

MiniSKiiP IPM — ультракомпактный интеллектуальный модуль привода SEMIKRON

Интеллектуальный силовой модуль MiniSKiiP IPM, предназначенный для использования в промышленных приводах мощностью до 15 кВт, был представлен компанией SEMIKRON на выставке PCIM-2008. Уникальными элементами конструкции нового IPM являются пружинные контакты для подключения силовых и сигнальных цепей, а также монокристалльный драйвер затворов, выполненный по технологии SOI. Сборка преобразователя на основе MiniSKiiP осуществляется в ходе одной производственной операции. Эта особенность в сочетании с возможностью заказа модуля с нанесенной теплопроводящей пастой существенно упрощает и удешевляет процесс автоматизированной сборки. Специалисты компании SEMIKRON уверены, что новые IPM будут востребованы производителями общепромышленных приводов, преобразователей частоты и конверторов энергетических станций.

**Александр Лангенбухер
(Alexander Langenbucher)**

Alexander.Langenbucher@semikron.com

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Компактный и легкий конструктив

Основной тенденцией развития технологий силовой электроники последних лет является повышение плотности тока при снижении активной площади чипов. Каждое новое поколение кристаллов IGBT, появляющееся на рынке, отвечает этому требованию. Аналогичные процессы наблюдаются и в области производства модулей, причем в первую очередь это относится к интеллектуальным силовым ключам (IPM) [1].

Требования к системе охлаждения в первую очередь зависят от величины рассеиваемой мощности, однако выбор типа радиатора во многом связан с конструктивом модуля. Площадь теплоотводящего основания MiniSKiiP IPM составляет всего 30 см² (59×52 мм), что

позволяет использовать теплоотвод минимальных размеров и соответственно уменьшить габариты и стоимость всего изделия. Этому же способствуют хорошие тепловые характеристики и низкий уровень потерь, достигнутый благодаря применению нового поколения чипов IGBT Trench 4.

Миниатюрный интеллектуальный силовой модуль MiniSKiiP IPM может быть использован в компактных преобразователях частоты среднего диапазона мощности (5–15 кВт). По удельным габаритным показателям этот IPM является самым маленьким из предлагаемых на рынке компонентов данного класса (рис. 1). Модули с рабочим напряжением 600 В выпускаются в приводной конфигурации CIB (выпрямитель+инвертор+тормозной ка-



Рис. 1. Модули MiniSKiiP IPM в 2 раза меньше аналогичных компонентов данного диапазона мощности

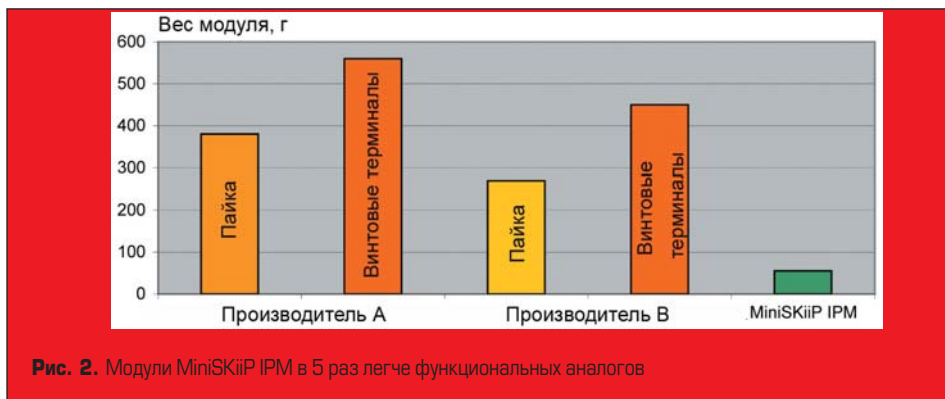


Рис. 2. Модули MiniSKiiP IPM в 5 раз легче функциональных аналогов

скад), компоненты 12 класса доступны в виде 3-фазного инвертора IGBT. В состав MiniSKiiP IPM входит интегральный драйвер затворов, изготовленный с применением технологии SOI (Silicon On Insulator), полностью исключающей возможность зашелкивания при всех условиях эксплуатации.

Вес также является важной характеристикой силового модуля, поскольку он влияет на вибро- и ударопрочность изделия, а также его устойчивость к транспортной тряске. Кроме того, при автоматизированной сборке от этого показателя во многом зависит и стоимость монтажного оборудования.

Способность электронных компонентов противостоять ударам и вибрациям обязательна для таких областей применения, как транспорт, лифтовое оборудование, преобразователи ветроэнергетических установок и т. п. Высокий уровень вибрационных воздействий способен приводить к взаимному смещению компонентов, потере контакта в разъемных соединениях. Исследование вибростойкости является одним из важнейших квалификационных испытаний. Подобные тесты сборок на базе силовых ключей серии MiniSKiiP проводит фирма Schindler, широко использующая их в своих лифтовых приводах.

Чем меньше вес электронного модуля, тем меньше сила инерции, действующая на его механические и электрические связи. Масса MiniSKiiP IPM (55 г) в 5 раз ниже, чем у самого легкого из аналогичных компонентов (рис. 2). Кроме того, благодаря использованию пружинных контактов, запатентованных SEMIKRON, полностью устраняется опасность «холодной пайки» или разрушения паяного соединения вследствие усталостных процессов. Малый вес модуля удешевляет доставку и обеспечивает лучшую сохранность компонентов при транспортировке на дальние расстояния. Надежности пружинных соединений в условиях воздействия агрессивных промышленных сред посвящены публикации [2, 4].

В условиях современного производства большое значение приобретает пригодность компонентов к автоматизированной сборке. Простота монтажа упрощает задачу дизайнеру и позволяет снизить временные затраты и стоимость производства. С этой точки зрения модули MiniSKiiP имеют неоспоримые преимущества. Возможность сборки силового каскада преобразователя за одну технологическую операцию с помощью одного крепежно-

го винта (рис. 3) без применения пайки делает компоненты данного класса крайне привлекательными как для разработчиков, так и для конструкторов. Очень простым является и процесс замены MiniSKiiP при ремонте или на стадии проектирования.

Для автоматизированного монтажа модулей с паяными выводами требуется дорогостоящее оборудование, сборка занимает довольно много времени и требует тщательного контроля режимов. Отсутствие необходимости в специальной оснастке при монтаже MiniSKiiP IPM и связанное с этим снижение производственных затрат также является серьезным аргументом в пользу их применения.

Как показано на рис. 3, силовой каскад на базе MiniSKiiP IPM состоит из 4 элементов: радиатора, силового модуля, интерфейсной печатной платы (PCB) и прижимной крышки. При затяжке винта крышка прижимает плату управления к модулю и теплоотводу, таким образом осуществляется тепловой контакт основания силового ключа с радиатором и электрическое соединение пружинных выводов с контактными площадками PCB.

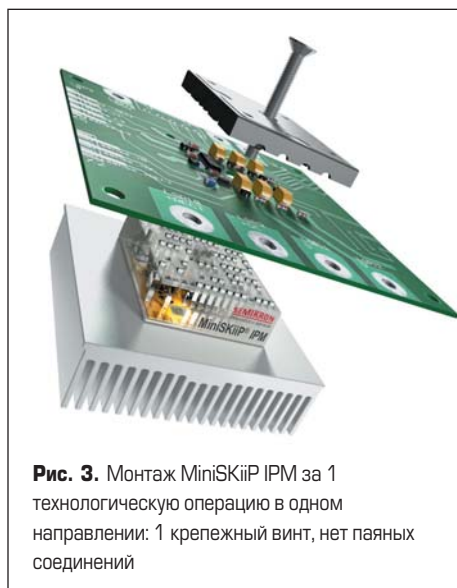


Рис. 3. Монтаж MiniSKiiP IPM за 1 технологическую операцию в одном направлении: 1 крепежный винт, нет паяных соединений

Данная технология сборки обладает рядом и других достоинств. Благодаря отсутствию сквозных монтажных отверстий упрощается топология интерфейсной платы, а ее проектирование становится более гибким. Позиционирование контактных площадок под пружины может выполняться с гораздо

меньшей точностью, чем под паяные штыри. При этом пружинное соединение обеспечивает более стабильный контакт, даже в условиях высоких механических и тепловых нагрузок и воздействия агрессивных газов. Надежность прижимного соединения, подтвержденная испытаниями и опытом эксплуатации, обеспечивается за счет оптимального выбора контактного усилия (20–10 Н/мм² в зависимости от вида и характеристик сочленения), формы и материала пружины, а также типа ее покрытия.

В отличие от аналогичных компонентов, выпускаемых другими фирмами, все элементы MiniSKiiP IPM, включая интегральный драйвер и резисторы затвора, установлены на керамической DBC-подложке. Благодаря этому гарантируется эффективный отвод тепла, что позволяет схеме управления работать на частотах до 50 кГц.

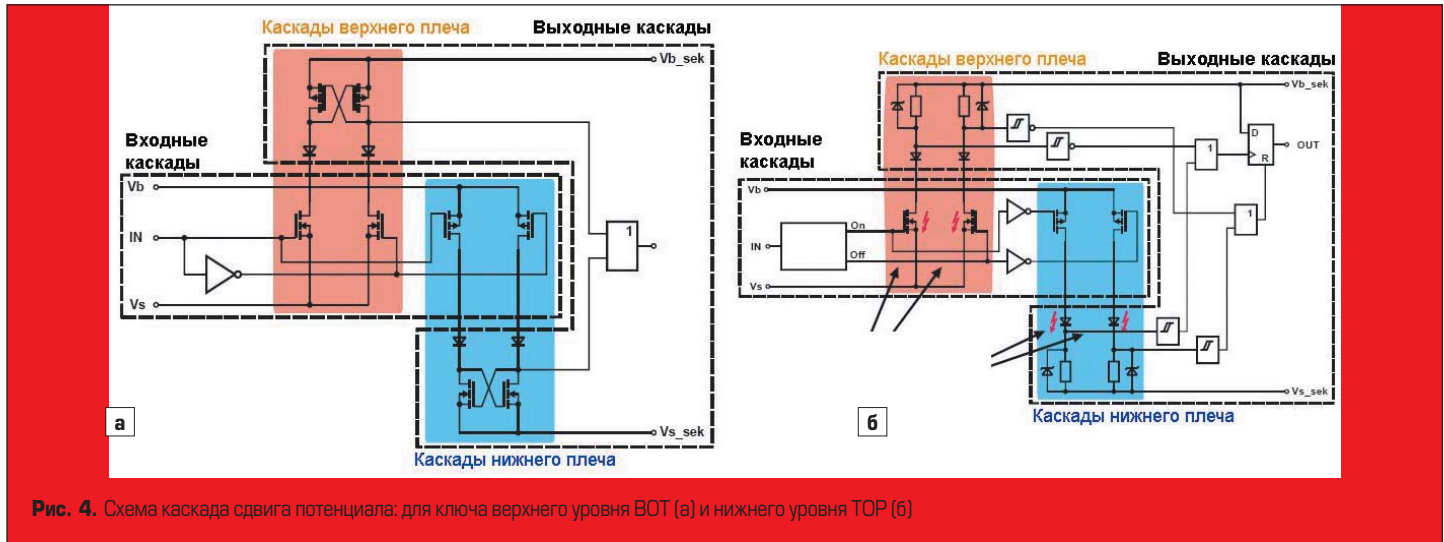
Монокристалльный SOI драйвер

Интегральная микросхема устройства управления затворами MiniSKiiP IPM разработана на основе технологии SOI, впервые использованной SEMIKRON для компонентов такого типа. Основным преимуществом данной технологии, предусматривающей электрическую изоляцию каждого полупроводникового элемента, является низкий ток утечки при повышенной рабочей температуре. В SOI-кристалле гарантируется полное подавление паразитных триггерных структур и эффекта зашелкивания при всех условиях эксплуатации, включая короткое замыкание. Специалисты, работающие с высоковольтными устройствами управления MOSFET/IGBT, имеющими полупроводниковые каскады сдвига уровня, знают, что зашелкивание, наблюдаемое зачастую даже в области номинальных токов, может привести к выходу из строя как самого драйвера, так и силовых ключей.

Структура SOI обеспечивает высокий иммунитет к наведенным переходным напряжениям обеих полярностей с уровнями вплоть до напряжения пробоя MOSFET. Все сказанное в сочетании с расширенным температурным диапазоном ($T_{jmax} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) позволяют использовать чипы SOI для построения высоконадежных интеллектуальных модулей.

Интегральный драйвер MiniSKiiP IPM, работающий при напряжении питания 12–17 В, способен управлять тремя верхними и тремя нижними ключами 3-фазного инвертора и чоппером, который может быть использован в качестве тормозного каскада или корректора коэффициента мощности (ККМ). Устройство обеспечивает запрет одновременного включения сквозных токов (функция Interlock). Входы управления совместимы с уровнями логики TTL (5 В) и CMOS (3,3 В), время задержки составляет 300 нс. Схема защиты драйвера выполняет все базовые функции, выключая выходные транзисторы при снижении напряжения управления (UVLO — Under Voltage LockOut) и перегрузке по току (OCP — Over Current Protection).

Принципиально новым элементом структуры SOI-драйвера, позволившим резко повысить устойчивость схемы к наведенным перенапря-



жениям, является дифференциальный каскад сдвига уровня в канале управления IGBT верхнего и нижнего плеча. Высокие фронты тока, возникающие при коммутации ключей инвертора, являются причиной возникновения всплесков напряжения, уровень которых пропорционален скорости изменения тока di/dt и паразитной индуктивности цепи коммутации L_s (в соответствии с выражением $dV = di/dt \times L_s$). Вследствие этого между сигнальным выводом эмиттера IGBT и опорной точкой схемы управления наводятся переходные напряжения, полярность которых может быть как положительной, так и отрицательной. Вследствие этого уровень сигнала «затвор–эмиттер» IGBT может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от знака наведенного потенциала. В результате изменяются динамические характеристики силового ключа, наблюдаются ложные срабатывания, в худшем случае транзистор выходит из строя. Точно также при воздействии переходных перенапряжений может исказиться и токовый сигнал, снимаемый с резистивного шунта схемы защиты — негативные последствия в этом случае аналогичны.

При работе маломощных ИРМ амплитуда коммутационных выбросов обычно не превышает предельных для IGBT значений, поскольку малы величины di/dt и L_s . Однако с ростом мощности уровень переходных перенапряжений растет лавинообразно, делая этот эффект опасным как для силового ключа, так и для драйвера. Новая концепция каскада

сдвига уровня была разработана специально для защиты выходов схемы управления от наведенных со стороны силовых каскадов перенапряжений обоих полярностей.

Упрощенная принципиальная схема сдвига потенциала для ключей верхнего и нижнего уровня (TOP и VOT) показана на рис. 4. Каждый каскад управляется по двум независимым каналам, в которых используется полевой транзистор и последовательный блокирующий диод. В зависимости от полярности напряжения между входными и выходными каскадами драйвера для преобразования сигнала используется схема сдвига TOP или VOT. При этом неработающий канал блокируется соответствующим диодом, а для формирования выходного сигнала устройства используется логический вентиль ИЛИ.

Реализация схемы сдвига каскада TOP (рис. 4б) оказывается более сложной, поскольку не существует достаточно хороших высоковольтных r-MOS-транзисторов. По этой причине в данном случае используется импульсная схема преобразования сигнала на высоковольтном NDMOS-транзисторе и высоковольтных диодах. Импульсный режим работы позволяет снизить величину перекрестных токов и уровень потерь переключения.

Усовершенствованная концепция сдвига уровня позволяет существенно повысить иммунитет драйвера к вариациям опорных напряжений, величина которых ограничивается только напряжением пробоя MOSFET. Работа схемы сдвига при статическом смещении опорного сигнала на +20

и -20 В демонстрируется с помощью графиков, приведенных на рис. 5. Устройство также с легкостью компенсирует и динамические помехи, как показано на рис. 6а. Обратите внимание на то, что импульсы управления затворами сохраняют практически идеальную форму, несмотря на воздействие шумового сигнала, смещающего потенциал эмиттера относительно напряжения на опорном выводе драйвера.

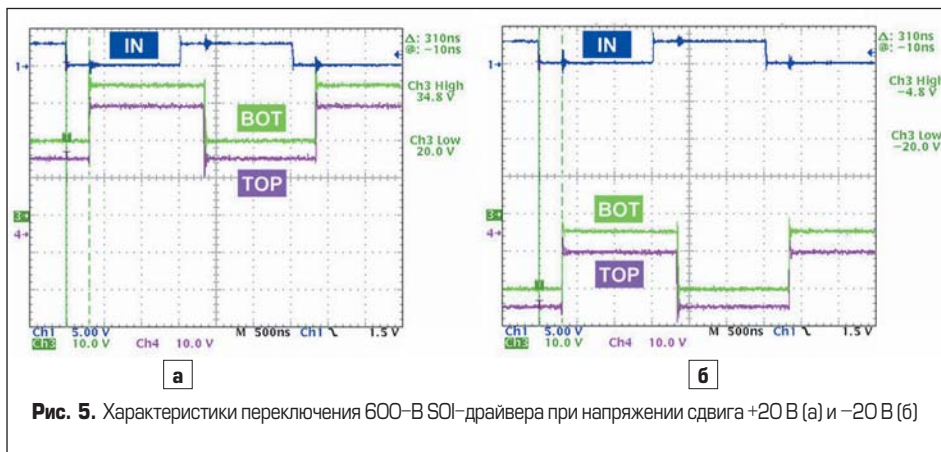
Расположение основных элементов структуры на кристалле SOI-драйвера, включая высоковольтные DMOS-транзисторы и диоды схемы сдвига уровня, для обоих каналов показано на рис. 6б.

Конструкция и материалы

Изолирующая DBC-плата MiniIPM изготавливается из оксида алюминия Al_2O_3 толщиной 0,38 мм, со слоем омеднения 0,2 мм, нанесенным на обе стороны керамики. Первым этапом процесса сборки является установка силовых чипов и датчика температуры на керамику методом пайки. Кристалл HVIC и smd-резисторы затворов соединяются с DBC-платой с помощью токопроводящего клея. Контакты, расположенные на верхнем слое силовых чипов, подключаются к токонесущим шинам алюминиевыми проводниками диаметром 300 мкм методом ультразвуковой сварки. Диаметр проводников, используемых для сигнальных подключений, составляет 50 мкм.

Далее пластиковый корпус с размещенными в нем пружинными контактами устанавливается на керамическую DBC-плату и заливается силиконовым гелем, обеспечивающим герметичность и улучшающим распределение тепла.

Установка чипа драйвера непосредственно на керамику позволяет эффективно отводить от него тепло, что особенно важно при работе схемы управления на высоких частотах. При размере кристалла 4,9×3,1 мм удается обеспечить величину теплового сопротивления около 4 °C/Вт. При токе управления затвором порядка 1 А это позволяет драйверу ИРМ эффективно управлять силовым инвертором мощностью до 15 кВт. Для сравнения укажем, что при монтаже аналогичного чипа в корпусе SOP28 значение R_{th} составляет порядка 75 °C/Вт!



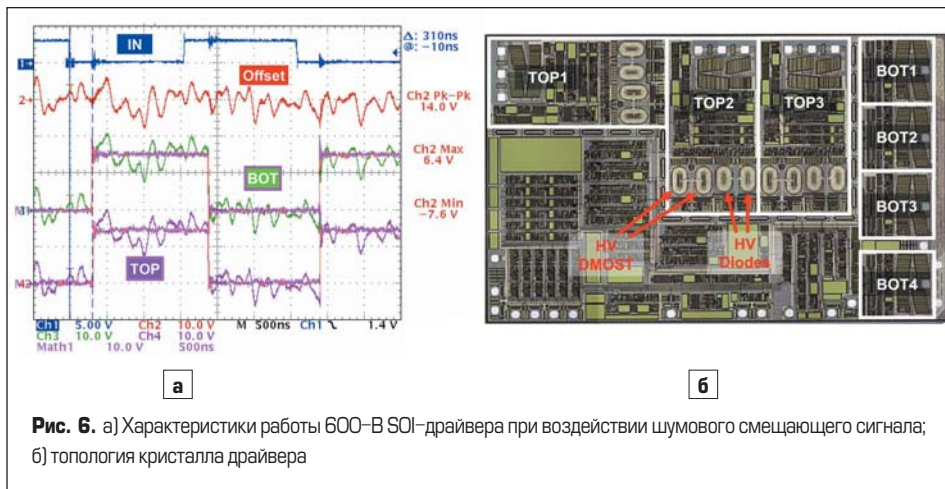


Рис. 6. а) Характеристики работы 600-V SOI-драйвера при воздействии шумового смещающего сигнала; б) топология кристалла драйвера

Поставка модулей MiniSKiiP IPM может осуществляться с предварительно нанесенным слоем теплопроводящей пасты (рис. 7). Это позволяет упростить процесс монтажа за счет исключения ответственного технологического этапа и обеспечить высокую повторяемость производственного процесса.

Во всех своих разработках SEMIKRON использует теплопроводящие пасты ведущих европейских производителей: Wacker P12 (на силиконовой основе) и Electrolube HTC.

Новая опция обеспечивает следующие преимущества:

- быстрая и простая операция установки модулей на теплоотвод, возможность автоматизации производства;
- оптимальная толщина слоя пасты, снижение риска повреждения керамического основания MiniSKiiP;
- оптимальное распределение пасты в зазоре, равномерный отвод тепла, минимальное значение $R_{th(j-s)}$;
- высокая временная стабильность тепловых характеристик.

При монтаже силовых модулей на радиатор важно, чтобы тепловое сопротивление $R_{th(c-s)}$ «корпус-теплоотвод» соответствовало спецификации. Недостаточная толщина слоя пасты, образование воздушных полостей приводят к ухудшению отвода тепла, перегреву и сокращению срока службы силового ключа. А ее избыток не только способствует увеличению теплового сопротивления, но и может вызвать повреждение керамической подложки при затяжке крепежного винта. Особенно критично это в отношении так называемых безбазовых

(baseless) модулей с керамическим основанием, к которым относится MiniSKiiP.

С начала 90-х годов SEMIKRON использует метод трафаретной печати для нанесения теплопроводящей пасты. Многолетний опыт позволил компании разработать технологический процесс, позволяющий выдерживать требуемые допуски при массовом производстве. Погрешность толщины слоя не превышает 10 мкм; статистика показывает, что только у 60 из 1 миллиона ячеек параметры выходят за рамки заданных значений. Очевидно, что для получения нормированной величины теплового сопротивления «корпус-радиатор» $R_{th(c-s)}$ необходимо, чтобы качество поверхности радиатора и момент затяжки крепежа соответствовали оговоренным требованиям.

При нанесении теплопроводящей пасты методом трафаретной печати возможны незначительные колебания ее толщины и наличие небольших дефектов структуры. Равномерное распределение пасты при затяжке крепежных винтов обеспечивается благодаря сотовой структуре, показанной на рис. 7. Заданные допуски гарантируют при монтаже высокое качество слоя, образующегося между основанием модуля и теплоотводом.

Обработанные таким образом компоненты подвергаются ряду специальных тестов, позволяющих оценить стабильность характеристик слоя при транспортировке и хранении. Виды и условия проведения испытаний приведены в таблице. Транспортировка модулей с предварительно нанесенной пастой допускается при температуре $-25...+60$ °C и влажности, не превышающей 96% RH, срок хранения при этом составляет 18 месяцев.

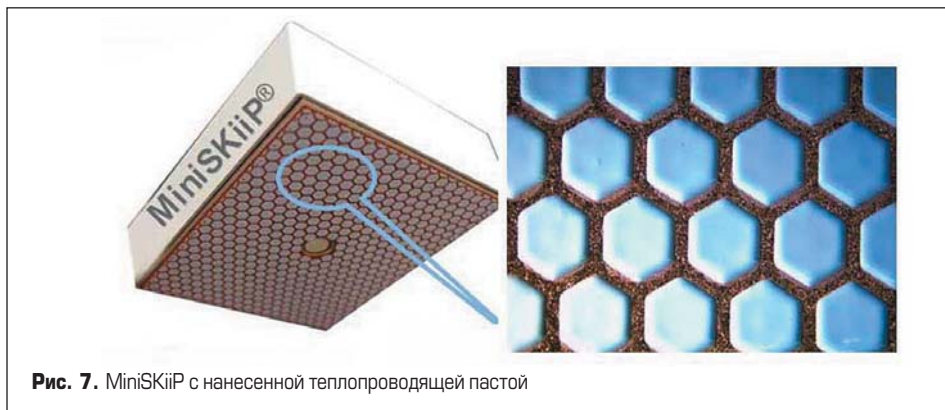


Рис. 7. MiniSKiiP с нанесенной теплопроводящей пастой

Таблица. Квалификационные испытания для проверки качества нанесения теплопроводящей пасты

Вид испытаний на надежность	Условия испытаний
Хранение при высокой температуре	300 ч/125 °C
Хранение при низкой температуре	300 ч/-40 °C
Хранение при высокой температуре и влажности	300 ч/85 °C/86%RH

Заключение

При проектировании электронных устройств все больше внимания уделяется проблеме снижения производственных расходов, что является следствием жесткой конкурентной борьбы и ценового давления рынка. При проектировании таких сложных устройств, как частотные преобразователи, существенное значение имеют затраты на разработку и внедрение. Кроме того, серийное производство невозможно без проведения дорогостоящих промежуточных и заключительных тестов элементов конструкций, а также выходных испытаний готовой продукции.

Интеллектуальные силовые модули, содержащие силовой каскад и устройство управления, являются элементами высокой степени интеграции. Их применение позволяет значительно упростить изделие и сократить программу испытаний, а следовательно — уменьшить время выхода изделия на рынок и его стоимость. Описанные в статье конструктивные особенности MiniSKiiP IPM дают возможность реализовать это преимущество в полной мере.

Суммируя сказанное, перечислим основные преимущества от применения модулей MiniSKiiP IPM в общепромышленных приводах мощностью до 15 кВт:

- минимальные массо-габаритные показатели (размер на 50% меньше, вес в 5 раз ниже, чем у функциональных аналогов);
- интегрированный SOI-драйвер с полностью подавленным эффектом защелкивания и высокой рабочей частотой (до 50 кГц);
- прижимная конструкция без паяных соединений для удешевления и упрощения процесса сборки;
- возможность поставки с нанесенным слоем теплопроводящей пасты.

Литература

1. Flood J., Sharma A. The Worldwide Market for Power Semiconductor Discretes & Modules 2008 / IMS Study. 2008.
2. Lang F., Scheuermann U. Reliability of Spring Pressure Contacts under Environmental Stress // Microelectronics Reliability. 2007. № 47.
3. Vogler B., Roßberg M., Herzer R., Reusser L., Wurm T. 600V Converter/Inverter/Brake (CIB) — Module with integrated SOI Gate Driver IC for Medium Power Applications // CIPS. 2008.
4. Колпаков А. Надежность пружинных контактов в условиях промышленных сред // Силовая Электроника. 2006. №4.