

MiniSKiiP Dual вместо IGBT 62 мм

в компактных приводах средней мощности

Миниатюрные модули семейства MiniSKiiP необычайно популярны на рынке силовой электроники. На сегодня около 20 млн таких силовых ключей работает в частотных преобразователях ведущих европейских производителей: Miller Electric, Schneider Toshiba Group, SEW Eurodrive, Siemens A&D, Silectron, Vacon. Более 70% этих устройств — приводы насосов, исполнительных механизмов промышленных роботов, прессов и компрессоров мощностью 5–40 кВт. Появление новых полумостовых модулей MiniSKiiP Dual позволяет расширить диапазон до 90 кВт, теперь они могут с успехом конкурировать со стандартными IGBT, имеющими базовую плату и винтовой способ подключения.

Фолькер Демут
(Volker Demuth)

Томас Хуртген
(Thomas Hurtgen)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В отличие от Европы, где рынок силовой электроники растет очень медленно, популярность модулей семейства MiniSKiiP быстро набирает силу в азиатском регионе. Кроме SEMIKRON, поставкой компонентов семейства занимаются еще два независимых производителя, что обеспечивает стабильное снабжение заказчиков по всему миру.

Применение пружинных контактов для подключения выводов управления и силовых цепей, а также простая, экономичная и не требующая пайки конструкция, позволяющая осуществлять сборку модуля, интерфейсной платы и теплоотвода с помощью одного винта, — таковы основные преимущества семейства модулей MiniSKiiP (рис. 1). Данные компоненты, имеющие номинальный ток до 150 А,

широко используются в промышленных приводах, преобразователях солнечных батарей и источниках питания.

Возможность соединения всех электрических цепей MiniSKiiP за одну технологическую операцию позволяет сократить затраты на разработку и производство по сравнению с традиционными конструкциями примерно на 15%. Использование пружинных контактов делает процесс сборки простым и гибким, вместо сквозных отверстий на печатной плате (PCB) требуются только контактные площадки. Важно отметить, что PCB выполняет также функцию звена постоянного тока, поскольку разводка цепей питания производится печатными линиями. Прижимной способ соединения существенно повышает надежность работы сборки в условиях тепловых и механических воздействий, что сделало компоненты семейства MiniSKiiP промышленным стандартом для производства приводов мощностью до 40 кВт [1].

Ведущие производители считают, что для успешной работы на рынке стоимость частотных преобразователей должна снижаться примерно на 3% в год. Чтобы оставаться на конкурентном уровне, необходимо уменьшать себестоимость продукции, в первую очередь за счет снижения расходов на комплектующие и производство. Как правило, для изготовления силовых преобразователей в диапазоне мощности 40–90 кВт применяются стандартные модули 34 и 62 мм с базовой платой и винтовыми терминалами.

Безбазовые компоненты семейства MiniSKiiP, имеющие простейший прижимной способ подключения, являются хорошей альтернативой стандартным IGBT. В 2014 г. линейка модулей MiniSKiiP дополнилась полумостовыми ключами MiniSKiiP Dual (конфигурация GB) на токи 150–300 А (650 В), 150–300 (1200) и 100–200 (1700), которые можно ис-



Рис. 1. Конструкция инвертора на базе MiniSKiiP: прижимная крышка, интерфейсная плата, силовой модуль, радиатор

пользовать для разработки преобразователей мощностью до 90 кВт. В них реализована новая конструктивная концепция, обеспечивающая их максимально простое включение в состав трехфазной схемы. При использовании этих компонентов одновременно решаются обе поставленные задачи — снижение стоимости комплектующих и уменьшение производственных расходов.

Подключение компонентов семейства MiniSKiiP к схеме управления и выходным терминалам производится с помощью печатной платы, требования к которой с ростом токовой нагрузки возрастают. Достаточно распространено ошибочное мнение, что ограничение выходной мощности на уровне 40 кВт объясняется тем фактом, что модули MiniSKiiP не имеют базовой платы. Ведущие производители транспортных приводов широко используют безбазовые ключи семейств SKiiP и SKiM 63/93, обеспечивающие выходную мощность до сотен киловатт и единиц мегаватт. Модули SKiiP также хорошо известны на рынке ветроэнергетики, с их помощью вырабатывается примерно половина производимой в мире энергии (около 60 ГВт).

Основанием безбазовых ключей является керамическая изолирующая DBC-подложка, которая, в отличие от базовой платы, не имеет жесткого контакта с радиатором. Благодаря этому толщина слоя теплопроводящей пасты может быть уменьшена с 80–100 до 20–50 мкм, что снижает (с учетом отсутствия базы) суммарную величину теплового сопротивления $R_{th(j-s)}$ примерно на 20–30%. Прижимной способ соединения, отсутствие паяного слоя между DBC-подложкой и базой, менее напряженные тепловые режимы позволяют существенно повысить надежность и ресурс силовых ключей.

Как отмечено выше, подключение всех цепей MiniSKiiP осуществляется посредством пружинных контактов через интерфейсную печатную плату. Очевидно, что для трассировки силовых шин в преобразователях мощностью до 90 кВт требуется PCB с повышенной нагрузочной способностью, исключающей перегрев медных дорожек. Для обеспечения надежной и долговременной эксплуатации температура меди не должна превышать +70...+80 °C при полной мощности.

Максимальная токовая нагрузка для стандартных плат FR-75 при корректном выборе ширины дорожек составляет около 150 А. Для обеспечения мощности инвертора 80–90 кВт нагрузочную способность печатных трасс следует увеличить до 300 А, что соответствует $I_{rms} = 180$ А для модулей 12 класса. Толщина слоя металлизации в этом случае должна быть порядка 210 мкм. Кроме того, необходимо учесть плотность мощности и тепловыделение внутри самого MiniSKiiP, в состав которого входит выпрямительный мост, инвертор и тормозной каскад. С одной стороны, высокая степень интеграции обеспечивает лучшие массогабаритные и экономические показатели, с другой — все силовые каскады выделяют тепло, которое должно быть отведено на радиатор.

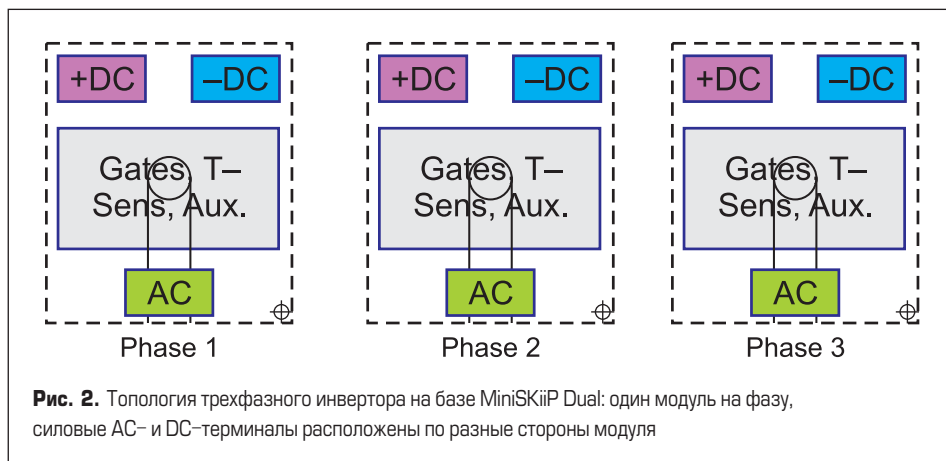


Рис. 2. Топология трехфазного инвертора на базе MiniSKiiP Dual: один модуль на фазу, силовые AC- и DC-терминалы расположены по разные стороны модуля

При разработке преобразователей с использованием полумостовых ключей MiniSKiiP Dual необходимо принять во внимание три важных момента. Во-первых, все компоненты семейства выпускаются в четырех типах стандартных корпусов со стандартизованным расположением пружинных контактов, что обеспечивает унификацию и упрощает процесс проектирования. Во-вторых, при проведении теплового расчета необходимо учитывать тот факт, что в состав трехфазного инвертора входят три модуля, а не один, как было ранее. И наконец, следует выбирать материал интерфейсной платы и ширину печатных дорожек, обеспечивающие достаточную нагрузочную способность.

На рис. 2 показана топология трехфазного инвертора на базе MiniSKiiP Dual. В отличие от конструкции, приведенной на рис. 1, здесь использован один модуль на фазу. Пружинные контакты сгруппированы таким образом, что силовые подключения DC-питания расположены на одной стороне корпуса, а AC-выходы — на другой. Подобная схема подключения обеспечивает простое и низкоиндуктивное соединение по DC-шине и, соответственно, низкий уровень коммутационных перенапряжений.

Разделение трех стоек инвертора и соответствующее положение модулей на поверхности радиатора улучшает процесс распределения тепла, снижает перегрев кристаллов, исключает взаимное тепловое влияние плеч преобразователя, т. е. улучшает мощностные характеристики.

Еще одной проблемой является повышение нагрузочной способности пружинных контактов. Выпускаемые в настоящее время MiniSKiiP-модули в конфигурации AC (трехфазный инвертор) имеют максимальный ток 150 А, а в конфигурации CIB (выпрямитель — инвертор — тормозной каскад) — 100 А. Для подключения силовых AC- и DC-цепей пружины объединяются в параллельные группы от двух до восьми. Поскольку каждый из контактов проводит не более 20 А (RMS), общая нагрузочная способность составляет 160 А. Соответственно, силовые терминалы модулей MiniSKiiP Dual в наиболее мощном варианте должны объединять 16 пружинных выводов. В этом случае максимальный выходной ток может достигать 320 А (RMS), при номиналь-

ной нагрузке 170–180 А это обеспечивает достаточную перегрузочную способность.

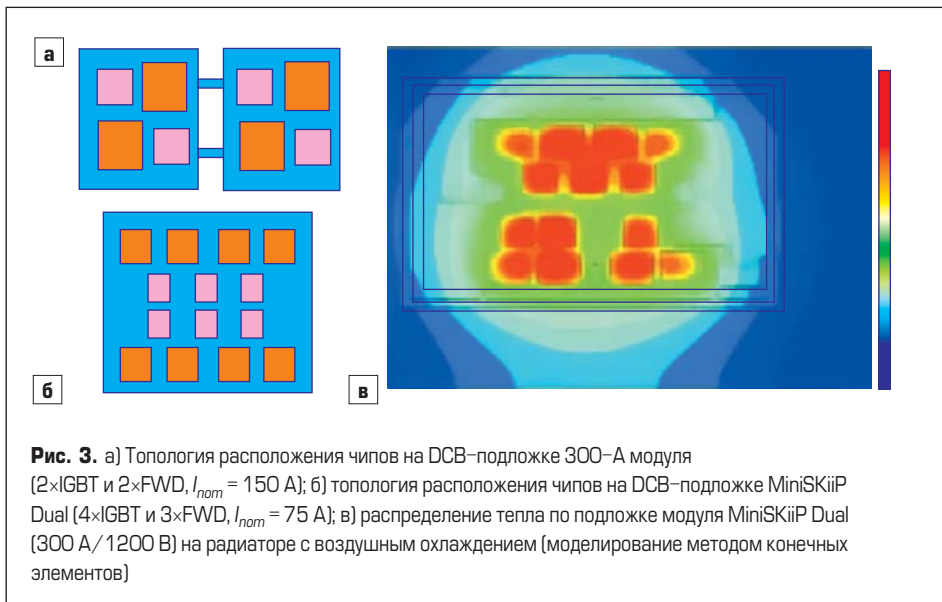
Тепловые характеристики

Анализ тепловых характеристик и обеспечение отвода тепла являются важнейшими вопросами, которые необходимо решать при проектировании силовой преобразовательной техники. Температура кристаллов новых поколений в перегрузочных режимах может достигать +175 °C, и без соответствующей системы охлаждения невозможно обеспечить надежную работу изделия в течение срока службы. Эффективность передачи тепла от полупроводниковых чипов на радиатор зависит от многих факторов, в первую очередь от теплопроводности интерфейсных материалов, входящих в состав силового ключа, и площади сечения теплового потока.

Для безбазовых модулей, таких как MiniSKiiP, в процессе передачи тепла участвуют кристаллы, слой пайки, DBC-подложка, слой термопасты и радиатор. По сравнению с обычными компонентами количество материалов и интерфейсов здесь меньше, поскольку отсутствует базовая плата и ее паяный слой, соответственно, теплопередача у таких ключей более эффективна.

Однако отсутствие базы имеет и свой недостаток, поскольку она выполняет не только функцию механического крепления. Локальные тепловые перегрузки, создаваемые кристаллами IGBT и диодов, горизонтально распределяются в медной базе, расположенной в основании силового модуля. За счет этого увеличивается сечение теплового потока и, в определенном диапазоне постоянных времени, снижается величина теплового сопротивления «кристалл–радиатор» $R_{th(j-s)}$.

Однако на самом деле применение безбазовых ключей позволяет снизить значение $R_{th(j-s)}$ за счет уменьшения толщины слоя термопасты, на который в системах с жидкостным охлаждением приходится до 30% теплового сопротивления. Кроме того, в конструкциях модулей с базовой платой и без нее заложены разные дизайнерские идеи. В MiniSKiiP Dual реализована одна из основных концепций силовых ключей: установка на подложке большого количества маломощных параллельных



кристаллов предпочтительнее, чем меньшего числа более мощных чипов.

В стандартном «базовом» модуле с номинальным током 300 А использовано по два 150-А кристалла IGBT и два диода (FWD) на одно плечо (рис. 3а). Тепловые свойства MiniSKiiP Dual оптимизированы за счет увеличения количества параллельных чипов, как показано на рис. 3б: в каждом плече установлено четыре 75-А IGBT и три FWD. Это позволяет обеспечить более равномерное распределение тепла по поверхности подложки, т. е. увеличить эквивалентную площадь сечения теплового потока и частично решить задачу, выполняемую базовой платой.

Давление, создаваемое центральным крепежным винтом MiniSKiiP, распределяется по поверхности DCB за счет многоточечного контакта между корпусом модуля и подложкой. При этом усилие прижима подложки к радиатору оказывается намного более равномерным, чем при традиционном способе крепления базовой платы за четыре угла. Как было отмечено выше, прижимной способ установки MiniSKiiP и отсутствие жесткой связи базы с радиатором позволяет в два-три раза уменьшить толщину слоя термопасты. В результате удается существенно снизить суммарную величину теплового сопротивления, что является одним из главных достоинств «безбазовых» компонентов. В сочетании с оптимизированной топологией размещения силовых кристаллов это дает возможность заметно снизить перегрев модуля, что подтверждает моделирование методом конечных элементов. Условия моделирования: DBC Al₂O₃; $T_a = +25$ °C; конвекция 1800 Вт·К/м², потери мощности IGBT/FWD 1 Вт/м²; толщина слоя пасты 50 мкм (рис. 3в).

Для определения нагрузочных пределов кристаллы IGBT и диодов при моделировании подвергались одинаковым тепловым воздействиям. В отношении инвертора привода такие условия являются в большей степени искусственными, однако они соответствуют случаю максимального тепловыделения. При анализе методом конечных элементов плот-

ность потерь силовых кристаллов может быть увеличена до 1 Вт/мм² до достижения самым «горячим» чипом максимальной рабочей температуры +150 °C. Как и ожидалось, зона наибольшего перегрева находится в центре модуля. Суммарные потери мощности кристаллов IGBT — 280 Вт и FWD — 160 Вт, при этом, благодаря их равномерному распределению по поверхности подложки, выделяемое тепло достаточно эффективно отводится на радиатор. Таким образом, по плотности мощности миниатюрный полумост MiniSKiiP Dual оказывается эквивалентным стандартному модулю IGBT в корпусе 62 мм с базовой платой.

Трассировка силовых шин на печатной плате

Использование печатных трасс PCB в качестве силовых шин представляет известную проблему из-за их ограниченной токонесущей способности. Стандартные печатные платы с толщиной слоя металлизации 75–105 мкм обеспечивают удовлетворительные характеристики при мощности до 40 кВт, достаточной для работы MiniSKiiP в конфигурации AC и CIB. Пружинный способ подключения выводов при увеличении мощности до 90 кВт ($I_{RMS} = 150...180$ А) требует применения интерфейсной платы с повышенной нагрузочной способностью.

Для снижения активных потерь и исключения перегрева медных дорожек толщины слоя металлизации следует увеличить до 210 мкм. Ширина трасс также должна быть больше для получения необходимого сечения по меди, обеспечивающего соответствующую плотность тока. Отметим, что еще одним достоинством широких дорожек является большая площадь поверхности, охлаждаемой за счет конвекции воздуха. Исследования тепловых режимов сборки MiniSKiiP Dual с многослойной печатной платой с толщиной дорожек 210 мкм (или напаянным медным профилем [2]) показали отсутствие точек критического перегрева при выходном токе 170 А.

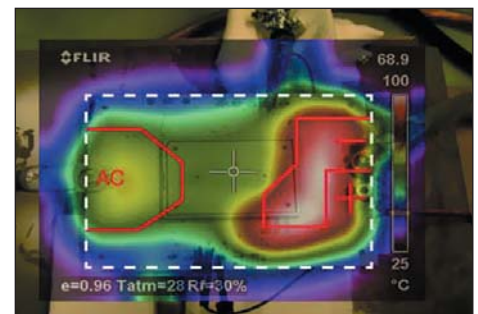


Рис. 4. Тепловой профиль поверхности печатной платы (инфракрасная камера, вид сверху, наложение). Белая пунктирная линия определяет форму PCB, красная линия очерчивает границы подключения AC- и DC(-)-терминалов к дорожкам платы

Результаты измерений, проведенных на работающем преобразователе с помощью инфракрасной камеры, представлены на рис. 4, где показан тепловой профиль двухсторонней печатной платы (толщина металлизации 210 мкм), установленной на модуле MiniSKiiP Dual (300 А/1200 В). Отвод тепла от силового ключа осуществляется посредством жидкостной системы охлаждения, температура радиатора поддерживается на уровне +83 °C, что позволяет имитировать реальные условия работы инвертора. Для исследования влияния топологии платы на тепловые режимы в AC- и DC-цепях использованы дорожки с разной шириной. Подключение AC-терминалов производится трассой шириной 7 см, а DC-цепь гораздо уже.

В ходе теста между выводами AC и DC(-) постоянно протекает ток 170 А, при этом средняя температура печатной платы колеблется около +70 °C. Однако перегрев областей вблизи силовых терминалов, где плотность тока максимальна, оказывается намного выше. Особенно горячая зона (более +90 °C) наблюдается рядом с DC(-)-выводом, в зоне AC-подключения температура находится в пределах +70...+80 °C, что связано с разной шириной и топологией трасс на PCB. Наиболее широкая дорожка подходит к AC-терминалу, соответственно, у нее самые низкие активные потери на омическом сопротивлении меди.

На основе полученных результатов были выработаны базовые правила трассировки интерфейсных плат силового инвертора. Соблюдение этих правил, которые должны стать частью технической документации, позволит исключить перегрев PCB при токах до 170 А и обеспечить надежную, долговременную работу модулей MiniSKiiP Dual в инверторах мощностью 50–90 кВт. Важно отметить, что для данного мощностного диапазона используются обычные, доступные на рынке печатные платы с повышенной нагрузочной способностью. С их помощью пользователь может создавать легкие, компактные, надежные и простые в производстве преобразовательные устройства.

Выходная мощность

Приведенные выше соображения, а также результаты экспериментов использованы для расчета тепловых режимов и анализа мощностных характеристик. На рис. 5 показана зависимость выходного тока I_{out} от частоты трехфазного инвертора на базе модулей MiniSKiiP Dual (300 А/1200 В), установленных на радиаторе с воздушным охлаждением. Кристаллы IGBT и диодов последних поколений допускают долговременную эксплуатацию при температуре до +150 °С. Представленная на рисунке кривая I_{out} рассчитана на основе этого значения для наиболее нагретого из чипов.

При частоте коммутации $f_{sw} = 4$ кГц максимальный ток инвертора при указанных условиях эксплуатации составляет 180 А, что эквивалентно выходной мощности более 100 кВт при напряжении на DC-шине $V_{DC} = 750$ В. С ростом частоты I_{out} снижается, например, при $f_{sw} = 8$ кГц допустимое значение не превышает 125 А ($P_{out} = 74$ кВт), а при $f_{sw} = 12$ кГц — $I_{out} = 90$ А (P_{out} более 50 кВт). По тепловым режимам и мощностным характеристикам компактные силовые ключи MiniSKiiP Dual оказываются сопоставимыми со стандартными модулями IGBT 62 мм, при этом они обеспечивают и достаточную перегрузочную способность.

Заключение

С момента начала производства компонентов семейства MiniSKiiP эта торговая марка стала одной из самых известных в мире силовой электроники. Широкая популярность модулей, ориентированных на применение в электроприводе, обусловлена не только отличными тепловыми и электрическими характеристиками, но и простотой их применения. Для установки MiniSKiiP на радиатор и подключения его выводов к интерфейсной плате требуется только один крепежный элемент (рис. 1, 6).

При сборке полностью исключается пайка, все электрические соединения осуществляются только за счет прижима. Использование пружинных контактов для подключения силовых и сигнальных цепей является уникальной особенностью компонентов серии MiniSKiiP, их высокая надежность и стойкость к тепловым, электрическим и механическим воздействиям подтверждена испытаниями и многолетним опытом эксплуатации [4].

Таблица. Типы модулей MiniSKiiP Dual (конфигурация GB)

Тип модуля	V_{CES} , В	$I_{ном}$, А	Тип корпуса
SKiiP 24GB 07E3V1	650	150	Mini 2
SKiiP 26GB 07E3V1		200	Mini 2
SKiiP 38GB 07E3V1		300	Mini 3
SKiiP 24GB 12T4V1	1200	150	Mini 2
SKiiP 26GB 12T4V1		200	Mini 2
SKiiP 38GB 12T4V1		300	Mini 3
SKiiP 22GB 17E4V1	1700	100	Mini 2
SKiiP 24GB 17E4V1		150	Mini 2
SKiiP 36GB 17E4V1		200	Mini 3

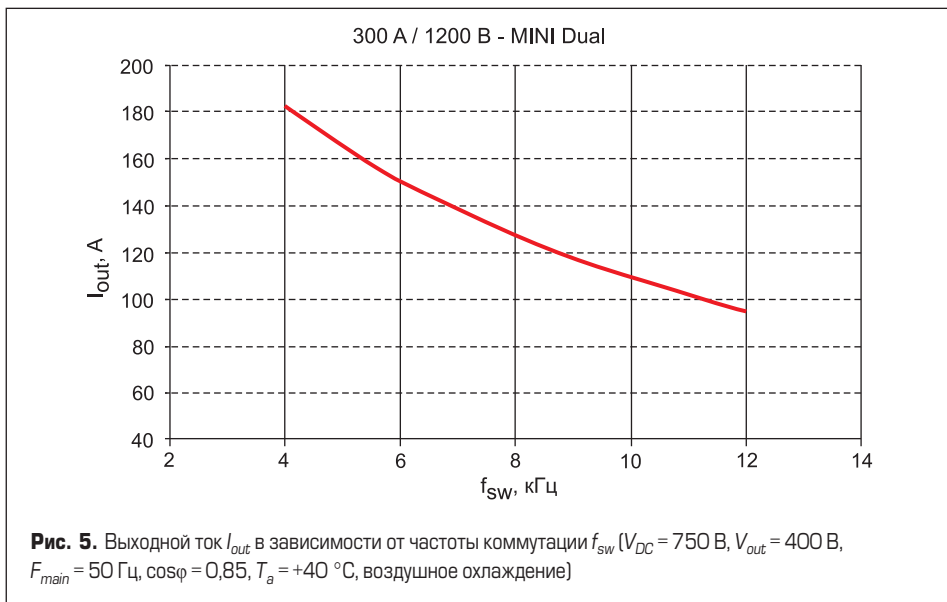


Рис. 5. Выходной ток I_{out} в зависимости от частоты коммутации f_{sw} ($V_{DC} = 750$ В, $V_{out} = 400$ В, $F_{main} = 50$ Гц, $\cos\phi = 0,85$, $T_a = +40$ °С, воздушное охлаждение)

Появление новых полумостовых модулей MiniSKiiP Dual расширило возможности платформы, теперь на базе компонентов семейства можно разрабатывать компактные и недорогие приводы мощностью до 90 кВт. Ранее в данном диапазоне мощности использовались только стандартные силовые ключи с базовой платой и традиционным способом подключения. Типы и основные характеристики MiniSKiiP Dual с рабочим напряжением 650, 1200 и 1700 В представлены в таблице.

Номинальный ток силовых ключей MiniSKiiP Dual, выпускаемых в корпусах Mini 2 и Mini 3, находится в диапазоне 150–300 А. В них применены кристаллы IGBT Trench 4 и диоды SEMIKRION CAL, отличающиеся плавной характеристикой восстановления и высокой стойкостью к динамическим нагрузкам.

Расширение мощностного диапазона потребовало внесения ряда конструктивных доработок. В состав трехфазного инвертора

входят три полумостовых ключа, которые должны быть объединены по DC-шине. Выходы DC и AC находятся на противоположных сторонах корпуса модуля, такое положение терминалов обеспечивает максимально простую и низкоиндуктивную топологию преобразователя. При использовании MiniSKiiP Dual каждое из плеч инвертора размещается в отдельном модуле, источники тепла при этом разнесены по поверхности радиатора, что обеспечивает более эффективный отвод тепла и отсутствие зон локального тепловыделения. То же самое относится и к топологии размещения кристаллов на DCB-подложке MiniSKiiP Dual: в каждом плече использовано четыре параллельных чипа IGBT и три диода.

Принципиальной особенностью конструкции инвертора на базе модулей MiniSKiiP является применение печатной платы с высокой токонесущей способностью для разводки шин звена постоянного тока. Инвертор с вы-

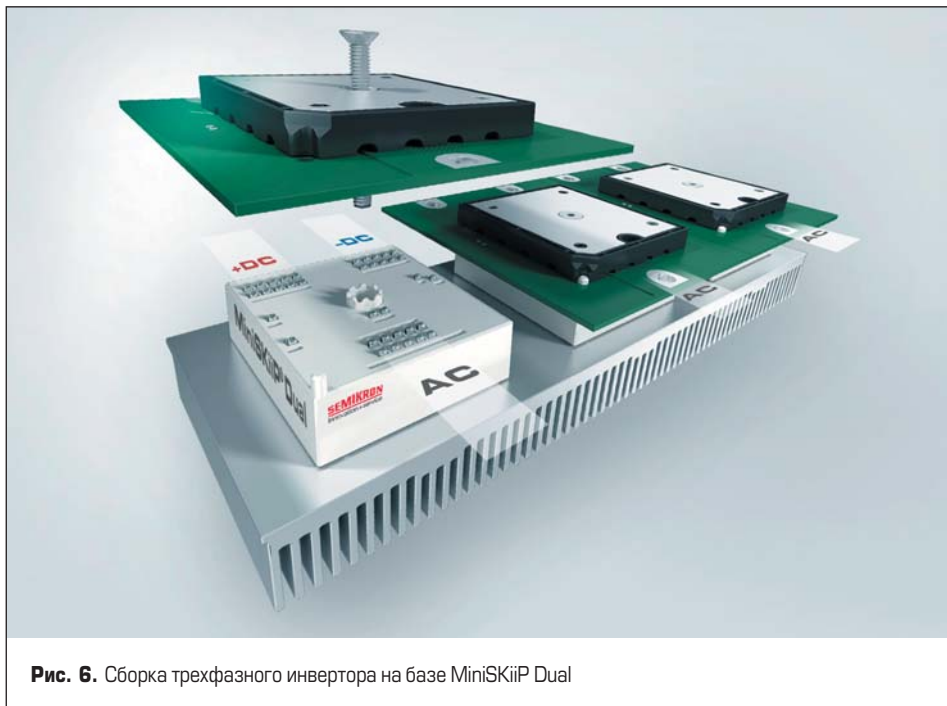


Рис. 6. Сборка трехфазного инвертора на базе MiniSKiiP Dual

ходным током до 170 А может быть создан с помощью PCB с толщиной металлизации 210 мкм. При правильном выборе ширины дорожек и оптимальной топологии трасс средняя температура платы при этом не превышает +70...+80 °С. Для подключения силовых AC- и DC-цепей MiniSKiiP Dual в параллель включается до 16 пружинных контактов, объединенных в группы по разные стороны корпуса модуля.

Разработка новой серии безбазовых ключей MiniSKiiP Dual открывает широкие возможности для создания компактных, надежных и недорогих инверторов широкого применения в диапазоне мощности 40–90 кВт. Простая технология сборки с применением одного крепежного элемента, отсутствие необходимости использования медных шин в звене постоянного тока позволяет снизить стоимость готового изделия примерно на 15% по срав-

нению с традиционным решением на основе стандартных модулей IGBT с базовой платой и винтовым подключением терминалов.

Дальнейшее расширение области применения компонентов семейства связано с активным использованием широкозонных полупроводниковых материалов, в первую очередь на основе карбида кремния (SiC). К неоспоримым достоинствам SiC-структур на уровне силовых модулей следует отнести низкий уровень динамических потерь и хорошие тепловые характеристики. На системном уровне преимущества силовых карбидокремниевых ключей позволяют заметно повысить выходную мощность преобразовательных устройств при существенном снижении их массогабаритных показателей. Карбидокремниевые структуры обладают положительным температурным коэффициентом прямого напряжения (как для MOSFET, так и для диодов), что по-

зволяет наращивать мощность за счет параллельного соединения кристаллов в модуле и силовых ключей в системе.

Литература

1. Langenbacher A. Taking Power density to a New Level // Bodo's Power Systems. Sept. 2011.
2. Giessmann A., Langenbacher A. A Look into the Future: Savings Potential in Inverter Design. // Bodo's Power Systems. Dec. 2011.
3. Scheuermann U., Beckedahl P. The Road to the Next Generation Power Module – 100% Solder Free Design // Proc. CIPS 2008, ETG-Fachbericht 111, 111–120. Nuremberg. 2008.
4. Колпаков А. Надежность прижимных соединений силовых модулей в условиях агрессивных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.