

Новые кристаллы и топологии MiniSKiiP

для повышения плотности мощности

Благодаря предельной простоте монтажа компоненты семейства MiniSKiiP используются в широкой гамме частотных преобразователей и получают все большее распространение. Компания SEMIKRON представляет новые трехуровневые модули MiniSKiiP Dual Split MLI, предназначенные для компактных «струнных» инверторов мощностью до 180 кВт с напряжением DC-шины 1500 В. Аналогичная версия модулей, ориентированная на применение в автономных модульных источниках бесперебойного питания (UPS) мощностью до 150 кВт, предлагается и для 1000-В DC-шины.

Стефан Хаузер
(Stefan Häuser)

Бернард Айчлер
(Bernhard Eichler)

Томас Хуртген
(Thomas Hürtgen)

Вернер Обермайер
(Werner Obermaier)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Два десятилетия и более 40 млн выпущенных компонентов сделали платформу MiniSKiiP (рис. 1) промышленным стандартом для приводов малой и средней мощности. Широкой популярностью этих модулей способствовало сочетание технологии пружинных контактов и простоты сборки за один производственный этап без применения пайки [1–3]. С появлением компонентов, разработанных для применения в многоуровневых и четырехквadrантных приводах, семейство MiniSKiiP увеличилось в очередной раз.

В результате применения новейших кристаллов IGBT 7 в модулях MiniSKiiP установлен новый рекорд плотности мощности. Конструктив MiniSKiiP позволяет реализовать преимущества технологии карбида

кремния. Компания SEMIRON предлагает широкую гамму гибридных и 100%-ных SiC MOSFET-модулей, созданных с применением чипов последних поколений от Rohm и Infineon.

Концепция монтажа, выполненного за один производственный этап, не только имеет огромный потенциал в приводных применениях, но и пригодна для любого крупносерийного производственного процесса, например при изготовлении «струнных» солнечных инверторов.

Номенклатура трехуровневых модулей MiniSKiiP MLI пополнилась новыми компонентами MiniSKiiP Dual Split MLI с рабочим напряжением 1200 В и номинальным током 400 А. Также предлагается гибридная версия с фиксирующими SiC-диодами Шоттки, что

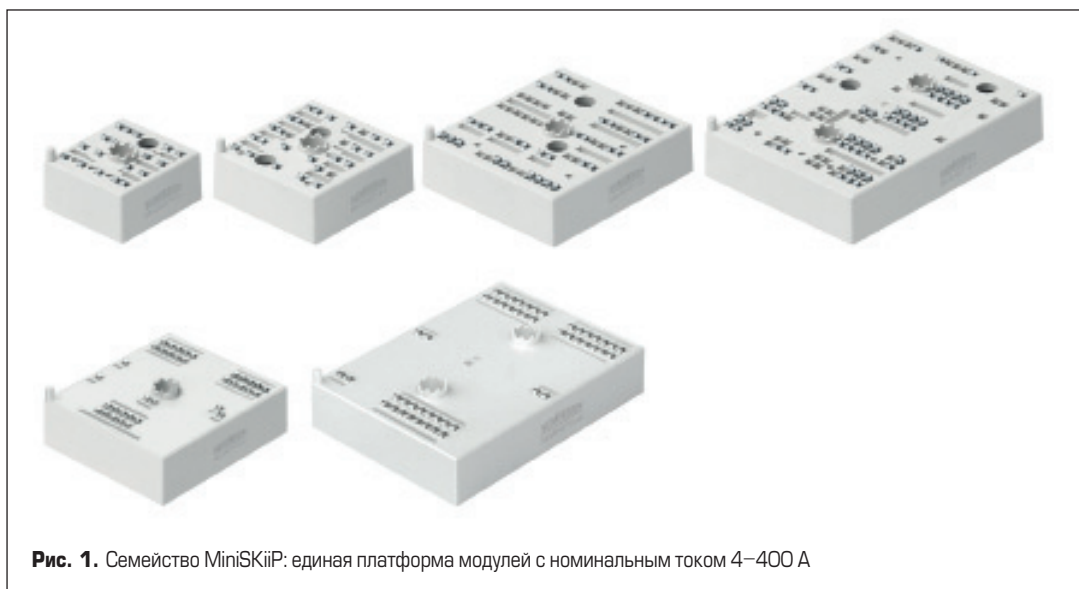


Рис. 1. Семейство MiniSKiiP: единая платформа модулей с номинальным током 4–400 А

значительно повышает эффективность преобразования. Новые модули предназначены для монтажа на печатную плату, ориентированы на установку в инверторах солнечных батарей мощностью до 180 кВт при напряжении DC-шины 1500 В. Расположение силовых и сигнальных пружинных выводов MiniSKiiP Dual обеспечивает низкую индуктивность звена постоянного тока, простоту подключения драйвера и соединения AC-выводов.

Предложенное SEMIKRON техническое решение позволяет упростить параллельное включение трехуровневых инверторов NPC и разрабатывать масштабируемые модульные фазные сборки. Суть его заключается в разделении схемы NPC на две половины, называемые MLI TOP и MLI BOT. Каждая из них размещается в отдельном модуле, как показано на рис. 2. Идея уже реализована в корпусах SEMITOP E2 и SEMITRANS 10, конструктив MiniSKiiP является третьим вариантом, в котором реализован данный новаторский подход.

В модулях MiniSKiiP MLI установлены чипы новейших поколений — например, использование высокоскоростных IGBT 12F4 в качестве быстрых ключей T1/T4 и диодов SEMIKRON CAL4F заметно сократило потери переключения. От ключей T2/T3 не требуется большая скорость коммутации, поэтому они выполнены на кристаллах IGBT 12T4 в сочетании с выпрямительными диодами для снижения потерь проводимости.

Кроме того, была оптимизирована токовая цепь элементов фиксирующей нейтрали (D5 и D6): здесь возможен выбор между стандартной версией с диодами SEMIKRON CAL4F или высокоэффективным исполнением с SiC-диодами Шоттки, обеспечивающим КПД до 99,3%. Для упрощения процесса проектирования разработан демонстрационный образец сборки трехфазного 3L-инвертора с напряжением DC-шины 1500 В (рис. 3).

Модули MiniSKiiP Dual Split MLI будут выпускаться и с кристаллами 650В IGBT. В этом случае в выходном каскаде предусмотрено сочетание быстрых S5 IGBT с мягкой коммутацией (T1, T4) и L5 IGBT, имеющих низкое напряжение насыщения V_{CEsat} (T2, T3). Компоненты предназначены для применения в преобразователях с напряжением DC-шины до 1000 В и AC-выходом 400 В. В первую очередь это конвертеры для UPS и солнечной энергетики мощностью до 140 кВт·А с монтажом в шкаф 19". Измеренная эффективность преобразования достигает 99% при полной нагрузке, таким образом данное решение устанавливает новый стандарт плотности мощности для модульных UPS. Тесты показали, что при использовании версий с фиксирующими SiC-диодами Шоттки (D5, D6) можно получить КПД свыше 99%.

Закономерен вопрос о пригодности конструктива MiniSKiiP для установки карбидокремниевых чипов. В общем случае главным требованием к корпусу модулей SiC MOSFET является сверхнизкая паразитная индуктивность. Однако для слаботочных ключей это условие не является строго обязательным. Коэффициент, учитывающий соотношение

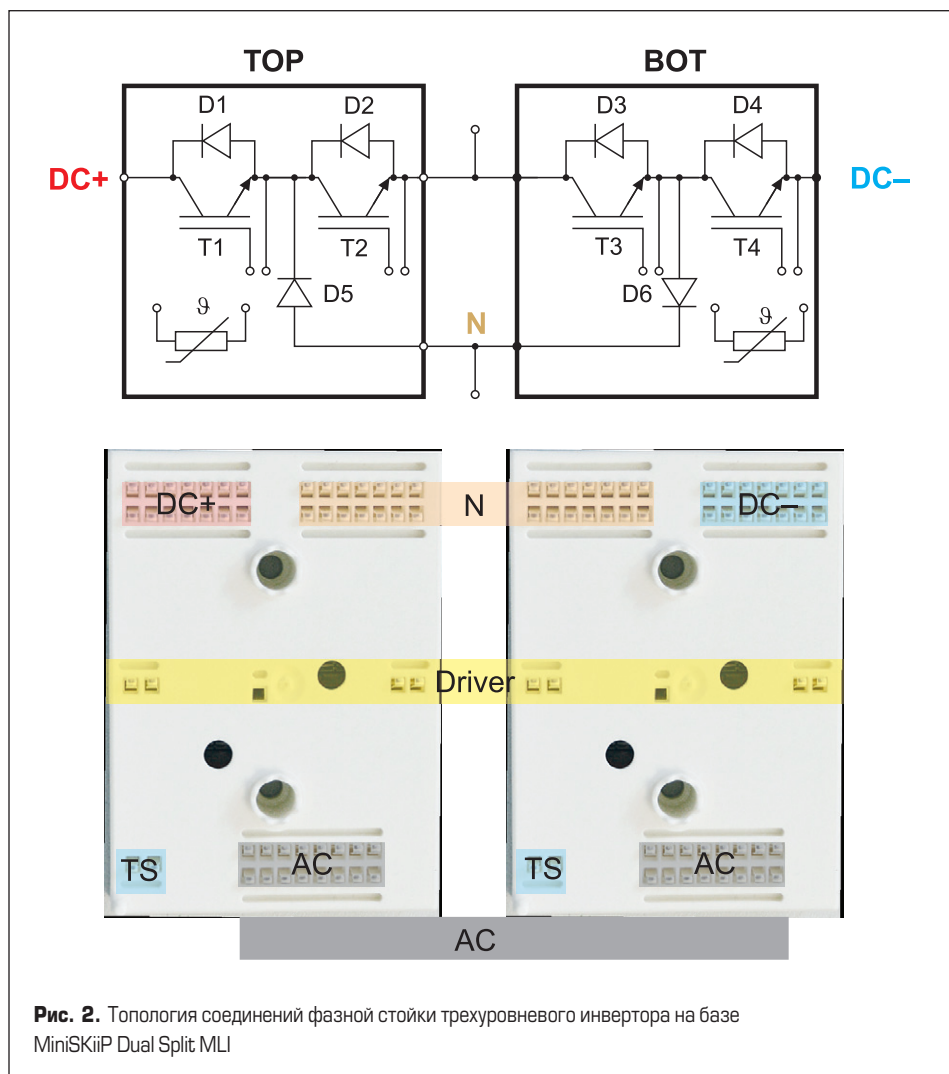


Рис. 2. Топология соединений фазной стойки трехуровневого инвертора на базе MiniSKiiP Dual Split MLI

индуктивности и номинального тока модуля ($L_{stray} \times I_{nom}$), позволяет оценить потенциальную эффективность SiC-ключа. Чем меньше этот коэффициент, тем выше «функциональность» элемента.

Распределенная индуктивность трехфазного MiniSKiiP, определяемая топологией шин

и дизайном пружинных контактов, находится в диапазоне 20–25 нГн. У самого мощного модуля с номинальным током 90 А коэффициент составляет $2,25 \times 10^{-6}$, что считается приемлемым: никаких ограничений в производительности при этом не ожидается. Для MiniSKiiP с меньшим током, например 30 А,

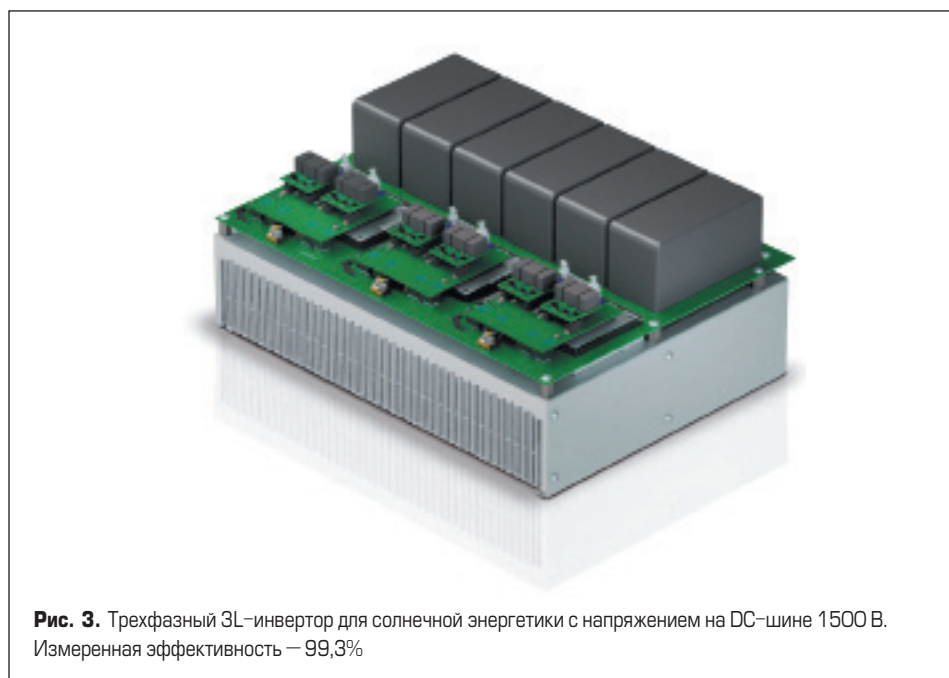
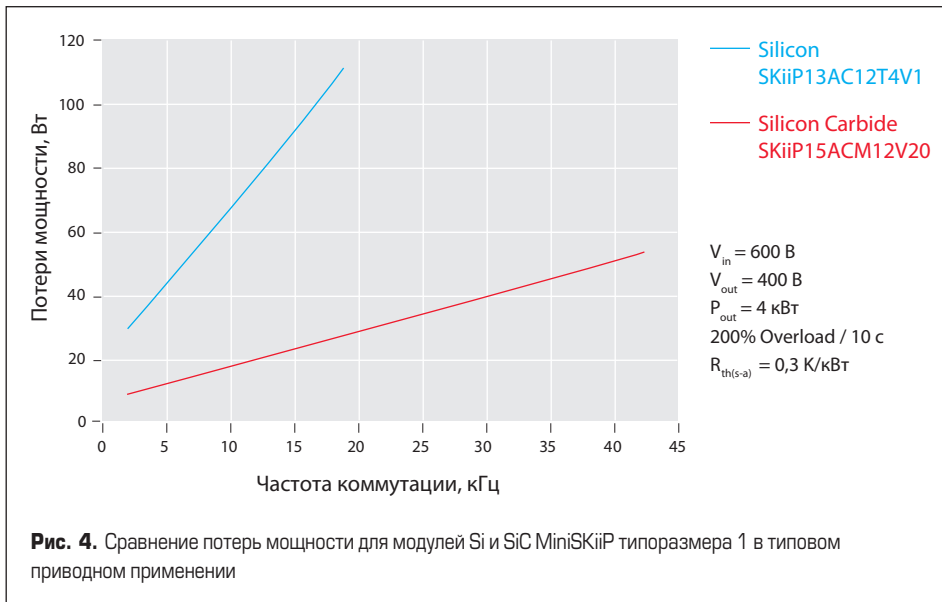


Рис. 3. Трехфазный 3L-инвертор для солнечной энергетики с напряжением на DC-шине 1500 В. Измеренная эффективность — 99,3%



коэффициент снижается до $0,75 \times 10^{-6}$, что делает полностью оправданным применение в них карбидокремниевых кристаллов.

В настоящее время SEMIKRON предлагает SiC MOSFET-модули 12-го класса в трехфазной конфигурации (AC) с номинальным током 25–90 А. Последним дополнением стал 6-ключевой MiniSKiiP типоразмера 1 с сопротивлением канала $R_{ds,on}$ — 45 мОм, созданный с помощью новейших кристаллов CoolSiC Infineon. На рис. 4 показано сравнение потерь мощности моторного привода мощностью 4 кВт. Для этого случая скорость нарастания напряжения dv/dt SiC MOSFET ограничена на уровне 10 кВ/мкс, чтобы снизить нагрузку на изоляцию обмоток двигателя и соблюсти требования по электромагнитной совместимости. Применение карбидокремниевых ключей позволяет уменьшить потери мощности на частоте 15 кГц на 75%, эффективность преобразования при этом повышается с 97,8

более чем до 99%. Таким образом, модули SiC MOSFET идеально подходят для разработки компактных высокоскоростных приводов, интегрированных в корпус двигателя.

Критические частоты коммутации инвертора на основе кремниевых ключей находятся в диапазоне 15–18 кГц, при этом возрастает опасность перегрева Si-кристаллов выше предельного уровня +150...+175 °С. В то же самое время карбид кремния способен работать на частотах свыше 40 кГц, генерируя такие же потери, как Si IGBT на 8 кГц.

Гибкость платформы MiniSKiiP позволяет реализовать достоинства перспективных полупроводниковых технологий в инверторах приводов, например в этом конструктиве выпущен первый модуль SEMIKRON с кристаллами IGBT 7 от Infineon. В чипах 7-го поколения IGBT использована усовершенствованная микроструктура Trench-ячеек и новейшая тонкопленочная технология. Это позволило

снизить напряжение насыщения до 1,75 В при номинальном токе и максимальной температуре кристаллов ($T_j = +175 \text{ °C}$) и 1,7 В при рабочей температуре +150 °С. В сравнении с показателями предыдущего поколения IGBT 4 ($V_{CEsat} = 2,1 \text{ В}$ при $T_j = +150 \text{ °C}$) уровень статических потерь снижен более чем на 20%.

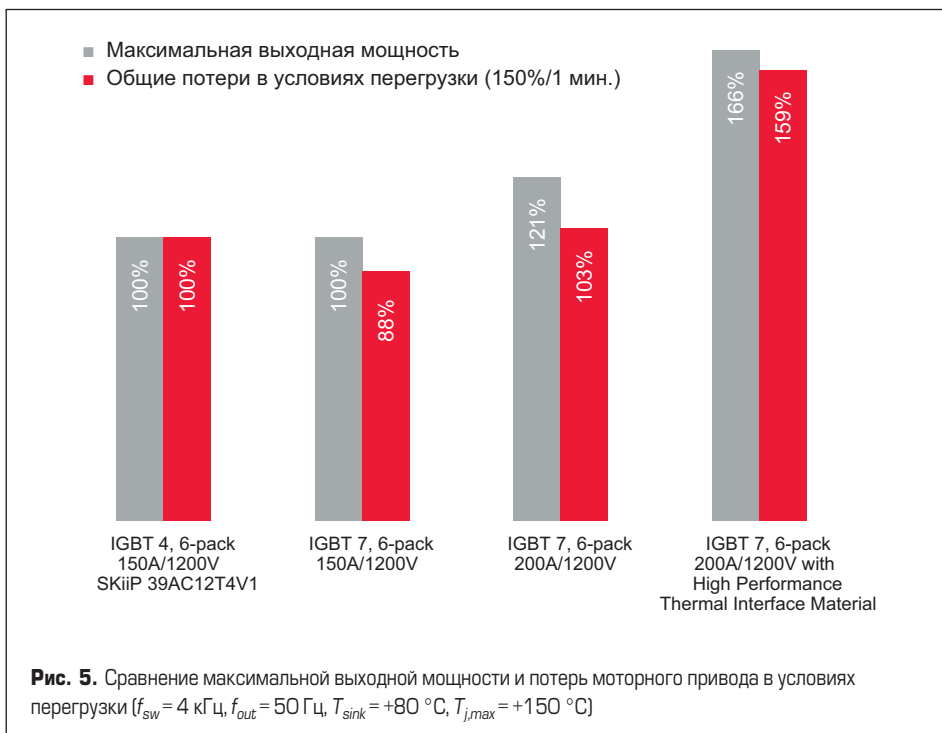
Размеры чипов IGBT 7 уменьшены почти на 25% — это существенно расширяет диапазон мощностей компонентов семейства MiniSKiiP. Например, максимальный ток модулей в приводной конфигурации CIB (выпрямитель — инвертор — тормозной каскад) может быть увеличен с 35 до 50 А для типоразмера 2, а в трехфазном исполнении (конфигурация AC) — с 150 до 200 А в типоразмере 3. При температуре радиатора +80 °С, частоте переключения 4 кГц и коэффициенте перегрузки 150% это соответствует увеличению выходной мощности более чем на 20%.

Дальнейшее улучшение нагрузочных характеристик возможно за счет применения новой высокоэффективной термопасты НРТР (High Performance Thermal Paste) и соответствующего снижения теплового сопротивления кристалл-теплоотвод $R_{th(j-c)}$. Так, для нового 200-А модуля с кристаллами IGBT 7 измеренная суммарная величина R_{th} сокращена почти на 30%. Сочетание этих показателей при замене 150-А модуля с IGBT 4 на 200-А с IGBT 7 с пастой НРТР выражается в увеличении выходной мощности больше чем на 65%.

Снижение напряжения насыщения позволяет не только уменьшить размер чипов, но и добиться меньшего уровня потерь при заданной выходной мощности, более высокой эффективности преобразования, а также упростить систему охлаждения. На рис. 5 дано сравнение расчетных суммарных потерь в условиях перегрузки для различных полупроводниковых приборов.

Моделирование показывает, что замена 150-А модуля IGBT 4 на IGBT 7 в инверторе мощностью 55 кВт снижает суммарные потери в условиях перегрузки на 12%. Преобразователь мощностью 67 кВт на 200-А модуле IGBT 7 имеет почти такие же потери, как аналогичное устройство мощностью 55 кВт на IGBT 4 с номинальным током 150 А. Таким образом, нагрузочные характеристики существующих преобразователей могут быть существенно улучшены путем простой замены модулей IGBT 4 на IGBT 7.

Модули IGBT 7 предназначены для установки в моторных приводах, что отражено в ряде характеристик, например нормированное время короткого замыкания IGBT 7 составляет 8 мкс при повышенной температуре кристаллов. Это поддерживает высокую перегрузочную способность: пиковый ток IGBT 7 в 3 раза превышает номинальное значение. Возможность деградации обмоток двигателя снижается благодаря полностью контролируемому значению dv/dt при включении и низкому dv/dt при выключении IGBT (4 кВ/мкс), что помогает решить проблему обеспечения электромагнитной совместимости (ЕМС). На первом этапе кристаллы IGBT 7 будут использованы во всех типах



MiniSKiiP в конфигурациях С1В и АС (трехфазный инвертор).

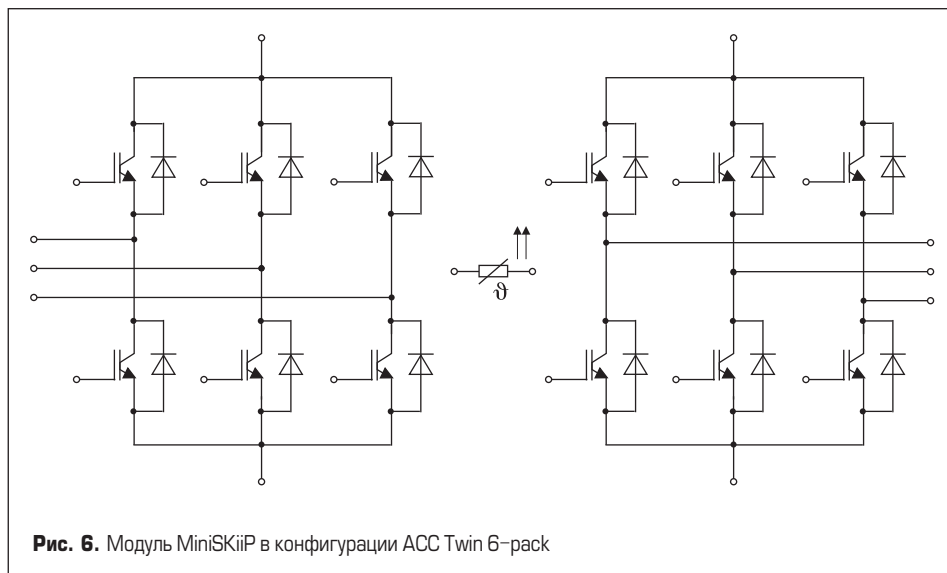
Кроме внедрения последних технологий IGBT, семейство MiniSKiiP пополняется новыми топологиями схем, направленными на сбережение энергии. В частности, это относится к регенеративным, или четырехквadrантным (4Q), системам. Обычные инверторы могут передавать энергию только в одном направлении — от источника питания к нагрузке (мотору). Растущие требования по энергосбережению привели к тому, что современные приводы все чаще оснащаются рекуперативными инверторами, обеспечивающими двунаправленный поток энергии.

В системах с однонаправленными инверторами регенеративная энергия двигателя преобразуется в тепло, рассеиваемое мощным резистором, подключенным к тормозному каскаду. Таким образом впустую расходится кинетическая энергия мотора, растет общее потребление энергии и эксплуатационные расходы.

Сказанное выше поясняет, почему регенеративные, или 4Q-приводы становятся все более востребованными. При их эксплуатации кинетическая энергия не рассеивается в тормозном резисторе, а возвращается обратно в сеть.

Регенеративный привод, как правило, требует использования двух 6-ключевых силовых модулей в качестве активного выпрямителя и инвертора. Модули MiniSKiiP в конфигурации ACC (Twin 6-pack) объединяют два независимых трехфазных инвертора в одном корпусе (рис. 6). Они выпускаются с рабочим напряжением 1200 В и номинальным током до 50 А и предназначены для создания маломощных и ультракомпактных 4Q-приводов, например лифтовых.

Еще одна интересная область применения модулей MiniSKiiP ACC — так называемые многоосные инверторы сервоприводов для робототехники. Каждая ось предполагает наличие независимого трехфазного инвертора для управления движением устройства. Интеграция двух инверторов в одном модуле позволяет уменьшить их количество вдвое. Соответственно, снижается стоимость и габариты всей электронной системы робота.



Завоевание перспективных рынков, внедрение новейших технологий кристаллов и добавление новых топологий схем обеспечивает постоянно растущий спрос на семейство модулей MiniSKiiP. Начиная с первого квартала 2019 года планируется увеличение производства MiniSKiiP на 50% — этот факт подчеркивает растущую значимость компонентов семейства в сегменте приводов малой и средней мощности.

Вместе с увеличением плотности мощности идет совершенствование конструктива MiniSKiiP, направленное на повышение индекса СТИ (Comparative Tracking Index), определяющего стойкость изоляционных материалов к электрическому пробоям. Чем выше значение этого индекса, тем меньше допустимое расстояние между двумя точками с различным потенциалом. «Трекинг» в данном случае представляет собой начальный процесс электрического пробоя по поверхности изолятора, при котором тепловое воздействие на материал увеличивает его проводимость, в результате нагрев растет лавинообразно, вызывая отказ прибора.

Индекс СТИ нового материала составляет 600, что улучшает изоляционные характеристики системы. Кроме того, он имеет более высокую термостойкость, необходимую для использования перспективных высокотемпературных кристаллов SiC и GaN.

Полумостовые ключи MiniSKiiP Dual 1 и 2 — первые модули семейства, при изготовлении которых использован улучшенный материал корпуса. Все остальные компоненты MiniSKiiP будут переведены на новую технологию корпусирования до конца 2018 года.

Семейство MiniSKiiP ориентировано на будущее: внедрение перспективных полупроводниковых технологий SiC и топологий схем позволяет завоевывать новые рынки силовой электроники. Высокая плотность мощности и предельная простота процесса установки крайне необходимы при крупносерийном производстве таких изделий, как инверторы солнечных станций и UPS. Постоянные инвестиции в новые материалы и производственные линии гарантируют SEMIKRON лидерство в сегменте преобразователей малой и средней мощности

Литература

1. Колпаков А. Миниатюрные модули привода MiniSKiiP II — особенности применения // Силовая электроника. 2005. № 4.
2. Demuth V., Hurtgen T. MiniSKiiP Dual вместо IGBT 62 мм // Силовая электроника. 2014. №
3. Колпаков А. Надежность прижимных соединений в условиях агрессивных сред. Силовая электроника. 2006. № 4.