

SKiIP 4 — новая серия IPM

для применений высокой мощности

В последние годы на рынке промышленной силовой электроники все более востребованными становятся надежные и компактные компоненты, имеющие высокую плотность мощности и конкурентоспособную цену. Для таких применений, как преобразователи энергетических станций (ветряных, солнечных, гидро-), тяговых приводов трамваев, троллейбусов и электропоездов в особенности нужны силовые ключи, отличающиеся функциональной насыщенностью и высоким уровнем надежности.

В состав модулей SKiIP (SEMIKRON Integrated Intellectual Power), разработанных в начале 1990-х годов, входит силовой каскад, плата управления, схема мониторинга и защиты, а также теплоотвод [1–3]. На ежегодной выставке PCIM, прошедшей в Нюрнберге в мае 2009 года, компания SEMIKRON представила 4-е поколение SKiIP. Выпуск этих модулей стал результатом многолетних исследований и испытаний, появления новых поколений кристаллов и технологий сборки. Впервые в мире в интеллектуальных модулях (IPM) IGBT использована технология низкотемпературного спекания чипов и реализован принцип цифровой передачи данных.

Ральф Херманн
(Ralf Herrmann)
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

SKiIP 4 — основные особенности

В результате модернизации конструктива, внедрения ряда новых технологий, а также использования кристаллов 4-го поколения диапазон номинальных токов новых интеллектуальных модулей IGBT, имеющих рабочее напряжение 1200 и 1700 В, расширен до 3600 А. Допустимая токовая нагрузка SKiIP увеличилась почти на 40%, что позволяет разрабатывать на базе этих ключей более мощные и компактные устройства без какого-либо снижения показателей надежности.

При этом чрезвычайно важным становится вопрос обеспечения стойкости к термоциклированию, особенно если говорить о таком циклонагруженном применении, как транспортный привод. В гибридных автомобилях новейших поколений используется одноконтурная система охлаждения, температура тосола в которой поддерживается на уровне 105 °С в номинальном режиме и достигает 120 °С при крат-

ковременных перегрузках. Окружающий воздух в подкапотном пространстве нагревается до 125 °С, а температура чипов T_j силового модуля способна превысить значение 150 °С. В то же время во время зимней стоянки привод может остывать до температур, близких к точке замерзания охлаждающей жидкости. В таблице 1 приведены технические требования для электронной аппаратуры, размещаемой в подкапотном пространстве автомобиля с жидкостным охлаждением.

Таблица 1. Основные требования, предъявляемые к силовым модулям электропривода

Условия эксплуатации	
Температура окружающей среды $T_{\text{в}}$, °С	-40...+135
Температура охлаждающей жидкости, °С	-40...+105
Температура кристаллов T_j , °С	-40...+175
Вибрация, м/с^2	10×9,81
Удары, м/с^2	50×9,81
Надежность	
Срок службы	15 лет
Стойкость к термоциклированию (импульсы мощности)	30 000 циклов при $\Delta T = 100 \text{ K}$
Стойкость к термоциклированию (изменение окружающей температуры)	1000 циклов при $\Delta T = 165 \text{ K}$

Работа стандартных модулей в подобных условиях неизбежно ведет к сокращению их ресурса. Только специализированные силовые ключи, конструкция которых адаптирована для применения в составе транспортного привода, могут обеспечить требуемые показатели надежности.

Высокая стойкость к термоциклированию компонентов семейства SKiIP получена благодаря от-



Рис. 1. SKiIP 4 — интеллектуальный силовой модуль для применений высокой мощности

Таблица 2. Номенклатура и предельные характеристики SKiiP 4

	Внешний вид	Схема силового каскада	1200 В	1700 В
			1814GB12E4-3D	1814GB17E4-3D
3GB			ICnom = 1800 А	
4GB				
6GB			2414GB12E4-4D	2414GB17E4-4D
			ICnom = 2400 А	
6GB			3614GB12E4-6D	3614GB17E4-6D
			ICnom = 3600 А	

существованию базовой платы и, соответственно, ее паяного соединения с DBC-подложкой [4]. Дальнейшее улучшение показателей у модулей 4-го поколения достигнуто за счет внедрения технологии спекания для установки кристаллов. Новейшие методы сборки и использование чипов с расширенным температурным диапазоном IGBT E4 и диодов CAL 4 делают интеллектуальные силовые ключи SKiiP 4 самыми мощными и компактными IPM на рынке силовой электроники. В таблице 2 показаны схемы силового каскада и приведены предельные характеристики трех типов размеров модулей SKiiP 4.

чекских стрессов при изменениях температуры и предотвращается развитие усталостных процессов в припое [6].



Рис. 3. Расположение DBC-платы и силовых шин на радиаторе SKiiP 4



Рис. 2. Ламинированная шина SKiiP 4, распределение токов кристаллов на DBC-плате

Конструкция копланарной шины с многоточечным доступом к кристаллам была разработана и внедрена в модулях новой серии SKiM 63/93 [5], ее внешний вид и топология DBC-подложки показаны на рис. 2. Каждый из чипов IGBT и диодов подключается к DC-терминалам с помощью индивидуальных контактов, что позволяет обеспечить максимально равномерное распределение токов.

Силовая шина SKiiP 4 одновременно выполняет несколько важных функций, первой из которых является прижим керамической DBC-платы к теплоотводу. Благодаря наличию большого количества контактов — точек давления, расположенных в зонах локального тепловыделения кристаллов, обеспечивается гомогенная передача тепла на радиатор. Кроме того, многоточечная контактная система позволяет производить токовый обмен между терминалами и чипами по кратчайшему пути. Копланарная конструкция шины гарантирует предельно низкое значение распределенного сопротивления и индуктивности, благодаря чему удастся снизить уровень потерь внутри модуля и дисбаланс токов в параллельных цепях.

Высокая плоскостность керамики и отсутствие «биметаллического» эффекта дает возможность использовать более тонкий слой теплопроводящей пасты (около 20 мкм). Напомним, что для компенсации указанного эффекта у стандартных модулей с медной базой толщина слоя пасты должна быть в пределах 50–100 мкм.

Второй по интенсивности отказов проблемой является паяное соединение чипов и керамики, альтернативы которому до настоящего времени не было. Наиболее сильно эта связь подвержена воздействию «коротких» термочиклов длительностью несколько секунд. Кроме того, температура плавления большинства используемых в силовой электронике припоев составляет 220 °С, что естественным образом ограничивает и температурный диапазон работы модулей. По этой причине перегрев чипов неизбежно ведет к сокращению срока службы.

Для установки кристаллов IGBT и диодов на DBC-плату SKiiP 4 применяется технология низкотемпературного спекания [7], впервые в мире использованная SEMIKRON при производстве модулей SKiM 63/93. Первым этапом является позиционирование кристаллов на слое серебряной нанопасты, напыляемой на керамическую подложку. Далее паста спекается при воздействии высокой температуры и давления, образуя сверхпрочное и эластичное серебряное соединение. Тонкий слой серебра имеет

Силовой каскад SKiiP 4

В основе концепции SKiiP лежит принцип прижимного соединения изолирующей DBC-подложки, на которой установлены силовые чипы, с теплоотком. При этом из состава модуля исключается медная базовая плата и, соответственно, паяный слой большой площади. Именно термомеханические напряжения, возникающие в этом слое при воздействии перепадов температуры, чаще всего приводят к отказам стандартных силовых ключей. Использование «безбазовой» прижимной технологии сборки SKiiP позволяет более чем в 5 раз повысить стойкость к термоциклированию и существенно улучшить тепловые характеристики. В результате этого исключается возможность возникновения термомехани-

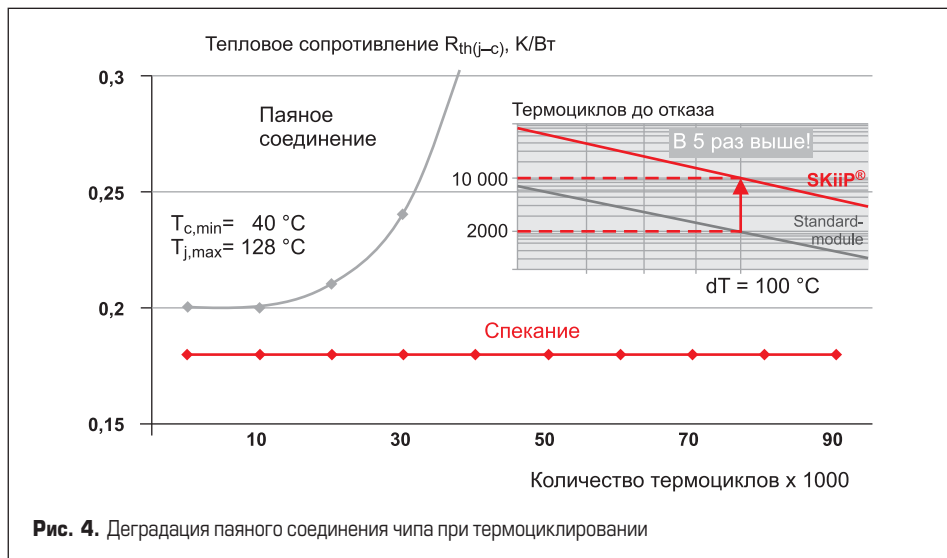


Рис. 4. Деградикация паяного соединения чипа при термоциклировании

Таблица 3. Сравнительные характеристики паяных и спеченных соединений

Параметр	Спекание (технология SKiNTER)	Пайка
Температура образования соединения, °C	<250	200–380
Толщина слоя, мкм	15–20	70–150
Образование лагун	Нет	Возможно
Структура слоя	Однородная	Неоднородная
Температура плавления, °C	960	<380
Теплопроводность, Вт/(м·K)	240	70
Электропроводность, м/(Ω·мм ²)	41	8
Коэффициент теплового расширения (КТР), м/К	19×10 ⁻⁶	28×10 ⁻⁶
Предел прочности на растяжение, МПа	55	30

более низкое тепловое сопротивление, чем припой, а температура его плавления (960 °C) во много раз превышает рабочую температуру чипов (табл. 3). Таким образом удастся многократно повысить надежность соединения и его стойкость к термоциклированию, а также полностью исключить вероятность развития усталостных процессов (рис. 5).

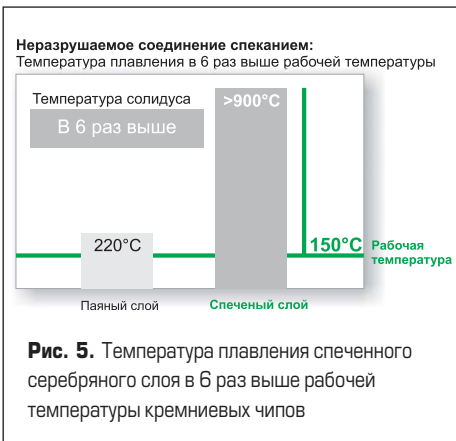


Рис. 5. Температура плавления спеченного серебряного слоя в 6 раз выше рабочей температуры кремниевых чипов

Токовые характеристики SKiiP 4 улучшены также за счет применения четвертого поколения чипов IGBT (Trench 4) и диодов (CAL 4), предельная рабочая температура которых увеличена до 175 °C. Благодаря использованию технологии спекания и модернизированного процесса ультразвуковой сварки выводов, повышение рабочей температуры произошло без снижения показателей надежности, что подтверждено в ходе ускоренных испытаний.

Цифровой драйвер SKiiP 4

В то время как цифровые технологии все активнее внедряются во все отрасли промышленности, силовая электроника остается отраслью, где в основном доминируют и изучаются аналоговые процессы, несмотря на импульсный способ модуляции сигнала. Драйвер затворов, осуществляющий связь контроллера с входами управления IGBT, может рассматриваться как цифро-аналоговое устройство. Аналоговыми в первую очередь являются каскады, отвечающие за трансляцию сигналов управления через изолирующий барьер. Классическим способом является передача фронтов импульсов, формируемых посредством последовательных резонансных

цепей, затем происходит восстановление нормальной длительности с помощью триггера.

В драйвере SKiiP 4 реализован цифровой способ трансляции данных, при котором через изолирующий трансформатор передается непрерывный поток нулей и единиц. Использование дифференциального канала приема-передачи позволяет многократно повысить помехозащищенность. Параметры цифровой схемы не подвержены старению и не зависят от разброса, температурного и временного дрейфа номиналов элементов схемы. Благодаря этому удастся повысить качество преобразования и медленно меняющихся аналоговых напряжений (например, сигнала датчика температуры).

Задающий генератор, построенный на программируемой логической матрице (FPGA), формирует импульсы заданной длительности и формы, которые поступают на дифференциальный передатчик с выходным мостовым

MOSFET-усилителем (рис. 6а). Данные передаются на выходные каскады драйвера через импульсный трансформатор, осуществляющий гальваническую развязку. Последовательность импульсов принимается дифференциальным приемником-компаратором и далее подается на формирователь сигналов управления затворами (рис. 7), также реализованный на FPGA.

Основная задача, которую решает драйвер, — это коммутация токов перезаряда изолированного затвора при нормальной работе и безопасное отключение IGBT в режиме перегрузки и короткого замыкания. Корректно разработанная схема должна обеспечивать низкое значение потерь включения/выключения и минимальный уровень коммутационных выбросов. В SKiiP 4 впервые реализован так называемый двухступенчатый алгоритм управления IGBT. Программируемое изменение номиналов резисторов затвора R_{Gon}/R_{Goff} осуществляемое с помощью электронных ключей Sw1–Sw5 (рис. 6б), позволяет не только минимизировать величину динамических потерь, но и обеспечить безопасный уровень перенапряжения при отключении тока КЗ. Новый цифровой драйвер предназначен для управления IGBT с рабочим напряжением 1200 и 1700 В. Его мощность составляет 5 Вт на канал при пиковом выходном токе 50 А.

Интеллектуальные силовые модули SKiiP 4 имеют два отдельных блока управления, каждый из которых состоит из ядра драйвера и переходной платы. Конструктивно использование двух каналов (рис. 8) позволяет улучшить отвод тепла, что очень важно для

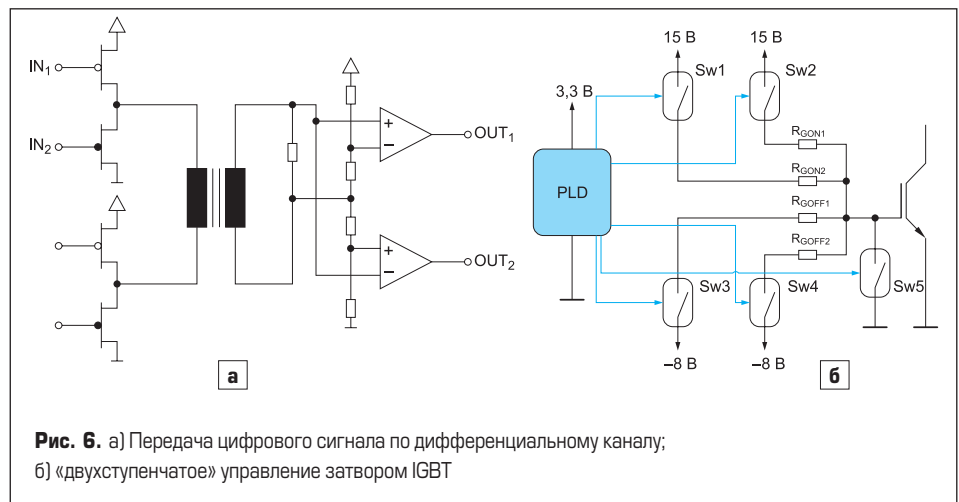


Рис. 6. а) Передача цифрового сигнала по дифференциальному каналу; б) «двухступенчатое» управление затвором IGBT

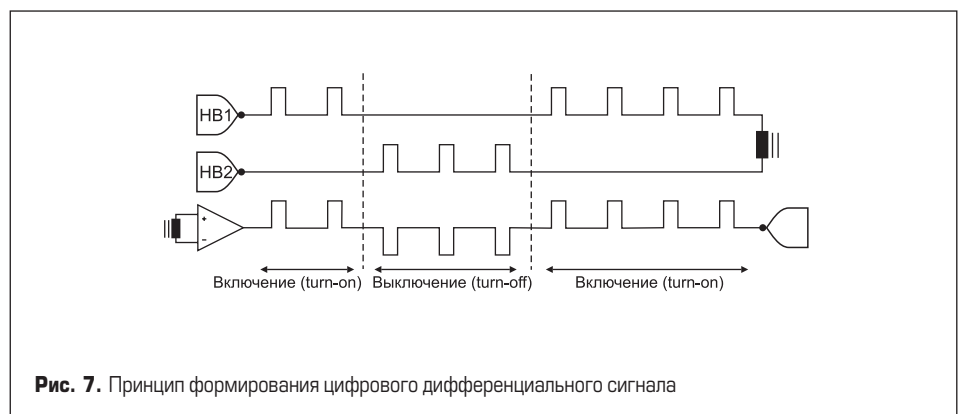


Рис. 7. Принцип формирования цифрового дифференциального сигнала

подобной мощной схемы. Плата управления выполняет базовые функции защиты и мониторинга. Это:

- UVLO (Under Voltage LockOut) — защита от падения напряжения питания во входных и выходных каскадах;
- фильтрация коротких (шумовых) импульсов;
- защита от перегрузки по току и КЗ;
- измерение аналоговых сигналов датчиков фазного тока, температуры, напряжения DC-шины.

Новым видом защиты для IPM является реализованный в SKiiP 4 мониторинг критической частоты коммутаций и запрет ее превышения. В модулях 4-го поколения сигнальный разъем IDC заменен на более надежный 24-выводной коннектор D-Sub в металлическом корпусе.

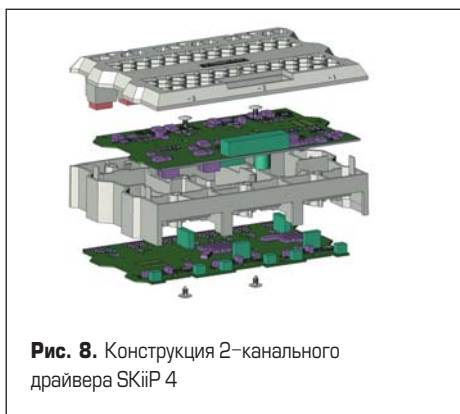


Рис. 8. Конструкция 2-канального драйвера SKiiP 4

Номенклатура

В таблице 4 представлены основные технические характеристики модулей SKiiP 4. Эффективные значения токов I_{RMS1} и I_{RMS2} рассчитаны для схемы 3-фазного ШИМ-инвертора при стандартизованных условиях эксплуатации (примечания). Основным ограничивающим фактором для конструктива является максимальный длительный эффективный ток AC-терминала, который не должен превышать 500 А.

Таблица 4. Основные характеристики SKiiP 4

Тип модуля SKiiP	Схема	Охлаждение	V_{CE} , В	$I_{Cном}$, А	I_{RMS1} , А	I_{RMS2} , А
SKiiP1814GB12E4-3DW	3GB	Жидкость	1200	1800	1270	800
SKiiP1814GB12E4-3DL	3GB	Воздух	1200	1800	900 (620)	575 (435)
SKiiP2414GB12E4-4DW	4GB	Жидкость	1200	2400A	1640 ¹⁾	1030 ¹⁾
SKiiP2414GB12E4-4DL	4GB	Воздух	1200	2400	1000 ²⁾	715
SKiiP2414GB12E4-4DL	4GB	Воздух	1200	2400	950 ³⁾ (730)	715 (520)
SKiiP3614GB12E4-6DW	6GB	Жидкость	1200	3600	2260 ¹⁾	1420 ¹⁾
SKiiP3614GB12E4-6DL	6GB	Воздух	1200	3600	1360 ²⁾	960
SKiiP3614GB12E4-6DL	6GB	Воздух	1200	3600	1240 ³⁾	
SKiiP1814GB17E4-3DW	3GB	Жидкость	1700	1800	1275 (1124)	800 (660)
SKiiP1814GB17E4-3DL	3GB	Воздух	1700	1800	770 ²⁾	550
SKiiP1814GB17E4-3DL	3GB	Воздух	1700	1800	720 ³⁾	"
SKiiP2414GB17E4-4DW	4GB	Жидкость	1700	2400	1640 ¹⁾ (1440)	1030 ¹⁾ (900)
SKiiP2414GB17E4-4DL	4GB	Воздух	1700	2400	930 ²⁾	675
SKiiP2414GB17E4-4DL	4GB	Воздух	1700	2400	860 ³⁾	"
SKiiP3614GB17E4-6DW	6GB	Жидкость	1700	3600	2260 ¹⁾	1420 ¹⁾
SKiiP3614GB17E4-6DL	6GB	Воздух	1700	3600	1240 ²⁾	900 ²⁾
SKiiP3614GB17E4-6DL	6GB	Воздух	1700	3600	1100 ³⁾	870 ³⁾

Примечания. ¹⁾ С радиатором NWK 40. ²⁾ При указанном токе коллектора I_C и температуре кристаллов $T_j = 150^\circ\text{C}$ максимальная температура радиатора — 125°C . ³⁾ При температуре радиатора 115°C (в отверстии под кристаллом по методу В) или $\sim 105^\circ\text{C}$ между DBC-подложками (силовой каскад)

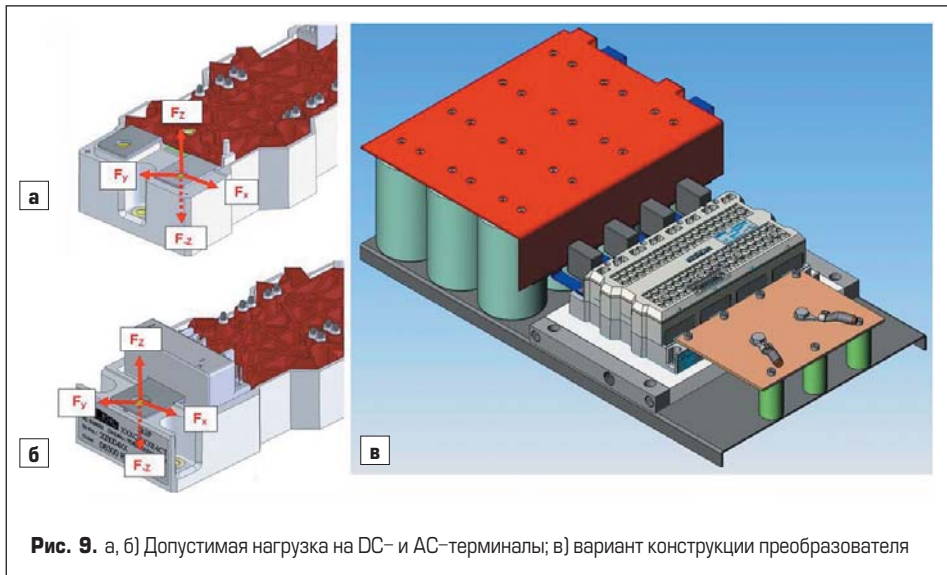


Рис. 9. а, б) Допустимая нагрузка на DC- и AC-терминалы; в) вариант конструкции преобразователя

Использованные в таблице 4 обозначения:

- $I_{Cном}$ — номинальный ток (по новой системе обозначений параметр $I_{Cном}$ определяет производитель кристаллов).
- I_{RMS1} — среднеквадратичный выходной фазный ток при выходном напряжении 400 В ($V_{CE} = 1200$ В) или 690 В ($V_{CE} = 1700$ В), частоте огибающей 50 Гц, $\cos\phi = 0,85$, температуре окружающей среды $T_a = 40^\circ\text{C}$, частоте ШИМ $f_{sw} = 5$ кГц ($V_{CE} = 1200$ В) или 2 кГц ($V_{CE} = 1700$ В).
- I_{RMS2} — среднеквадратичный выходной фазный ток при тех же условиях, но с учетом перегрузки 150% в течение 60 с и при изменении частоты огибающей в пределах 2–50 Гц.
- В скобках даны значения тока SKiiP 3.

Для точного расчета тепловых режимов в конкретных условиях эксплуатации необходимо воспользоваться программой SEMISEL.

Механические характеристики

Одной из главных проблем при проектировании силового преобразовательного

устройства является подключение терминалов модулей с учетом допустимых статических и динамических нагрузок. Особенно серьезно эта задача стоит на транспорте, где высокие вибрационные воздействия способны деформировать выводы и даже привести к отказу силового ключа. Основной способ решения проблемы — механическая развязка: использование гибких шин, промежуточных элементов крепления и т. д.

Компоненты новой генерации SKiiP полностью совместимы с модулями 3-го поколения по расположению выводов и подключению. При этом за счет введения дополнительных точек фиксации DC- и AC-терминалов допустимая нагрузка на них повышена в 2 раза, она теперь составляет 200 Н по всем осям: F_x , F_y , $F_{\pm z}$ (рис. 9а, б). Рекомендуемый вариант подключения AC-выводов и звена постоянного тока к модулю SKiiP 4GB в стационарном положении показан на рис. 9в.

Надежность

Пользователям стала доступна новая уникальная опция: кроме стандартной программы проверки электрических параметров, которой подвергаются 100% компонентов, надежность IPM SKiiP может быть дополнительно подтверждена в составе реальной инверторной схемы в условиях предельных нагрузок.

В ходе двух циклов испытаний продолжительностью 60–90 мин проводится проверка силовых ключей в составе преобразователя ветроэнергетической установки (ВЭУ) при полной нагрузке, предельных значениях температуры и напряжения питания. Температура силовых кристаллов при этом достигает 140°C , что обеспечивает максимальный термомеханический стресс для всей конструкции силового ключа. По желанию заказчика может быть выбрана 2- или 4-квadrантная схема, а также воздушный или жидкостный режим охлаждения. Основной целью теста является определение ключевых причин ранних отказов и их устранение. В 2008 году данному виду испытаний было подвергнуто 80% модулей SKiiP 3.

Заключение

С начала 1990-х годов, когда было начато производство интеллектуальных силовых модулей SKiP, их востребованность в различных отраслях промышленности неуклонно росла благодаря широким функциональным возможностям и высокому уровню надежности. Одно из самых ярких подтверждений сказанному — ветроэнергетика, отрасль, в которой к силовым ключам предъявляются очень высокие требования как по электрическим характеристикам, так и по надежности. Конвертеры на основе IPM SKiP преобразуют 44 ГВт энергии при общей мощности всех введенных в действие ветроэнергетических установок, составляющей около 94 ГВт (источник: BTM Consult ApS. 2008. № 3).

В конструкции SKiP воплотился более чем 15-летний опыт SEMIKRON по разработке компонентов прижимного типа. Концепция технологии pressure-contact состоит в отказе от жестких паяных и сварных соединений и прямом прижиге изолирующей DBC-платы с силовыми чипами к теплоотводу. В результате этого обеспечивается равномерный тепловой и электрический контакт и более чем на 40% снижается тепловое сопротивление «кристалл – теплоотвод» $R_{th(j-s)}$ по сравнению со стандартными модулями. Благодаря исключению базовой платы и соединительного паяного слоя большой площади существенно снижается уровень термомеханических

напряжений, действующих на модуль при циклических изменениях тока нагрузки. При идентичных условиях работы это означает увеличение стойкости к термоциклированию более чем в 5 раз.

Новое, 4-е поколение SKiP по плотности мощности, уровню интеграции и функциональным возможностям отвечает самым жестким требованиям современного рынка силовой электроники. Впервые в мире в силовых ключах SKiP 4 для установки чипов на керамическую подложку использована технология низкотемпературного спекания, а в драйвере управления затворами применен принцип цифровой передачи данных. Устройство управления силовым каскадом SKiP 4 передает контрольные сигналы по дифференциальному каналу, что позволяет обеспечить подавление синфазных помех, высокую помехозащищенность и минимальный уровень перекрестных связей между каналами.

Основные особенности IPM SKiP 4:

- Диапазон мощностей: 130 кВт – 1,8 МВт.
- Полное исключение паяных соединений.
- Повышенная стойкость к термоциклированию благодаря отсутствию базовой платы и применению технологии спекания.
- Предельная рабочая температура чипов $T_{jmax} = 175^\circ\text{C}$.
- Цифровая изолированная передача импульсов управления.
- Цифровая диагностика.
- Двухступенчатая схема управления IGBT.

- Опциональный тест на надежность в условиях предельных нагрузок.

Основными областями применения силовых ключей нового поколения остаются отрасли промышленности, в которых предъявляются максимальные требования по плотности мощности и надежности: энергетика, электротранспорт, промышленные приводы.

Литература

1. Application Manual Power Modules. SEMIKRON International.
2. Demuth V., Häupl K., König B., Nichtl-Pecher W. CAL4: The next generation 1200V Freewheeling Diode // PCIM 2007.
3. Hermwille M. Driver Core goes Fully Digital // Bodo Power Systems. August 2008.
4. Колпаков А. SKiP против IPM, или Сколько интеллекта надо модулю // Электронные компоненты. 2004. № 9, 10.
5. Колпаков А. Новые модули для транспорта SKiM 63/93 // Силовая электроника. 2007. № 4.
6. Колпаков А. О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника. 2006. № 2.
7. Колпаков А. Низкотемпературная технология спекания // Компоненты и технологии. 2007. № 4.
8. Göbl C., Beckedahl P., Braml H. Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications // Automotive Power Electronics. June 2006.
9. <http://semisel.semikron.com/>