

# Полный карбидкремниевый MOSFET-модуль на 3,3 кВ:

## новый класс эффективности тяговых инверторов

Компания «Мицубиси Электрик» представляет новый силовой модуль на карбидкремниевых кристаллах диодов и транзисторов (Full SiC) с блокирующим напряжением 3,3 кВ и номинальным током 750 А. Устройство выходит на рынок в новейшем типоразмере корпуса LV100 [5], особенно подходящем для использования в тяговых инверторах и модульных конструкциях преобразователей. В статье приведены основные характеристики нового модуля и показаны преимущества в сравнении с кремниевым аналогом в контексте тягового применения.

**Виктор Толстопятов**

victor.tolstopyatov@mer.mee.com

**Нильс Солтау**

**Ойген Виснер**

**Кенджи Хатори**

Сегодня транзисторные полупроводниковые модули на основе карбида кремния (SiC) считаются главным новшеством в элементной базе рынка силовой электроники. В сравнении с классическими кремниевыми (Si) приборами SiC-модули обладают большей эффективностью и позволяют существенно снизить габариты преобразователей, экономя электроэнергию и материалы.

За последние 20 лет компания «Мицубиси Электрик» разработала и вывела на рынок SiC-приборы нескольких классов напряжений для различных применений [1]. В настоящее время, используя опыт эксплуатации различных SiC-модулей в тяге [2], компания выводит на рынок новый полумостовой карбидкремниевый модуль с блокирующим напряжением 3,3 кВ и током 750 А. Устройство рассчитано, прежде всего, на приме-

нение в высокопроизводительных тяговых преобразователях, а также в инверторах с высокими массогабаритными показателями. Модуль имеет маркировку FMF750DC-66A.

Ввиду высокой скорости переключения Full SiC-модули требуют соответствующего низкоиндуктивного корпуса. Поэтому решение FMF750DC-66A выполнено в наиболее современном для данного класса напряжения корпусе LV100 (рис. 1). Конструктив создает паразитную индуктивность менее 10 нГн и простоту параллельного включения модулей. Более того, данный корпус обеспечивает равномерное распределение тока между чипами внутри модуля за счет максимальной симметрии.

### Сравнение SiC с кремниевыми аналогами

В данном разделе сравним модуль FMF750DC-66A с двумя кремниевыми модулями в конструктиве LV100, имеющими тот же класс напряжения и номинальные токи 450 и 600 А и маркировки CM450DA-66X и CM600DA-66X соответственно. На рис. 2 показаны зависимости падения напряжения в транзисторах и диодах от тока (статические характеристики), которые существенно различаются для IGBT- и MOSFET-структур. Следует отметить, что характеристики на рисунке приведены для максимальных допустимых температур кристаллов: +150 °С для кремниевых модулей и +175 °С для FMF750DC-66A. Можно заметить, что ввиду линейности характеристики падение напряжения в модуле MOSFET в области низких токов существенно ниже, чем в IGBT (рис. 2а).

На рис. 2б видно, что падение напряжения в обратных диодах на основе SiC меньше, чем в Si. Таким



**Рис. 1.** Full SiC-модуль напряжением 3,3 кВ с номинальным током 750 А в новом корпусе LV100

образом, использование полевых транзисторов SiC и диодов значительно повышает КПД преобразователя, в особенности в области низких токов. Данное преимущество в контексте тяговых применений описано в следующей главе.

Еще одно ключевое преимущество Full SiC-модуля — радикальное снижение динамических потерь (потерь на переключение). И вновь подобный эффект может быть объяснен полевой структурой SiC-транзисторов. Отсутствие тока обратного восстановления диода и следового тока позволяет существенно поднять частоты переключения в сравнении с Si-модулями. На рис. 3 показаны суммарные потери при включении ( $E_{on}$ ) и выключении ( $E_{off}$ ) транзистора, а также при обратном восстановлении диода ( $E_{rec}$ ) в зависимости от тока.

Из графика видно, что в сравнении с кремниевыми модулями Full SiC имеет на 80–90% меньшие потери. Следующий раздел описывает данное преимущество с точки зрения проектирования инвертора и применения.

### Преимущества SiC на уровне конечной системы

Сравним суммарные потери в тяговом преобразователе с частотой ШИМ 750 Гц и 1500 В в звене постоянного тока для двух модулей: кремниевый CM600DA-66X и карбидкремниевый FMF750DC-66A. На рис. 4а показана экономия электроэнергии в случае замены Si-модуля SiC-аналогом с полевой структурой. Разница особенно значительна при условии действия инвертора на неполную нагрузку. Так, при рабочем токе до 400 А использование модуля FMF750DC-66A дает на 50–80% меньшие потери в полупроводниках, чем CM600DA-66X, при тех же габаритах корпуса.

Кроме того, ввиду большей эффективности и более высокой рабочей температуры кристаллов модуля FMF750DC-66A максимальная выходная мощность в выпрямительном режиме также существенно выше. На рис. 4б показано, что на частоте ШИМ 750 Гц выходная мощность выше на 60%. И поскольку выпрямительный режим позволяет рекуперировать энергию торможения транспортного средства обратно в сеть, это приводит к существенному повышению итогового КПД. Помимо этого, высокая мощность электрического торможения снижает нагрузку на механическую систему торможения, продлевая срок ее службы.

В качестве второго примера рассмотрим преобразователь, работающий в двигательном режиме от сети с  $\cos(\phi) = 0,9$ . На рис. 5 представлены зависимости максимальной частоты ШИМ от выходного рабочего тока. Большая рабочая частота SiC-модуля позволяет значительно снизить габариты преобразователя, а также увеличить диапазон регулирования привода [3, 4].

Помимо увеличения частоты ШИМ, на рис. 4б видно, что при сохранении той

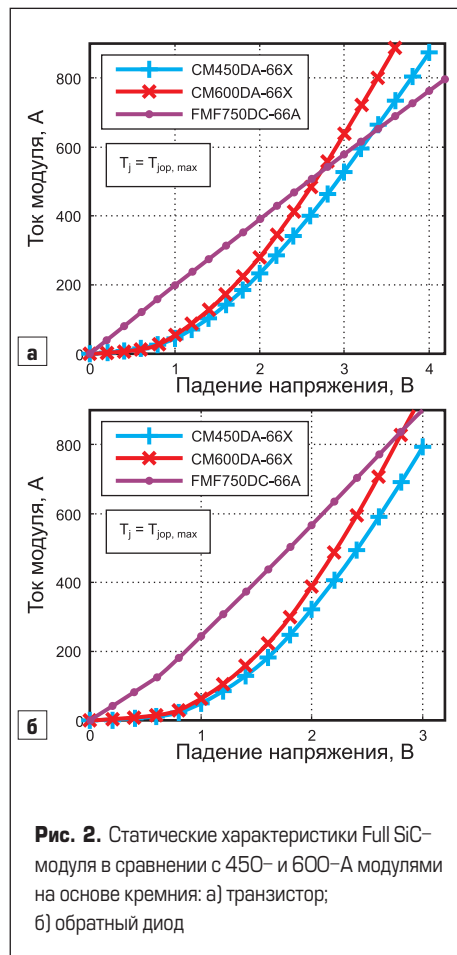


Рис. 2. Статические характеристики Full SiC-модуля в сравнении с 450- и 600-А модулями на основе кремния: а) транзистор; б) обратный диод

же частоты с новыми модулями инвертор достигает гораздо большей выходной мощности. А тот факт, что модуль FMF750DC-66A выполнен в том же корпусе, что и кремниевый CM600DA-66X, унифицирует конструктив преобразователя и ускоряет разработку (конструкция повторяет Si-версию).

Помимо уже названных преимуществ для использования в тяге и энергосистемах,

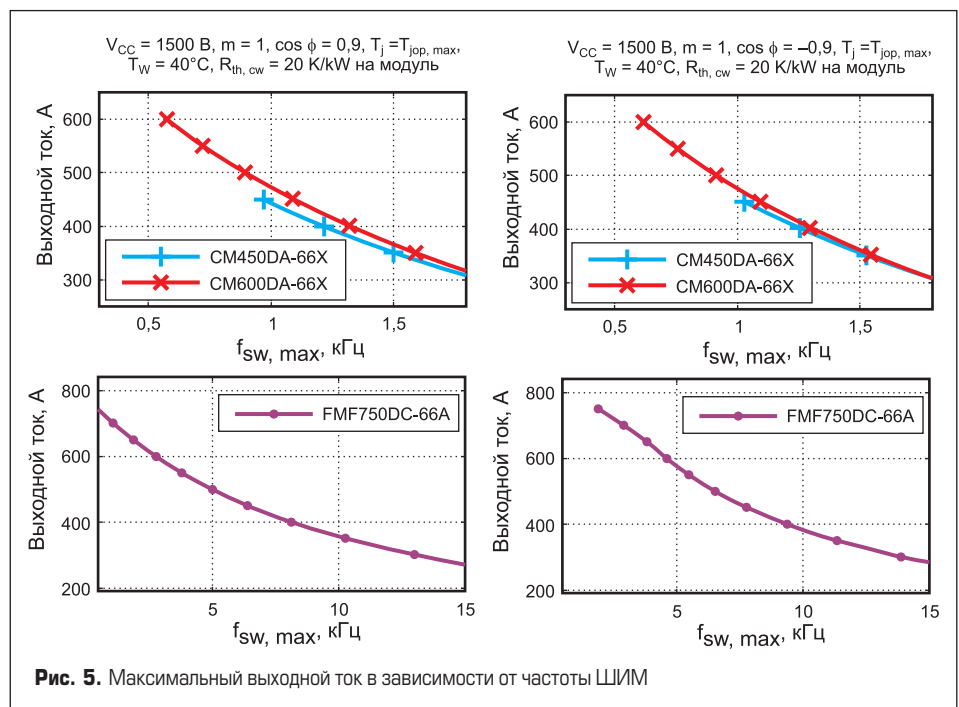


Рис. 5. Максимальный выходной ток в зависимости от частоты ШИМ

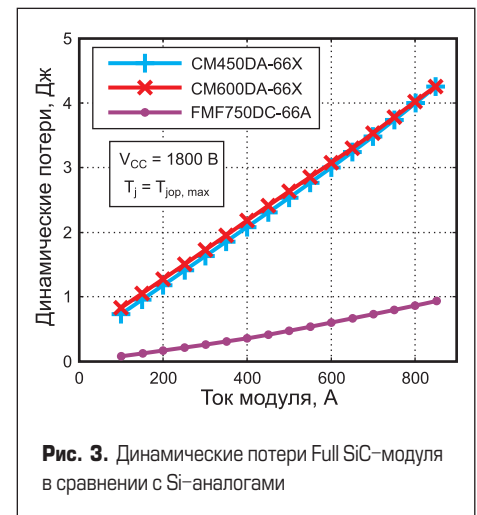


Рис. 3. Динамические потери Full SiC-модуля в сравнении с Si-аналогами

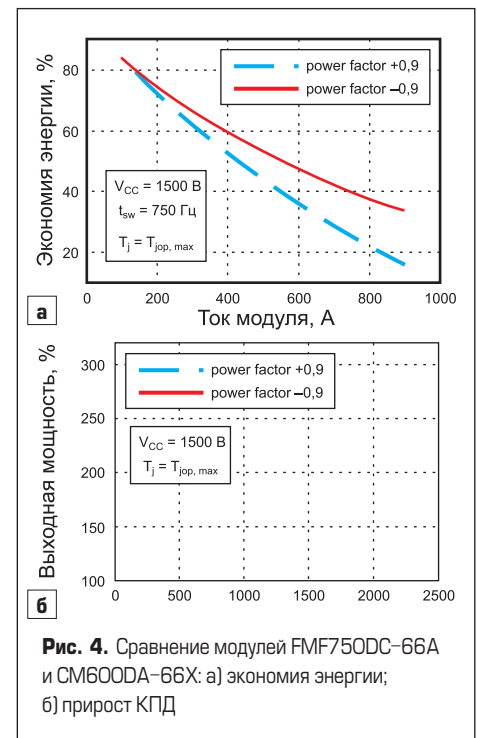


Рис. 4. Сравнение модулей FMF750DC-66A и CM600DA-66X: а) экономия энергии; б) прирост КПД

модуль FMF750DC-66A имеет и другие достоинства. Они показаны на рис. 6 для различных системных уровней: уровня модуля, преобразователя и применения в целом. В самом общем случае, сегодня целесообразность применения модуля FMF750DC-66A оправдана там, где приведенные на рисунке преимущества перевесят более высокую цену модуля в сравнении с кремниевым аналогом.

### Вывод

Компания «Мицубиси Электрик» вывела на рынок инновационный продукт в оптимизированном форм-факторе LV100. Линейка силовых модулей с блокирующим напряжением 3,3 кВ пополнилась полумостовым прибором с кристаллами на карбиде кремния с номинальным током 750 А.

SiC-модуль FMF750DC-66A позволяет увеличить плотность мощности преобразователя за счет повышения частоты ШИМ, а также максимальной температуры кристаллов +175 °С. Помимо этого, с использованием нового модуля возрастает КПД преобразователя. В особенности прирост в КПД заметен при неполной нагрузке на инвертор, а также в выпрямительном режиме работы, где он составляет около 50–80%. Кремниевый и карбидкремниевый модули выполнены в одинаковых низкоиндуктивных корпусах LV100, что облегчает переход и унифицирует конструкцию преобразователя.

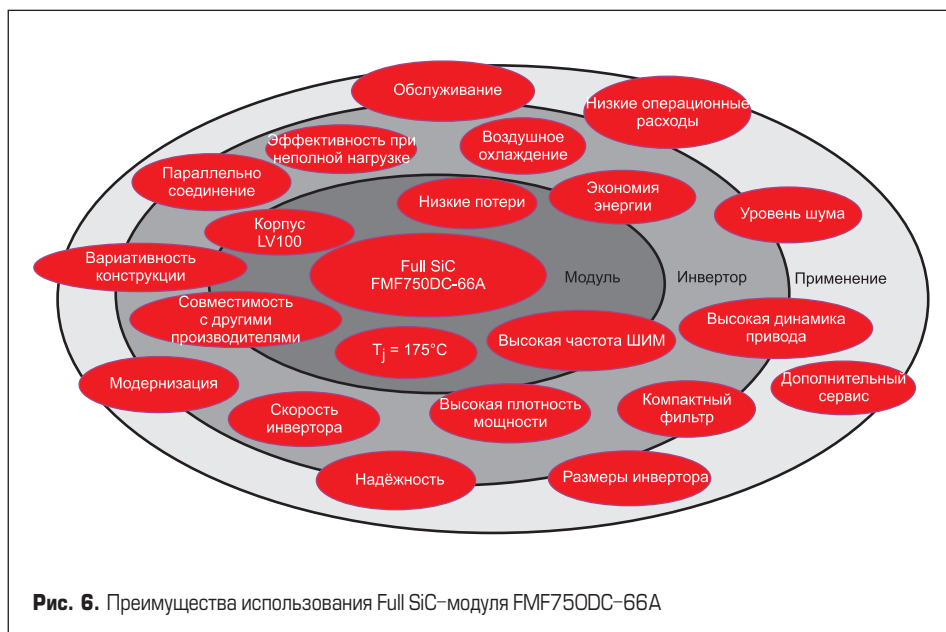


Рис. 6. Преимущества использования Full SiC-модуля FMF750DC-66A

### Литература

1. Thal E., Yamada J. SiC Power Modules for a Wide Application Range. Bodo's Power Systems, Sep 2017.
2. Mitsubishi Electric. Mitsubishi Electric Installs Railcar Traction System with All-SiC Power Modules on Shinkansen Bullet Trains. Press Release No. 2942, June 2015.
3. Luise L. and others. Design Optimization and Testing of High-Performance Motors: Evaluating a Compromise Between Quality

Design Development and Production Costs of a Halbach-Array PM Slotless Motor. IEEE Industry Applications Magazine, 2016.

4. Claessen M., Dujic D., Canales F., Steinke J. K., Stefanutti P., Vetterli C. Traction transformation. A power-electronic traction transformer // ABB review. 2012. No. 1.
5. Толстопятов В., Штумпф О., Хатори К. LV100 — полумостовой модуль для тяговых инверторов новых поколений // Силовая электроника. 2017. № 5.