кристаллов и повысить КПД при тех же условиях эксплуатации, улучшить показатели надежности. На рис. 6 показано расчетное повышение производительности

инвертора, расчеты впоследствии проверялись на соответствие результатам измерений зависимости выходного тока от рабочей частоты инвертора.

Чтобы подтвердить ожидаемое улучшение производительности, были проведены испытания трехфазного инвертора на базе SiC-модулей, результаты измерений сравнивались со справочными данными IGBT-сборки. Тесты проводились при напряжении питания 700 В DC в режиме принудительного охлаж-



дения с интенсивностью 400 м<sup>3</sup>/час при температуре окружающей среды T<sub>amb</sub> = +25°C. Выходное напряжение 480 В AC при частоте 50 Гц подавалось на сбалансированную трехфазную резистивную нагрузку, которая может изменяться в пределах 2,8–263 кВт. Начальное тестирование проводилось при F<sub>sw</sub> = 10 кГц, затем испытания повторялись при F<sub>sw</sub> = 50 кГц при сохранении всех остальных условий эксплуатации. Результаты, представленные на рис. 7, иллюстрируют явные преимущества по производительности SiC-инвертора.

Изучая все сборки рассматриваемого семейства инверторов, следует определить, какому из них SiC-инвертор соответствует в наибольшей степени. Выбор в первую очередь зависит от рабочей частоты преобразователя F<sub>sw</sub> в конкретном применении. На рис. 8 показана зависимость номинального выходного тока I<sub>out</sub> от F<sub>sw</sub>; как и ожидалось, эта зависимость обратная. Из-за резкого спада величины I<sub>out</sub> с ростом F<sub>sw</sub> у IGBT-сборки мы видим, что на частоте 10 кГц IGBT-инвертор с номинальным током 750 А, который в три раза больше сборки на базе SiC, имеет такую же нагрузочную способность. Кроме того, зона, выделенная на рисунке синим цветом, демонстрирует возможности карбидокремниевых устройств, которые вообще экономически недостижимы при использовании Si IGBT-технологии.

**Заключение**

Разработчикам мощных преобразователей всегда приходится искать компромисс между производительностью, габаритами, стоимостью и частотой переключения F<sub>sw</sub>. Использование более высоких значений F<sub>sw</sub> позволяет уменьшать массо-габаритные показатели конвертеров, однако платой за это является снижение эффективности. Как правило, для систем высокой мощности (>500 кВт) оптимальный баланс между вышеперечисленными параметрами достигается на частоте коммутации около 3 кГц. Использование All-SiC силовых модулей позволяет повышать величину F<sub>sw</sub> без существенного снижения производительности. Это дает возможность создавать более высокочастотные системы преобразования энергии, отличающиеся меньшими габаритами и весом, быстротой реакции и более высокой надежностью силового каскада.

**Литература**

1. M. Bhatnagar and B. J. Baliga. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC and Si for power devices // IEEE Trans. On Electron Devices. 1993. № 3.
2. A. Elasser et al. A Comparative evaluation of new silicon carbide diodes and state-of-the-art silicon diodes for power electronic applications // IEEE IAS Annual Meeting Conference Proceedings. 1999.
3. J. Dodge. Reduce circuit zapping from cosmic radiation // Power Electronics Technology. Sept., 2007.