

Модули серии Infineon EconoDUAL 3 Black:

хорошо известные преимущества и новые особенности

В статье представлен обновленный модуль Infineon EconoDUAL 3 Black, описано, как обеспечивается баланс между внедрением новых функций и сохранением проверенных и испытанных свойств. Анализируются параметры нового модуля FF600R12BE7_B11(BE7), в котором использованы технологии IGBT 1200 В TRENCHSTOP IGBT7, и диодов EC7 с управляемым эмиттером.

**Клайс Вогель
(Klaus Vogel)**

**Ян Баурихтер
(Jan Baurichter)**

**Витали Вайс
(Vitali Weiss)**

**Кристиан Стенингер
(ChristianSteininger)**

**Фабиан Северин
(Fabian Severin)**

**Перевод:
Евгений Карташов**

Infineon EconoDUAL 3 (ED3) является одним из самых популярных конструктивов электронных силовых приборов на рынке. С 2005 года данные модули используются в таких ответственных устройствах, как общепромышленные приводы (GPD), электрические автобусы и грузовики, инверторы солнечных и ветряных электростанций, источники бесперебойного питания (UPS), зарядные устройства и тяговые приводы. Сегодня этот конструктив доступен с различными технологиями IGBT и топологиями схем, а также с интегрированными токовыми шунтами. Помимо практичной геометрии, упрощающей конструкцию инвертора, корпус EconoDUAL славится высокой плотностью мощности, простотой сборки, большим монтажным пространством для установки плат драйверов и удобством параллельного соединения.

По прошествии 15 лет настало время модернизации конструктива, позволяющей адаптировать его

к современным требованиям рынка. Корпус усовершенствован для использования в автоматизированных производственных линиях, что стало возможным благодаря упрощению процесса запрессовки высокопрочных печатных плат (PCB). Он разработан для будущих поколений IGBT и имеет оптимальное соотношение цены и производительности. Не следует забывать о формуле успеха, работающей более десяти лет: размер модуля остался таким же, как у нынешнего EconoDUAL 3 с его хорошо известными преимуществами. Все это соответствует современным тенденциям общества, направленным на экономию ресурсов и обеспечение стабильности жизни.

Дизайн корпуса

Цель модернизации дизайна EconoDUAL 3 Black заключается в дальнейшем упрощении производства (по сравнению с предыдущей моделью) и подготовке корпуса для последующих поколений чипов. Кроме того, с учетом требований по экологичности и экономному расходованию природных ресурсов содержание меди в новом конструктиве снижено ввиду устранения медной базовой платы. Это позволяет стабилизировать цену, поскольку стоимость меди оказалась очень волатильной, она испытала огромный рост в недавнем прошлом. Была разработана новая сложная комбинация керамических корпусов для подключения радиатора без использования медной базовой платы.

Автоматизированная производственная линия

Все больше производителей силовых преобразователей заменяют ручную сборку полностью автоматизированными производственными линиями, поэтому одним из направлений разработки новых IGBT-модулей является упрощение такого подхода. Для реализации этой задачи компоненты серии

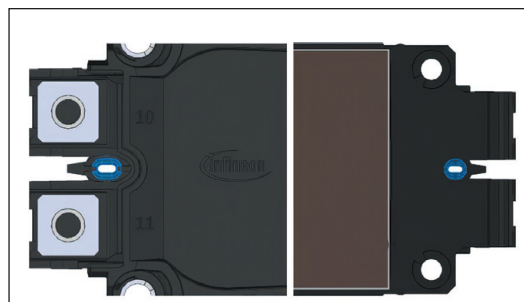


Рис. 1. Модуль серии EconoDUAL 3 Black: два из четырех технологических элементов выделены синим цветом, левая сторона модуля — вид сверху, правая сторона модуля — вид снизу. Элементы введены для упрощения автоматизированного производства инверторов

EconoDUAL 3 Black оснащены четырьмя технологическими направляющими элементами (два сверху и два снизу, рис. 1).

Это позволяет позиционировать модуль при сборке инвертора, обеспечивая его точную установку на автоматизированной производственной линии. Опорные точки формируют систему отсчета, являясь наилучшим средством позиционирования. Благодаря данной особенности стандартные дюбельные штифты (в соответствии с ISO 2338) могут использоваться в погрузочных захватах, на радиаторах или в любом ручном, полуавтоматическом или даже высокоавтоматизированном процессе. Кроме автоматизации, высокоточное позиционирование модуля позволяет производителям применять в своих изделиях менее дорогие шины с более высоким допуском.

Процесс запрессовки

Пятнадцать лет назад классическая конструкция инвертора среднего диапазона мощности предусматривала винтовое соединение медных шин с DC и AC силовыми терминалами модуля IGBT и паяное соединение печатной платы (PCB) драйвера с его сигнальными выводами. Это требовало большого процента ручной сборки, поскольку данные производственные этапы сложно автоматизировать. Появление процесса прессы посадки, заменившего пайку PCB, и внедрение силовых печатных плат с трассами вместо внешних шин упростило процесс сборки и сократило количество производственных операций для преобразователей в диапазоне мощности ED3. При сборке трехфазного инвертора плата управления запрессовывается на 1-3 модуля, после чего они устанавливаются на радиатор. На рис. 2 показан пример такой конструкции: три модуля установлены на теплоотвод и подключены к силовоточной PCB с конденсаторами DC-шины.

Четыре новых технологических элемента (рис. 1) упрощают процесс запрессовки, поскольку позиционирование самих модулей, а также модулей и силовоточной печатной платы или PCB-драйвера будет выполняться с высокой точностью. Возможен автоматизированный процесс монтажа, поскольку взаимное положение компонентов относительно друг друга здесь четко определено. Следует учитывать еще один момент — допуск по высоте четырех устройств, подключенных к печатной плате и радиатору. Высоты должны быть одинаковыми, чтобы избежать механических напряжений между соединяемыми деталями и обеспечить правильное подключение каждого вывода к PCB. Высота модулей новой серии EconoDUAL 3 Black определяется только пластиковым корпусом, что гарантирует очень небольшой разброс по этому параметру.

Адаптация к новым поколениям IGBT

Новые поколения IGBT обычно рассчитаны на более высокие рабочие температуры по сравнению с предыдущими поколениями.

Модули EconoDUAL 3 Black начнут выпускаться с номинальных параметров 600 А 1200 В на чипах Trenchstop IGBT 7.

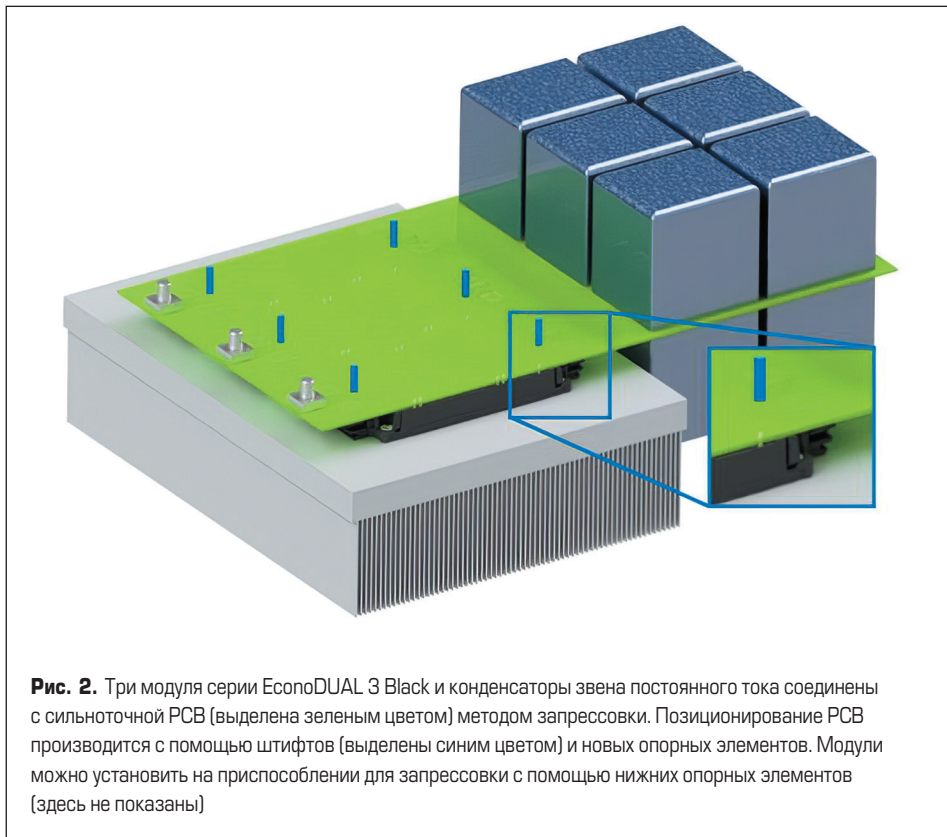


Рис. 2. Три модуля серии EconoDUAL 3 Black и конденсаторы звена постоянного тока соединены с силовоточной PCB (выделена зеленым цветом) методом запрессовки. Позиционирование PCB производится с помощью штифтов (выделены синим цветом) и новых опорных элементов. Модуль можно установить на приспособлении для запрессовки с помощью нижних опорных элементов (здесь не показаны)

Все используемые материалы — пластик, гель, керамика и выводы — выбраны с учетом ожидаемой тепловой нагрузки текущего и будущих поколений кристаллов.

Керамическая подложка с высокой механической прочностью

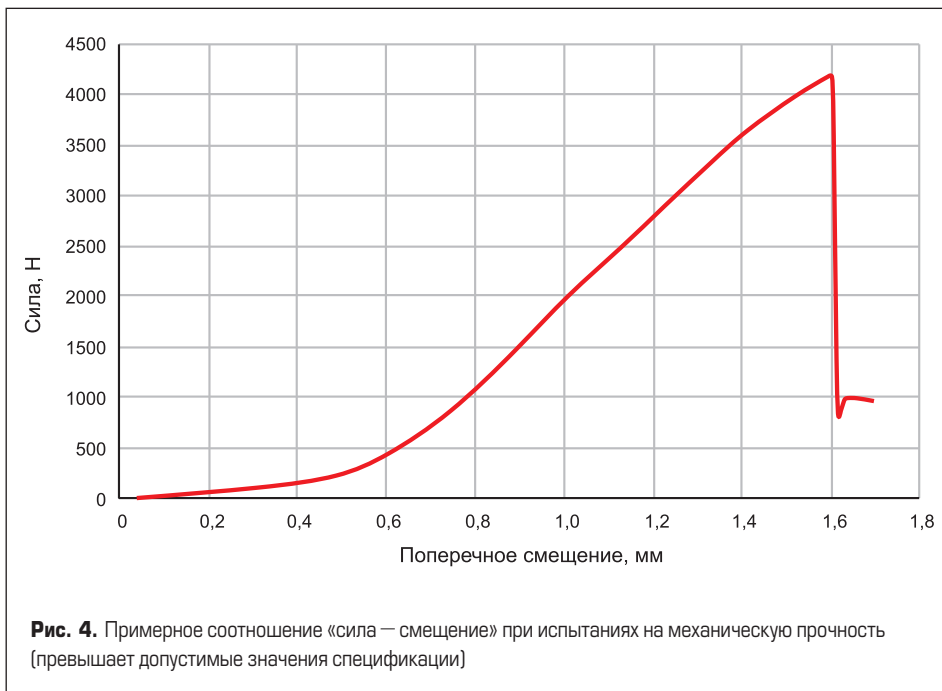
Керамическая DBC-подложка выполняет множество различных функций. Она защищает внутреннее пространство модуля, формирует электрическую изоляцию теплоотвода, на нее устанавливаются чипы. Подложка обеспечивает соединение с радиатором с низким тепловым сопротивлением «кристалл — теплосток» (R_{TH-JH}). Многие из вышеупомянутых характеристик модуля зависят от материала и толщины DBC-керамики.

Изолирующая подложка модулей серии EconoDUAL 3 Black обеспечивает наименьшее тепловое сопротивление «кристалл — теплосток» для данной конструкции, а также высокую механическую прочность. Для подтверждения высоких механических характеристик были проведены испытания с приложением высокого усилия одновременно к стандартному ED3 и новому модулю ED3 Black. Приспособление для тестирования и условия испытаний показаны на рис. 3 и 4.

В ходе испытаний к модулям прилагаются усилия, намного превышающие допустимые по спецификации значения. Это делается для демонстрации высокого уровня надежности новых компонентов по сравнению с предыдущим поколением, которое уже является достаточно надежным. Усилие более 4000 Н



Рис. 3. Слева: установка для проверки механической прочности. Справа: эскиз тестовой установки с EconoDUAL 3 (внизу) и EconoDUAL 3 Black Series (вверху). Модули соединены посредством металлической шины на силовых терминалах, усилие приложено по центру сверху (зеленая стрелка)



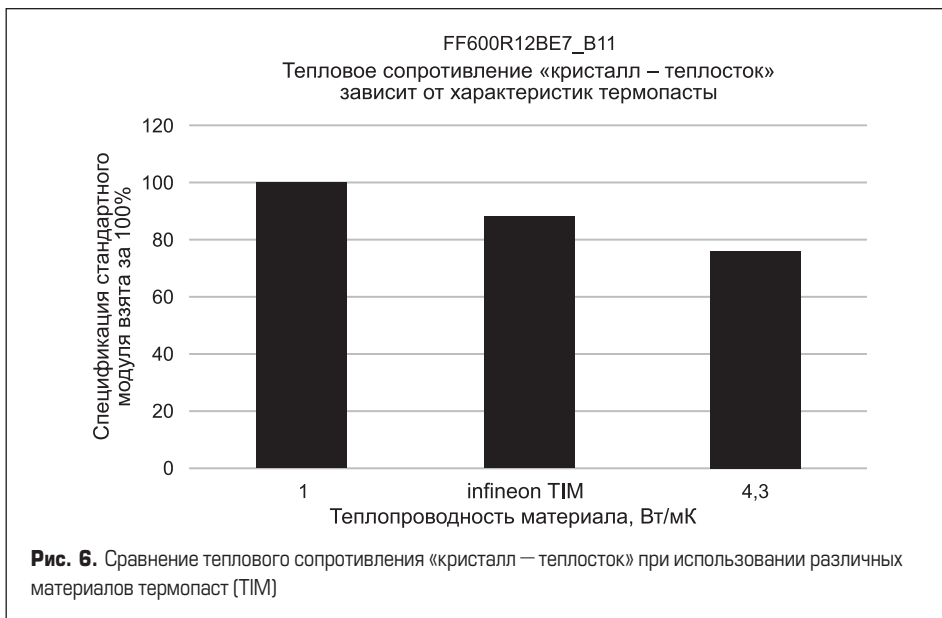
воздействует до тех пор, пока не произойдет повреждение корпуса EconoDUAL 3. У модулей новой серии Black не происходит отказов, что демонстрирует их высокую надежность. На рис. 5 показано приспособление для проверки и результаты тестирования. Таким образом, компоненты серии Black выдерживают жесткий тест на механическую прочность.

Модули EconoDUAL 3 Black подходят для всех вариантов производства — от полностью автоматизированного до обычной ручной сборки преобразователей.

Материалы теплового интерфейса

Материалы, использованные при изготовлении модуля, обеспечивают высокую плоскостность подложки. Поэтому важно внимательно следить за процессом нанесения термопасты, чтобы предотвратить ухудшение характеристик из-за нарушения правил ее применения. Кроме того, материал TIM оказывает большое влияние на тепловые характеристики; на рис. 6 показаны величины теплового сопротивления $R_{TH, JH}$ для различных типов паст.

Спецификация Infineon справедлива для термопасты с теплопроводностью 1 Вт/м·К. Использование материала Infineon TIM [1] или другого с более высокой теплопроводностью улучшает $R_{TH, JH}$ на 12 и 24% соответственно.



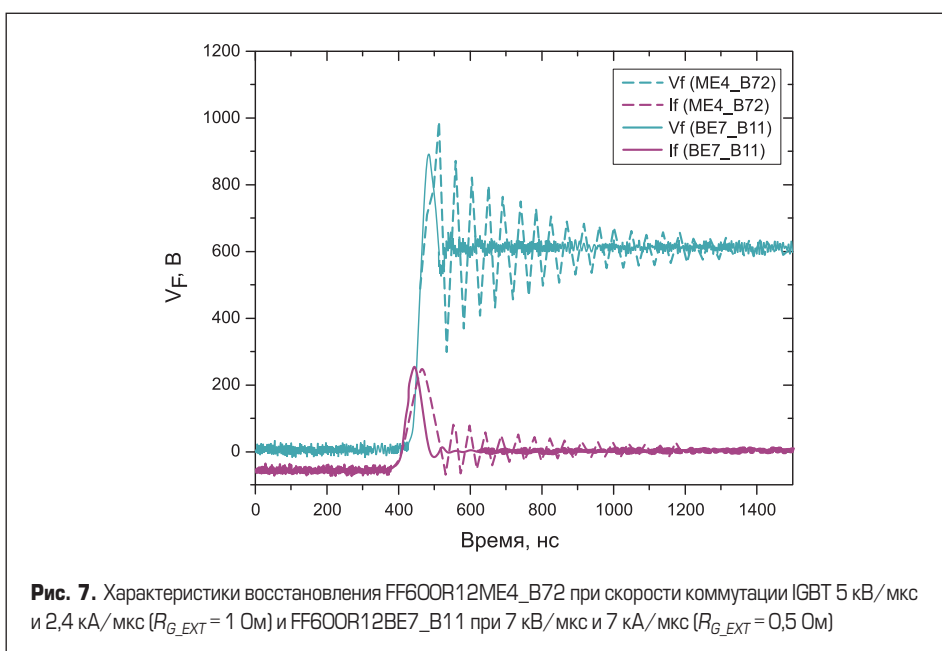
Электрические характеристики

В этом разделе проводится сравнение нового модуля FF600R12BE7_B11 (600 А, 1200 В) с чипами IGBT 7, с предшествующим FF600R12ME4_B72.

Удаление медной базовой платы и уменьшение размера чипов [2] должны быть компенсированы за счет совершенствования конструкции DCB и внедрения новой технологии IGBT, направленных на улучшение распределения тепла и снижение коммутационных и статических потерь.

Электрические потери

Ключевая цель разработки силовых модулей, предназначенных для инверторов в диапазоне высокой мощности, — размещение параллельных полупроводниковых чипов,



обеспечивающее симметричные цепи коммутации тока между ними. Чем они симметричнее, тем быстрее может происходить переключение без риска короткого замыкания и токовой перегрузки. В новом модуле вся схема расположена на одной подложке. По сравнению с вариантами с использованием двух или трех подложек такая топология не требует дополнительного места для соединительных проводников, что снижает паразитную индуктивность и распределенное сопротивление.

Размещение чипов может производиться с высокой степенью свободы. В новом корпусе ED3 Black улучшена топология соединений IGBT и диодов, что обеспечивает более быстрое включение и, следовательно, снижение потерь IGBT. Подробная информация о влиянии топологии DCB на потери и скорость коммутации дана в [2]. На рис. 7 приведено сравнение прежнего и нового 600-А модуля в отношении характеристик восстановления диода.

Пределные возможности ME4_B72 становятся видимыми. При внешнем резисторе затвора (R_{G_EXT}) менее 1,5 Ом и скорости нарастания напряжения (du/dt_{10-90}) 4,3 кВ/мкс возникают осцилляции, которые могут создавать проблемы в отношении электромагнитных помех (EMI). Модуль нового поколения обеспечивает более быстрое переключение без влияния осцилляций до du/dt_{10-90} 7 кВ/мкс. На рис. 8 потери включения при 600 А и +150 °C показаны в зависимости от du/dt при 60 А и +25 °C для обоих приборов.

Модуль FF600R12ME4_B72 способен работать при du/dt_{10-90} до 4 кВ/мкс при 60 А и +25 °C без возникновения осцилляций. FF600R12BE7_B11 может переключаться со скоростями до 7 кВ/мкс без осцилляций, что предоставляет пользователям высокую степень свободы, если в приложении допустима быстрая коммутация. Новый модуль с чипами IGBT7 имеет хорошую управляемость в широком диапазоне du/dt_{10-0} с центральным значением около 5 кВ/мкс. При скорости, например, 4 кВ/мкс видно, что прибор Black Series с чипами IGBT 7 имеет более высокие потери включения, чем у ключей предыдущего поколения, IGBT 4. Это можно объяснить с помощью рис. 9.

При той же скорости нарастания тока (di/dt_{10-90}), номинальном токе и температуре +150 °C величина du/dt_{10-90} при 10% номинального тока и +25 °C у модулей BE7_B11 выше, чем у ME4_B72. Причиной этого является влияние внутренней компоновки модуля на характер восстановления диодов. В приборах BE 7_B11 восстановление идет быстрее, что приводит к увеличению du/dt_{10-90} при включении IGBT. Подробное объяснение этого эффекта можно найти в [2]. Описанные преимущества, улучшенные показатели статических потерь и снижение сопротивления терминалов R_{CC+EE} обобщены на рис. 10.

Благодаря использованию одной DCB-подложки и оптимизации положения чипов IGBT 7 потери включения уменьшены более чем в 2 раза по сравнению с предыдущим поколением. Продолжая это сравнение, отметим,

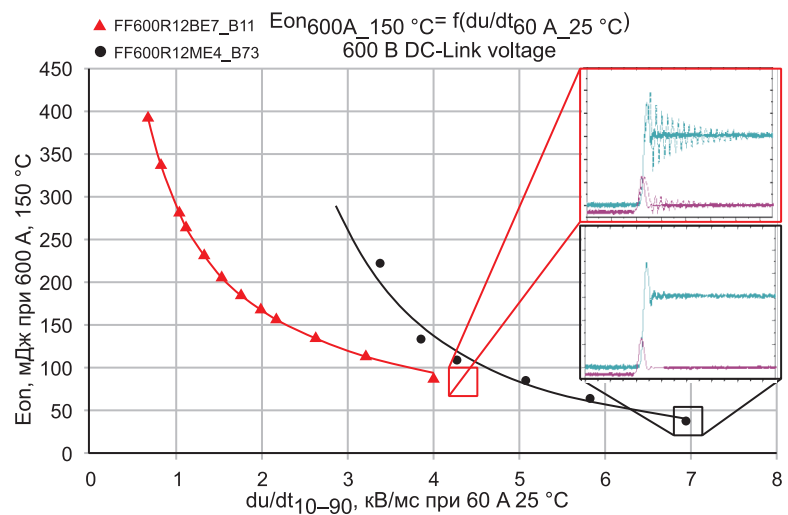


Рис. 8. Потери включения при 600 А и +150 °C в зависимости от du/dt_{10-90} при 60 А и +25 °C для обоих приборов

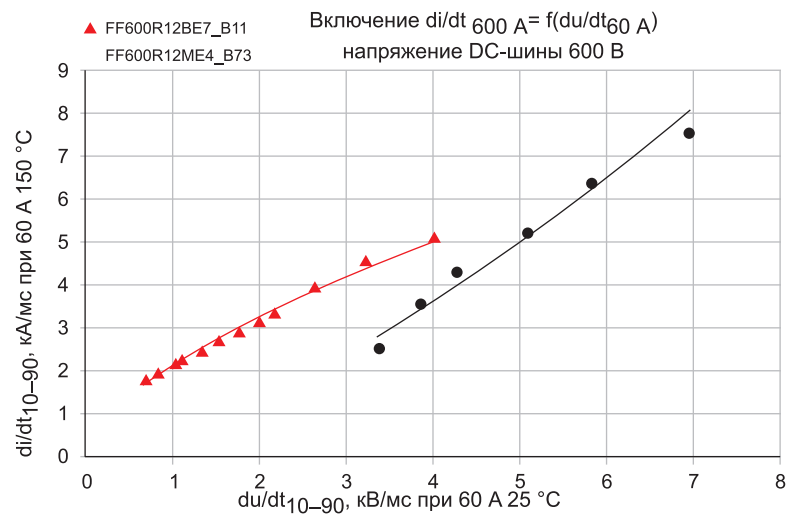


Рис. 9. di/dt_{10-90} при 600 А и +150 °C в зависимости от du/dt_{10-90} при 60 А и +25 °C для модулей двух поколений

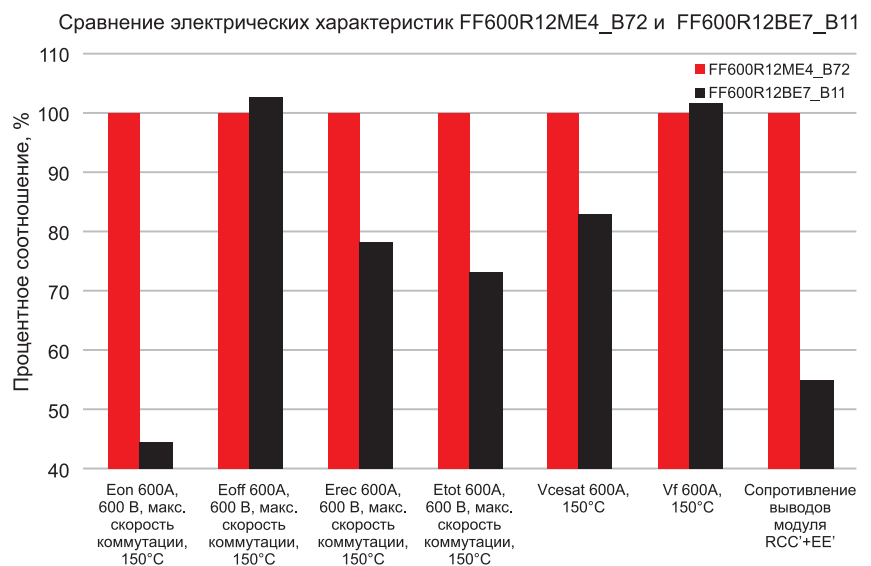


Рис. 10. Сравнение статических потерь модулей ME4_B72 и BE7_B11 (резистор затвора выбран для максимальной скорости коммутации без осцилляций при +25 °C и 60 А); сравнение статических потерь и сопротивления выводов (R_{CC+EE})

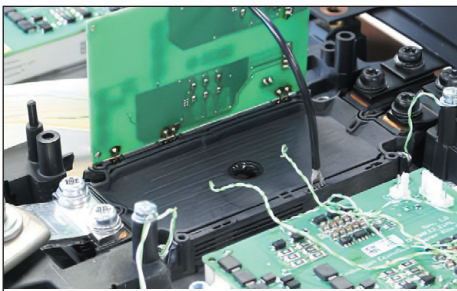


Рис. 11. Установка для измерения параметров

Кроме того, решение с одной DCB в сочетании с ультразвуковой сваркой терминалов позволяет снизить сопротивление выводов модуля с 1 до 0,55 мОм. При токе нагрузки 450 А это приводит к уменьшению потерь на 92 Вт, которые должны рассеиваться посредством радиатора.

Силовые терминалы

В первом десятилетии XXI века полупроводниковые чипы IGBT 3 были самыми современными, они хорошо функционировали в недавно разработанном корпусе EconoDUAL 3. В то же время плотность тока у новых технологий IGBT позволяет удвоить номинальный ток данного прибора. Если, с одной стороны, повышается производительность чипов, то с другой — силовые терминалы модуля могут стать ограничивающим фактором с точки зрения допустимой токовой нагрузки.

что потери на восстановление диода более чем на 20% ниже, а его статические потери при +150 °C аналогичны. Потери выключения находятся на том же уровне, в то время как статические потери IGBT улучшены на 18%.

В модулях серии EconoDUAL 3 Black используются лучшие из доступных технологий для снижения теплового сопротивления выводов без изменения внешних размеров. Это достигается за счет применения ультразвуковой сварки для подключения медных терминалов к подложке вместо соединительных проводов. В то же время ультразвуковая сварка позволила улучшить охлаждение данной части прибора. Площадь основания выводов на подложке увеличена на 350% по сравнению с проводным соединением. Влияние такого решения на производительность модуля рассмотрим в следующей главе.

Производительность

Для оценки эффективности применения силовых ключей в конкретном приложении модули нового и предыдущего поколения были протестированы в инверторном режиме. Поскольку компоненты серии Black оснащены крышкой, которая служит частью прижимной конструкции DCB, измерение температуры IGBT и диода проводится с помощью термопар. Для оценки температуры силовых терминалов модуля используется инфракрасная камера. На рис. 11 показана измерительная установка и точки подключения датчиков.

Модули размещены на радиаторе с воздушным охлаждением. Сопротивление затвора для FF600R12ME4_B72 составляло 1,5 Ом, а для FF600R12BE7_B11 — 0,5 Ом. Это соответствует максимальной скорости переключения IGBT в соответствии с критериями, описанными в предыдущей главе. На первом этапе температура терминалов оценивалась при подаче постоянного тока, результаты представлены на рис. 12.

Благодаря улучшенной конструкции выводов значительно снижена температура внутри и снаружи модуля. Зона максимальной измеряемой температуры теперь находится на шине инвертора, а не внутри IGBT. На втором этапе проводится АС-тест в условиях, показанных на рис. 11. Температура чипов измеряется с помощью термопары, расположенной в центре наиболее нагретого IGBT. Таким образом, результаты измерений, представленных на рис. 13, относятся к этой точке, имеющей максимальную температуру T_{hs} .

Модули новой серии Econodual 3 Black работают аналогично FF600R12ME4_B72, они способны обеспечить такой же выходной ток при температуре IGBT $T_{hs} = +150$ °C. Уменьшение размера чипа и удаление базовой платы могут быть скомпенсированы за счет оригинальной концепции модуля и новой технологии IGBT. Если система позволяет использовать режимы перегрузки, допустимые для IGBT 7 [3], то компоненты BE7_B11 превосходят предыдущее поколение на 9%. Дальнейшее повышение выходного тока модулей серии Black может быть достигнуто за счет применения термопасты с высокой теплопроводностью. Поскольку FF600R12BE7_B11 имеет значительно меньшие динамические потери, чем FF600R12ME4_B72, то компоненты серии

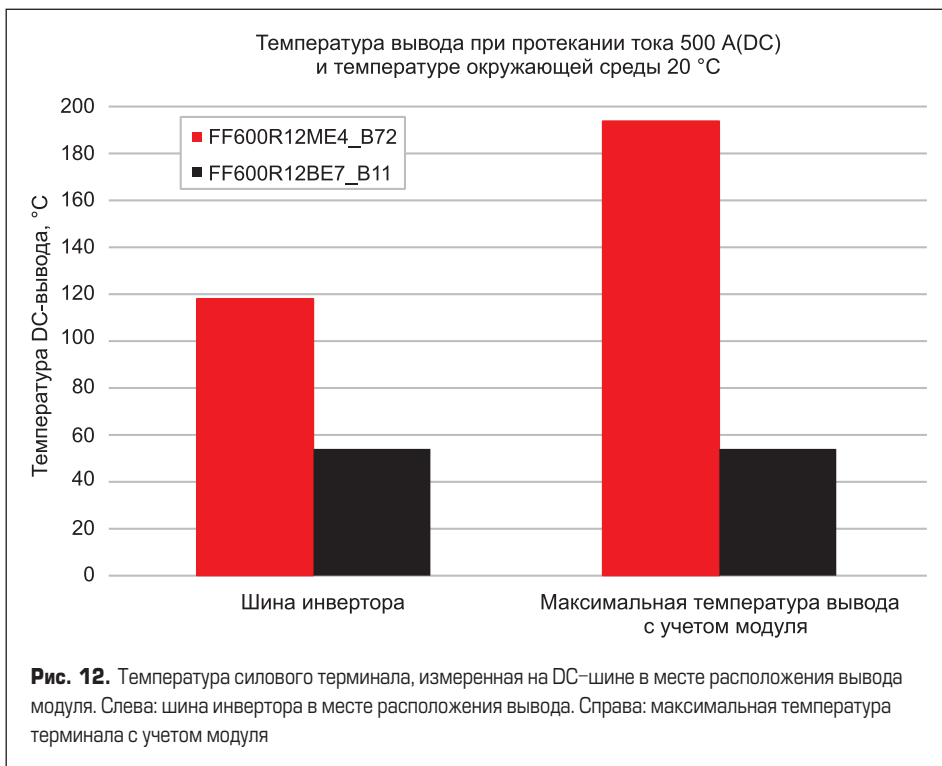


Рис. 12. Температура силового терминала, измеренная на DC-шине в месте расположения вывода модуля. Слева: шина инвертора в месте расположения вывода. Справа: максимальная температура терминала с учетом модуля

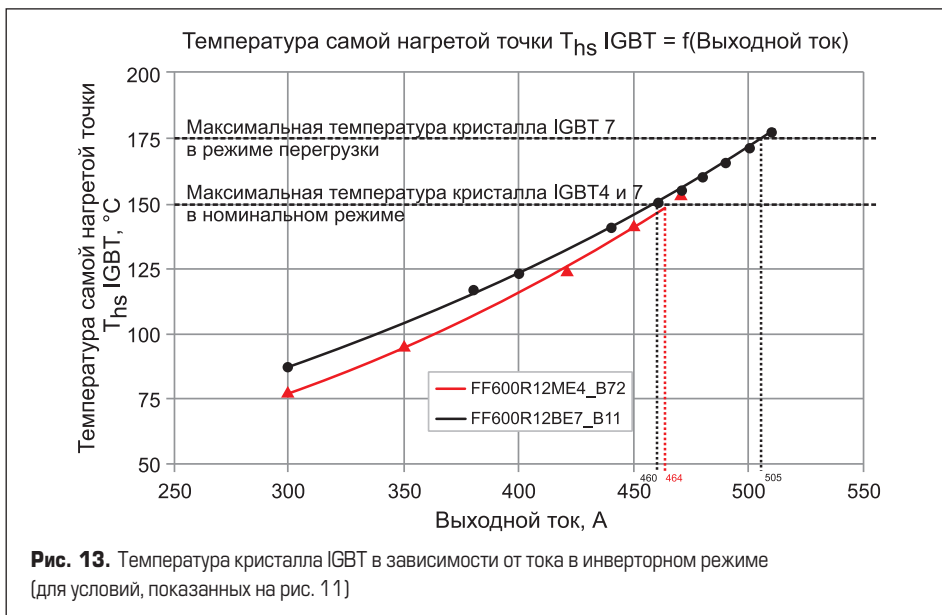


Рис. 13. Температура кристалла IGBT в зависимости от тока в инверторном режиме (для условий, показанных на рис. 11)

EconoDUAL 3 Black предпочтительнее для применений с более высокой частотой переключения.

Заключение

Модули серии EconoDUAL 3 Black отличаются большим количеством новых возможностей, отвечающих последним требованиям рынка, и сохраняют при этом положительные свойства конструктива EconoDUAL 3. Новый прибор предназначен для высокоточного позиционирования, то есть для полностью автоматизированного производства инверторов. В то же время он обеспечивает уровень надежности, допускающий любой вариант ручной сборки.

Новый EconoDUAL 3 сочетает передовые технологии IGBT 7 и EC7, улучшенный дизайн DCB, эффективное подключение к радиатору и продуманный выбор материалов, при этом в нем используется меньше частей и меньше меди по сравнению с предыдущим поколением. Новые модули позволяют обеспечить хорошо известную высокую производительность ED3 или даже превзойти ее в зависимости от условий применения. Все внедренные улучшения соответствуют современным тенденциям в части сбережения ресурсов и безопасности. Кроме того, применение этих компонентов обеспечивает производителям инверторов экономические преимущества, выражающиеся в лучшем соотношении цены и эффективности. ■

Литература

1. AN2012-07, Module with pre-applied thermal interface material. www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN2012_07_Modules_with_pre_applied_Thermal_Interface_Material-AN-v02_01-EN.pdf?fileId=db3a30433af3614c013af3c70cf10025
2. Baurichter J. et al. Higher output performance despite chip shrinkage: New FF600R12ME7_B11 outperforms former generation, PCIM Europe. Nuremberg, Germany, 2021.
3. Vogel K. et al. New, best-in-class 900-A 1200-V EconoDUAL 3 with IGBT 7: highest power density and performance, PCIM Europe. Nuremberg, Germany, 2019.