

Повышение производительности IGBT 5

за счет оптимизации конструкции модуля

Повышенная тепловая мощность ($T_{vj,op} = +175\text{ °C}$) IGBT 5-го поколения и контролируемые по эмиттеру диоды (emitter controlled diode) компании Infineon Technologies позволяют увеличить рабочий ток силовых модулей, используемых в инверторных приложениях.

Вильгельм Руш
(Wilhelm Rusche)

Андре Р. Штегер
(Andre R. Steger)

Перевод:
Владимир Рентюк

Для того чтобы в полной мере воспользоваться более высокой допустимой температурой перехода IGBT 5-го поколения (IGBT 5), конструкция модуля должна быть модернизирована. С этой целью корпусирование модулей PrimePACK 3+ включает в себя технологию .XT и новый подход в части его конечной конструкции. Эти изменения по сравнению с более ранними корпусами модулей типа PrimePACK 3 позволяют обеспечить новой версии исполнения модулей более высокую токовую нагрузку без изменения форм-фактора самого модуля. Новый корпус PrimePACK 3+ разработан с использованием второй выходной шины переменного тока и соответствующих этому решению выходных терминалов. Такой подход приводит к уменьшению максимальной температуры терминалов на 30% при одновременном увеличении тока, что позволяет модулю успешно работать при повышенной на 25 °C температуре кристалла (чипа) по отношению к корпусам типа PrimePACK 3.

Расширение диапазона рабочих мощностей

Ранее максимальный ток, который был доступен для модулей в корпусе PrimePACK 3 в полумостовой конфигурации, составлял 1400 А. В модуле PrimePACK 3+ с использованием технологии соединения .XT [1, 3] ток при температуре чипа $T_{vj,op} = +175\text{ °C}$ был увеличен примерно на 30%, до уровня в 1800 А [1, 2], что, собственно, и требуется для многих инверторных приложений.

Такое увеличение плотности тока стало возможно только за счет оптимизации конструкции модуля в части улучшения его температурного режима. На рис. 1 показан новый PrimePACK 3+ модуль, который реализует весь потенциал 5-го поколения 1200-В и 1700-В технологии чипа IGBT в мощных силовых цепях [4]. Это достигается при той же самой занимаемой площади, как и у хорошо зарекомендовавшего себя серийно выпускаемого корпуса PrimePACK 3. Как известно, возможности в части плотности тока в этом модуле ограничиваются нагрузочной способностью его внутренней шины. Чтобы преодолеть эту проблему, конструкция корпуса модуля была изменена путем добавления второго силового выходного терминала переменного тока. Чтобы проверить эффективность этого изменения, перед началом серийного выпуска таких модулей были проведены их исследования в части определения влияния предлагаемой двойной геометрии шин переменного тока на рассогласование распределения тока во внутренних шинах модуля.

Тепловой анализ модуля

Для оценки максимальной токовой нагрузки различных вариантов исполнения конструкций модулей, при помощи расчетной платформы ANSYS Workbench сначала было выполнено их тепловое моделирование. Полученный температурный профиль определяет температуру в точках соединения шин модуля на его



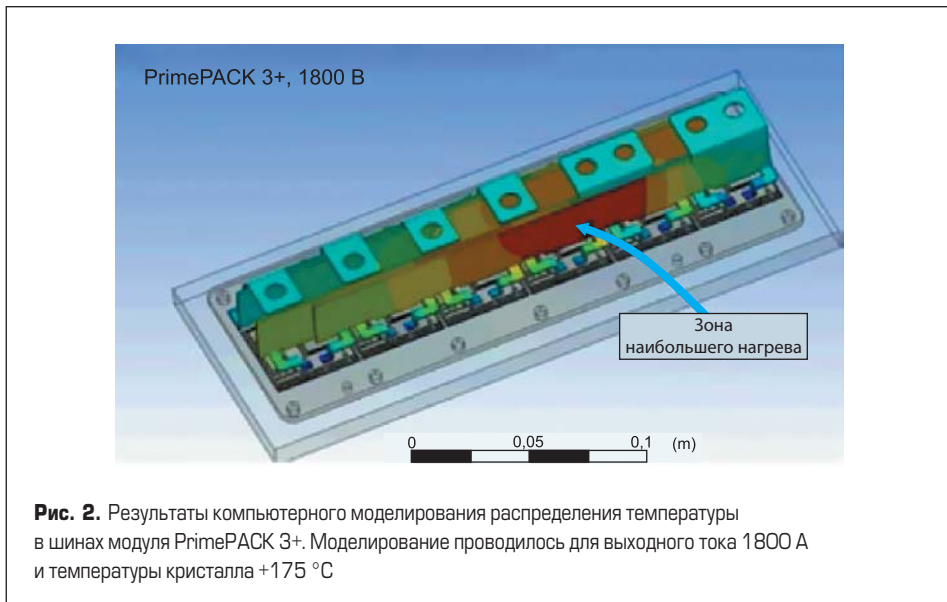
подложке. При моделировании температура выходных терминалов силового модуля была зафиксирована на уровне +105 °С.

На рис. 2 представлено распределение температуры на шинах для модуля FF1800R17IP5, выполненного в корпусе PrimePACK 3+ с использованием транзисторов IGBT 5 и с применением .ХТ-технологии. Для достижения значения температуры кристалла $T_{vjop} = +175$ °С моделирование проводилось на токе 1800 А.

Самая горячая зона по-прежнему находится в шине переменного тока, но новый дизайн приводит к значительным улучшениям в этой области. Даже при повышенной плотности тока по отношению к корпусам типа PrimePACK 3 и несмотря на увеличение температуры кристалла на +25 °С, максимальная температура на шине надежно удерживается в пределах допустимых рабочих температур материалов, окружающих эти точки максимального нагрева. Данные компьютерного моделирования подтверждают, что с использованием двойной геометрии сборных выходных шин переменного тока корпус PrimePACK 3+ хорошо подходит для эффективного использования всего потенциала IGBT 5.

Распределение тока между выходными терминалами

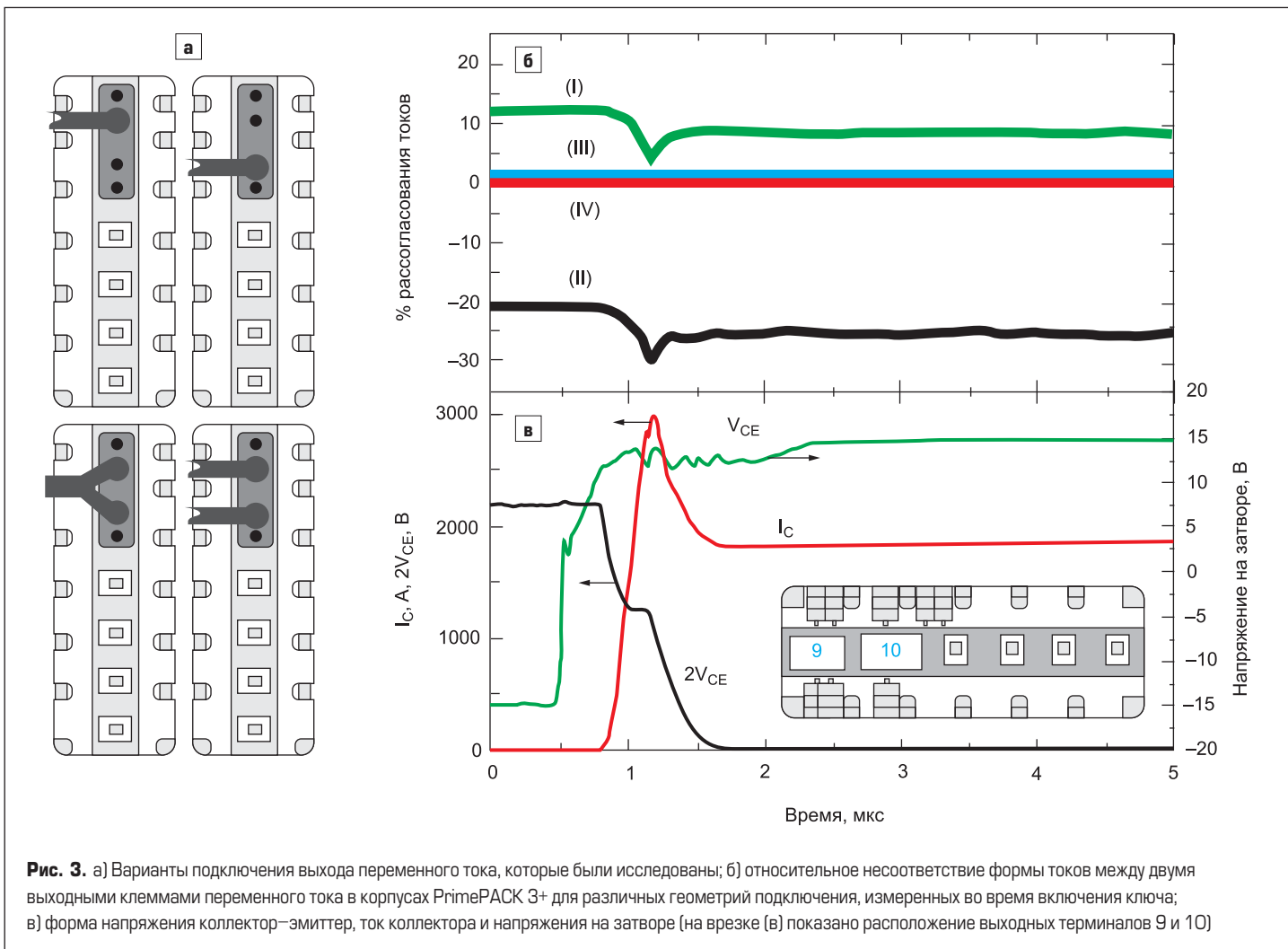
Для обеспечения симметричного и оптимального распределения тока требуется пра-



вильное решение в части внешнего подключения силовой цепи нагрузки переменного тока. С этой целью, для того чтобы исследовать распределение этих токов и влияние на это различных внешних конфигураций подключения при использовании двух выходных терминалов переменного тока, были проведены специальные испытания. На рис. 3б представлены различные варианты рассогласования токов, которые были определены для четырех

различных геометрий подключения выхода переменного тока в момент включения модуля. Измерения проводились при комнатной температуре при напряжении в цепи постоянного тока 900 В и токе нагрузки 1800 А.

На рис. 3в показаны временные диаграммы формы сигналов напряжения на затворе (V_{GE}) транзистора ключа, напряжения коллектор-эмиттер (V_{CE}) и суммарный ток коллектора (I_C) транзистора в режиме включения. Поскольку



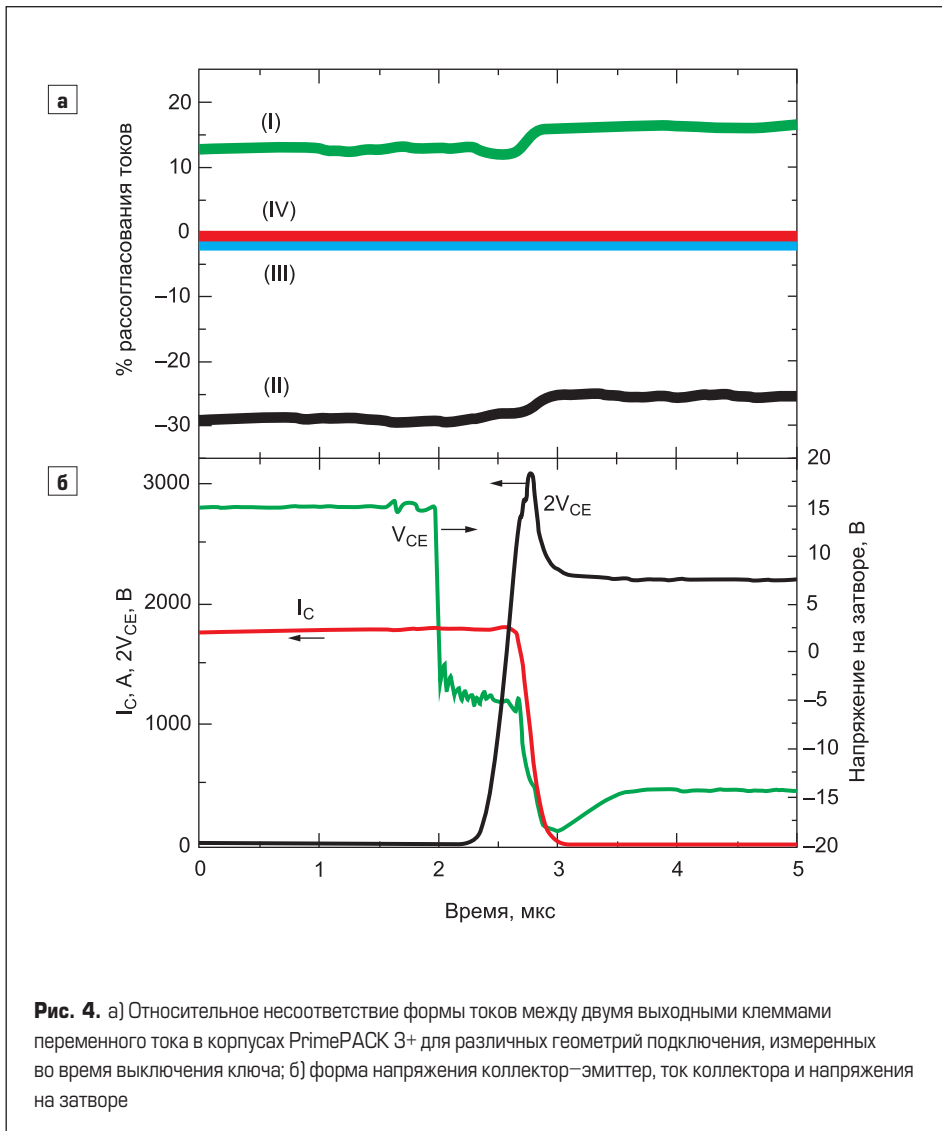


Рис. 4. а) Относительное несоответствие формы токов между двумя выходными клеммами переменного тока в корпусах PrimePACK 3+ для различных геометрий подключения, измеренных во время выключения ключа; б) форма напряжения коллектор–эмиттер, ток коллектора и напряжения на затворе

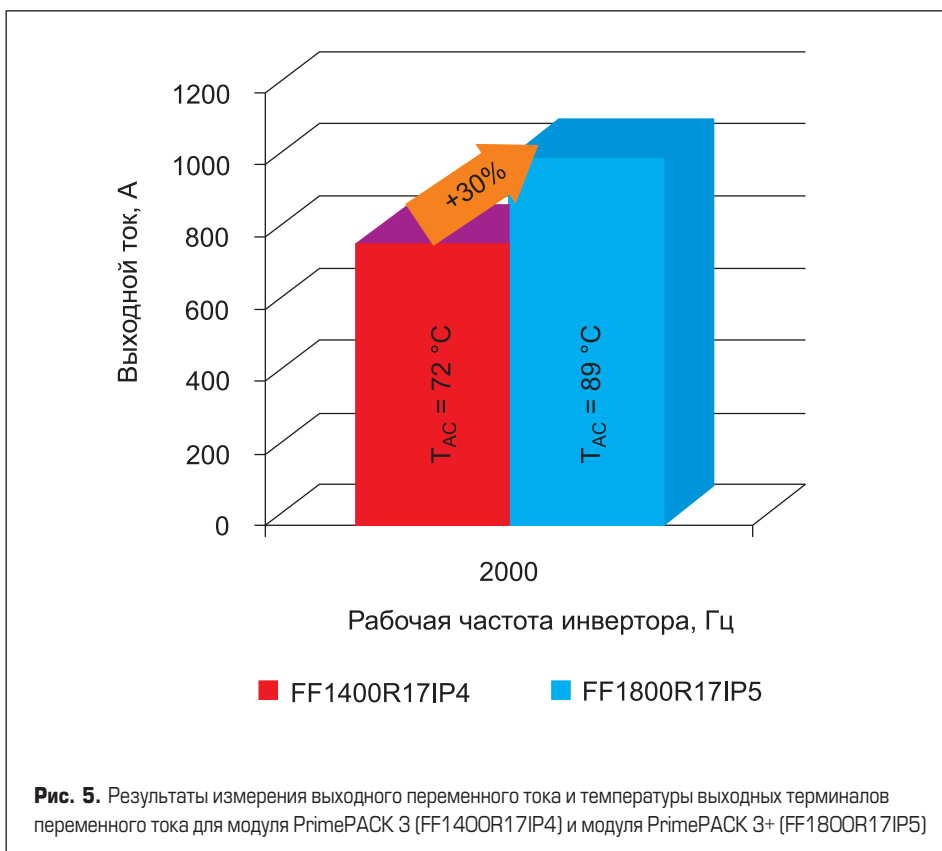


Рис. 5. Результаты измерения выходного переменного тока и температуры выходных терминалов переменного тока для модуля PrimePACK 3 (FF1400R17IP4) и модуля PrimePACK 3+ (FF1800R17IP5)

формы полного тока коллектора показывают лишь весьма незначительную их зависимость от варианта подключения цепи переменного тока, то на рис. 3в представлена временная диаграмма лишь одного варианта подключения. Кривая (I) на рис. 4б представляет собой относительное рассогласование тока при включении для геометрии соединения (I). При этом обе выходные клеммы переменного тока соединены между собой с помощью массивной медной шины, а кабель подключен ко внешнему выходному терминалу переменного тока так, как схематически показано на рис. 3а.

Для этого типа подключения имело место самое большое рассогласование по току. Кривая (II) на рис. 3б была получена при измерении с использованием геометрии подключения, аналогичной варианту (I), где два выходных терминала переменного тока соединены с помощью массивной медной шины. Тем не менее в варианте (II) кабель был подключен к клемме 10, как показано на рис. 3а. Для варианта (II) также имело место большое рассогласование по току.

Для вариантов подключения (III) и (IV) выходные терминалы для подключения силовой цепи переменного тока были подключены по отдельности к каждому контакту двумя кабелями одинаковой длины, а медная соединительная шина между терминалами была исключена. В варианте (III) два провода кабеля были скручены, а для варианта (IV) такая свивка проводов подключения нагрузки модуля не использовалась. В обоих случаях во время коммутации тока имело место весьма незначительное рассогласование тока между двумя выходными терминалами. Тем не менее самый низкий уровень рассогласования имел место при использовании варианта подключения (IV).

На рис. 4 различные геометрические формы подключения выходных терминалов переменного тока от (I) до (IV) аналогичны тем, что были представлены для режима включения на рис. 3, но они сравниваются для режима выключения IGBT. Полученные результаты очень похожи на предыдущие, полученные при исследовании режима включения ключа. Версия (II) демонстрирует наибольшее рассогласование по току, а затем идут варианты (I), (III) и (IV). Причину различия в результатах, полученных при исследовании режима включения и выключения, можно понять, учитывая различные скорости di/dt изменения тока нагрузки в этих двух режимах.

Как можно видеть, незначительное различие между индуктивностями двух выходных терминалов переменного тока в сочетании с индуктивностью соединительной медной шины приводит к несколько иной скорости изменения тока di/dt в двух внутренних шинах переменного тока. Когда два выходных терминала переменного тока индивидуально соединены двумя отдельными проводниками (варианты (III) и (IV)), то различие внутренних индуктивностей модуля оказывается несравнимо мало по сравнению с индуктивностью кабелей, что приводит к лучшему балансу токов.

Как можно видеть, и в этом режиме наименьшее рассогласование дает индивидуальное раздельное подключение двух выходных терминалов переменного тока двумя кабелями, имеющими одинаковое сопротивление и индуктивность.

Испытания в составе инвертора для реальных условий применения

Для целей теплового компьютерного моделирования, которое рассматривалось ранее, предполагалось, что температура выходных терминалов постоянна и равна +105 °С. Для оценки распределения тепла в реальных условиях эксплуатации в ходе испытания было проведено сравнение двух различных модулей в составе инвертора. Этот эксперимент проводили с использованием инвертора с системой жидкостного охлаждения [5].

Испытаниям было подвергнуто два модуля: FF1400R17IP4 на 1700 В, 1400 А IGBT 4-го поколения в корпусе PrimePACK 3 и модуль FF1800R17IP5 на 1700 В, 1800 А IGBT 5 в корпусе PrimePACK 3+. Выходные терминалы переменного тока были подключены медными проводниками сечением 200 мм², которые при подключении к выходным терминалам инвертора образовывали короткую петлю. При испытаниях какое-либо принудительное охлаждение для выходных терминалов не использовалось. Датчики температуры были присоединены к выходному терминалу переменного тока на модуле в корпусе

PrimePACK 3 и к комбинированному выходному терминалу переменного тока силового модуля PrimePACK 3+. Результаты измерения температуры показаны на рис. 5.

Температуры выходных терминалов переменного тока были измерены после достижения теплового равновесия. Модуль PrimePACK 3 (FF1400R17IP4) работал при выходном среднеквадратичном токе 780 А и частоте коммутации 2 кГц, в результате температура его выходного терминала переменного тока составила +72 °С. Для модуля PrimePACK 3+ (FF1800R17IP5) среднеквадратичный ток на той же частоте коммутации был увеличен до 1020 А, при этом измеренная температура на выходном терминале переменного тока составила +89 °С.

Следует отметить, что, несмотря на более чем 30%-ное увеличение выходного тока, температура выходных терминалов переменного тока для модуля PrimePACK 3+ без какого-либо их принудительного охлаждения увеличивается на весьма умеренную величину в 17 °С.

Выводы

Новый корпус PrimePACK 3+ расширяет диапазон рабочих токов модулей в корпусах серии PrimePACK до 1800 А. Допустимая токовая нагрузка модуля в амперах увеличивается благодаря введению в его конструкцию второй шины переменного тока, которая дает еще и дополнительные преимущества по тем-

пературному режиму модуля. Оптимальное распределение тока между двумя выходными терминалами переменного тока достигается в том случае, когда эти два терминала подключаются индивидуально с использованием двух кабелей, имеющих одно и то же сопротивление и одинаковую индуктивность, которая превышает индуктивность внутренних шин переменного тока рассматриваемого модуля. По сравнению с корпусом PrimePACK 3 испытание на модернизированных инверторах показало увеличение плотности тока на 30% при небольшом приросте температуры выходных терминалов переменного тока, которая составила всего 17 °С.

Литература

1. A. Ciliox, et al. Next step towards higher power density with new IGBT and diode generation and influence on inverter design. PCIM. Nuremberg, Germany, 2013.
2. A. Stegner, et al. Next generation 1700V IGBT and emitter controlled diode with .XT technology. PCIM. Nuremberg, Germany, 2014.
3. A. Ciliox, et al. New module generation for higher lifetime. PCIM. Nuremberg, Germany, 2010.
4. A. Stegner, et al. New PrimePACK™ package to lever IGBT5. PCIM. Nuremberg, Germany, 2015.
5. R. Nagarajan, et al. Aspects of increased power Density with the new 5th Generation IGBT demonstrated with Application relevant Measurements. PCIM. Nuremberg, Germany, 2015.