

SKiM 63/93 —

специализированные силовые модули для электротранспорта

Снижение уровня выбросов двуокиси углерода и экологическая безопасность — ключевые требования нашего времени.

Автомобильная индустрия является областью, сильнее всего стимулирующей производителей к поиску новых решений. Большинство фирм, занимающихся разработкой силовых ключей, пытаются совершенствовать традиционные технологии, приспособивая их к условиям эксплуатации транспортной электроники. В то же время применение модулей прижимной конструкции позволяет преодолеть основные проблемы, связанные с работой тягового электропривода. Дальнейшим шагом на этом пути стало внедрение метода низкотемпературного спекания чипов, впервые в мире использованного компанией SEMIKRON при изготовлении интеллектуального модуля привода SKAI. С помощью данных технологий удастся полностью исключить развитие усталостных процессов в паяных соединениях и обеспечить высокую стойкость к термоциклированию. Эти и многие другие инновации нашли свое применение при разработке новой серии модулей SKiM (SEMIKRON integrated Module).

Андрей Колпаков

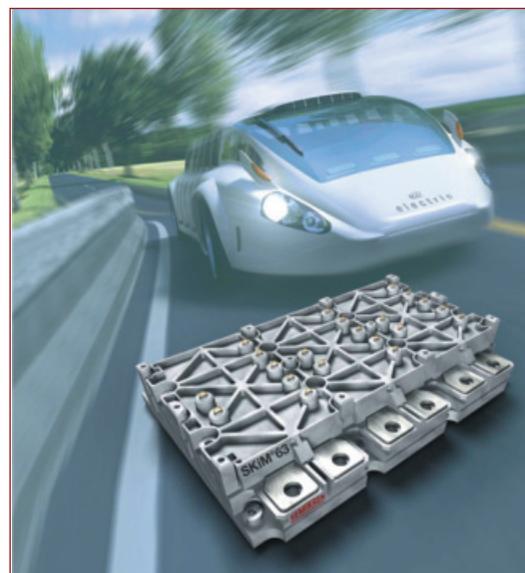
Andrey.Kolpakov@semikron.com

К любому электронному устройству, предназначенному для работы в транспортном средстве с гибридным приводом, предъявляются ряд специальных требований. Оно должно быть легким, компактным и в то же время способным работать в условиях жестких климатических и механических воздействий.

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 кратковременных перегрузках. Окружающий воздух в подкапотном пространстве может

Таблица 1. Основные требования, предъявляемые к модулям электропривода

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



нагреваться до 125 °С, а температура чипов T_j силового модуля способна превысить значение 150 °С, однако во время зимней стоянки кристаллы могут остывать до температур, близких к точке замерзания охлаждающей жидкости. Работа модулей стандартной конструкции в условиях воздействия термоциклов со столь высоким градиентом неизбежно ведет к сокращению их ресурса [1]. И только специализированные силовые ключи, предназначенные для эксплуатации в составе транспортного привода, могут обеспечить требуемые показатели надежности.

Проектирование нового семейства модулей IGBT производилось на основе приведенных в таблице 1 технических требований для электронной аппаратуры,

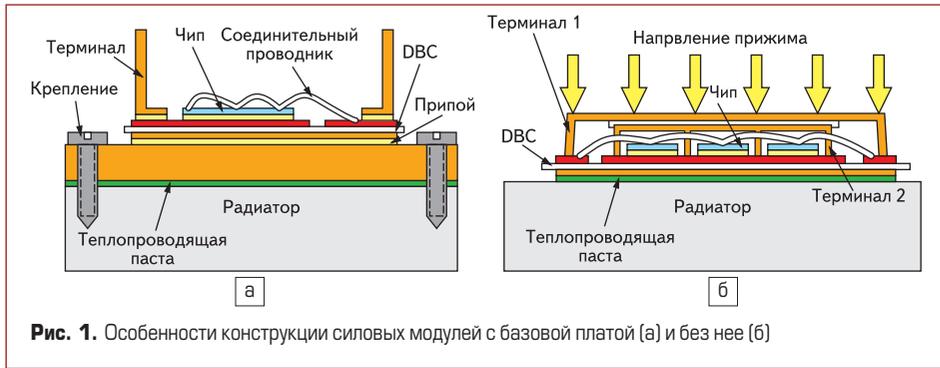


Рис. 1. Особенности конструкции силовых модулей с базовой платой (а) и без нее (б)

размещаемой в подкапотном пространстве автомобиля с жидкостным охлаждением.

Выпускаемые в настоящее время силовые ключи можно условно разделить по принципиальному конструктивному признаку: наличию или отсутствию базовой платы (baseplate). Медное основание стандартных модулей является несущим элементом конструкции, с помощью которого производится его крепление к радиатору. В так называемых «безбазовых» (baseless) конструктивах керамическая изолирующая DBC-подложка устанавливается непосредственно на теплоотвод, а крепежные отверстия находятся в корпусе. Основные особенности структуры «базовых» и «безбазовых» модулей показаны на рис. 1.

Массивная базовая плата (как правило, это медная пластина толщиной 3 мм) позволяет увеличить теплоемкость модуля и способствует лучшему распределению тепла, выделяемого кристаллами. Благодаря этому динамический тепловой импеданс стандартных силовых ключей в области постоянных времени 0,1...1 с несколько меньше, чем у «безбазовых» компонентов.

К медному основанию припаивается одна или несколько керамических DCB-подложек с чипами. Кристаллы и силовые терминалы соединяются с керамикой методом пайки — это простейший способ отвода тепла и обеспечения низкого контактного сопротивления. Алюминиевые выводы чипов подключаются к соединительным шинам с помощью ультразвуковой сварки. Модули стандартной конструкции широко используются в различных устройствах, работающих при постоянных или мало меняющихся выходных токах. Однако именно паяные соединения являются основным источником отказов силовых ключей в случае, когда нагрузка циклически меняется в широких пределах, что характерно для транспортного привода. Причиной этого является разность коэффициентов теплового расширения (КТР, или СТЕ — Coefficient of Thermal Expansion) сопрягающихся слоев: медного основания, керамической подложки, кремниевых кристаллов, алюминиевых выводов чипов. Периодические колебания температуры и соответствующие изменения линейных размеров элементов конструкции приводят к возникновению термомеханических стрессов, разрушающих структуру паяных и сварных контактных областей.

Наибольшую площадь имеет соединение базовой платы и керамической DBC-подложки, поэтому его повреждение чаще всего приводит к выходу из строя силовых ключей.

Вероятность разрушения конструкции модуля при воздействии термоциклов растет экспоненциально с увеличением рабочей температуры. Существует эмпирическое соотношение, в соответствии с которым стойкость к термоциклированию уменьшается вдвое с ростом температуры на 20 °С.

Очевидно, что модули стандартной конструкции (рис. 1а) не предназначены для эксплуатации в условиях, приведенных в таблице 1. Некоторые производители (например EUPEC/Infineon) используют в силовых ключах, ориентированных на транспортные применения, композитные материалы (AlSiC или CuMo), которые гораздо лучше меди согласованы с керамикой по КТР. Однако недостатком композитов является худшая теплопроводность и гораздо более высокая стоимость, что ограничивает их массовое применение. Предполагается, что в будущем базовые платы будут изготавливаться из более дешевых композитных материалов на основе графита.

Практически полностью решить проблему, связанную с рассогласованием КТР медного основания и керамической подложки, позволяет технология прижимного контакта (pressure-contact technology) SKiIP, разработанная компанией SEMIKRON в начале 1990-х годов и применяемая при производстве модулей SKiIP, SKiM, MiniSKiIP, SEMITOP.

На рис. 1б показана структура слоев модуля прижимной конструкции: базовая плата, следовательно, и паяный соединительный слой большой площади в этом случае отсутствуют, керамическая DBC-подложка с кристаллами IGBT и диодов установлена непосредственно на теплоотвод. Специальная прижимная рамка создает давление в местах наибольшего локального тепловыделения, обеспечивая равномерный отвод тепла на радиатор. При таком способе соединения воздействие термоциклов приводит к тому, что керамическое основание модуля «плавает» по слою теплопроводящей пасты относительно теплоотвода, не испытывая термомеханических напряжений. В одинаковых условиях эксплуатации это позволяет примерно на порядок повысить стойкость силовых ключей к термоциклированию. Ухудшение качества распределения тепла в модулях прижимного типа компенсируется за счет использования более тонкого слоя теплопроводящей пасты. Рекомендуемая толщина слоя для модулей стандартной конструкции составляет 50...100 мкм, а для компонентов прижимного типа, отличающихся более высокой равномерностью и плоскостностью керамического основания, — 20...60 мкм. Естественно, что

для обеспечения требуемых тепловых характеристик к качеству обработки поверхности радиатора в последнем случае предъявляются более высокие требования.

Следующим по интенсивности отказов является паяное соединение кремниевых чипов с DBC-платой. Кремний гораздо лучше согласован с керамикой по КТР, чем медь, однако, как показывают испытания, именно отслоение кристаллов от изолирующей подложки является основной причиной выхода из строя модулей прижимного типа. Решить данную проблему позволяет технология низкотемпературного спекания (low temperature sintering technology) [5], впервые в мире примененная SEMIKRON при производстве интеллектуального модуля привода электромобиля SKAI.

Хорошее сочетание электрических и тепловых характеристик, высокая плотность мощности и беспрецедентные показатели надежности модулей SKAI позволили SEMIKRON выиграть тендер правительства США и получить в 2004 году приз «Поставщик года» от компании General Motors. Прижимная конструкция SKiIP и технология спекания были использованы и при проектировании нового семейства модулей для транспортных применений SKiM.

Первыми компонентами новой серии, доступными для заказа в качестве инженерных образцов, стали силовые ключи SKiM 63 и SKiM 93, предназначенные для использования в составе 3-фазного тягового электропривода мощностью 60...180 кВт. Модули SKiM состоят из трех независимых полумостовых каскадов, каждый из которых снабжен отдельным NTC-термодатчиком.

Для приближения к современным конструкторским стандартам силовые DC и AC терминалы SKiM имеют высоту 17 мм, размеры корпусов (114 × 160 мм² и 150 × 160 мм²), а расположение выводов соответствует популярным конструктивам ECONO+ и SEMiX 33c (см. рис. 2 и 8). Рабочий ток SKiM®63/93 составляет 600/900 А для версии с рабочим напряжением 600 В и 300/450 А для версии 1200 В.

Как и в ключах серии SEMiX, силовые AC и DC терминалы расположены в одной плоскости по разные стороны корпуса. Сигнальные пружинные контакты, предназначенные для подключения платы управления, находятся в верхней части корпуса, что позволяет устанавливать драйвер непосредственно на модуль также без применения пайки.

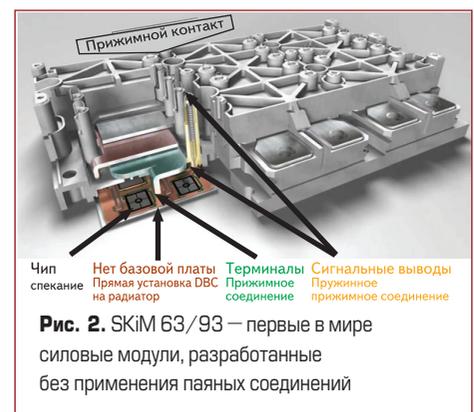


Рис. 2. SKiM 63/93 — первые в мире силовые модули, разработанные без применения паяных соединений

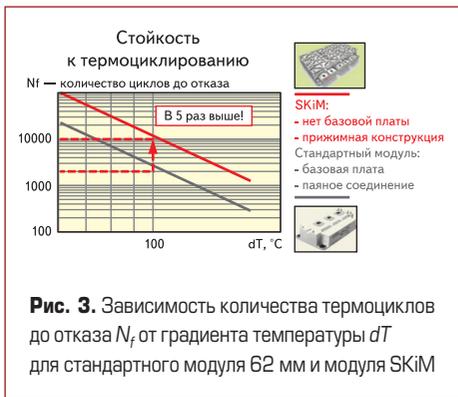


Рис. 3. Зависимость количества термоциклов до отказа N_t от градиента температуры dT для стандартного модуля 62 мм и модуля SKiM

На рис. 4 показана конструкция DC-шины и силовых терминалов модуля SKiM. Заслуживает внимания практически идеальная плоско-параллельная структура слоев шины, оканчивающихся выводами для подключения звена постоянного тока. За счет минимизации токовой петли в модулях SKiM удалось достичь предельно низкого значения распределенной индуктивности ($L_s < 10$ нГн).

Прижимная конструкция SKiM, предусматривающая жесткий и равномерный контакт керамической DCB-подложки с теплостоком, обеспечивает отсутствие так называемого биметаллического эффекта. Высокая плоскостность подложки и специальная обработка радиатора позволяют использовать слой теплопроводящей пасты толщиной всего 20 мкм. Таким образом удается скомпенсировать некоторое ухудшение качества распределения тепла, связанное с отсутствием массивной базовой платы. Напомним, что при установке на теплоотвод стандартных модулей IGBT номинальная толщина слоя составляет в среднем 100 мкм, что необходимо для вытеснения воздуха из области сопряжения.

Корпус модулей SKiM выполнен из материала, удовлетворяющего самым жестким требованиям по климатическим воздействиям и термоциклированию. Это полиамид, качество которого как полимерного материала характеризуется следующими параметрами: $CTI > 600$ В (Comparative Tracking Index — дугостойкость) и $RTI = 150$ °C (Relative Temperature Index — параметр, определяемый как значение температуры материала, при которой в течение 100 000 ч его основные свойства ухудшаются на 50%).

Подключение сигнальных выводов к плате управления осуществляется с помощью пружинных контактов, надежность работы которых в условиях тяжелых климатических и механических воздействий подтверждена соответствующими испытаниями и многолетним опытом эксплуатации [8]. Пружины расположены в пазах силовых шин и зафиксированы с помощью специальных направляющих, как показано на рис. 6б.

Для установки кристаллов на керамическую DCB-подложку была использована уникальная технология низкотемпературного спекания [5]. Тепловое сопротивление контактного слоя, состоящего из спеченного серебряного нанопорошка, гораздо ниже, чем у паяного соединения. Стабильный и надежный механический и тепловой контакт обеспечивается благодаря высокой температуре плавления серебра

(960 °C, что намного выше, чем у всех используемых в промышленности припоев), низкой пористости и высокой равномерности порошковой структуры. В таком материале не развиваются усталостные процессы, что позволяет получить хорошую стойкость к термоциклированию и увеличить срок службы силовых ключей.

Благодаря уникальным технологическим свойствам паста из наночастиц серебра может с успехом заменить традиционные мягкие и жесткие припой. Ее использование дает возможность упростить процесс установки чипов, а также устранить производственные этапы, необходимые для адаптации свойств припоя и технологии пайки к конкретным типам чипов и подложек. Поскольку контактная область состоит практически из чистого серебра, она имеет гораздо лучшую электро- и теплопроводность, чем любой другой материал. Данная технология пригодна для всех типов кристаллов и керамик.

Качество и надежность спеченного слоя даже в предельных режимах оказываются намного выше, чем у паяного соединения, поскольку серебряная паста (в отличие от припоя) работает при температурах, гораздо меньших температуры плавления. Испытания показывают, что применение новой технологии позволяет повысить рабочую температуру электронных модулей до 300 °C, что делает процесс низкотемпературного спекания пригодным для монтажа перспективных чипов на основе карбида кремния (SiC).

Модуль Юнга спеченного серебра составляет примерно 9 ГПа при относительной плотнос-

ти 80%. Благодаря столь низкой упругости слоя (12% от значения чистого серебра) существенно снижается уровень механических напряжений, передаваемых на кристалл. В отличие от паяного соединения, склонного к образованию больших лагун, пористость спеченного слоя крайне низка и равномерна (см. рис. 5б), вследствие чего при отводе большого количества тепла исключена возможность возникновения точек локального перегрева (hot spots). При неблагоприятных условиях эксплуатации в стандартных припоях могут образовываться хрупкие интерметаллические структуры, снижающие его механическую прочность. Формирование интерметаллидов в серебряном слое практически исключено.

Графики, показанные на рис. 5а, демонстрируют, насколько повышается стойкость силового ключа к термоциклированию при использовании нового типа соединения по сравнению с традиционной пайкой. Как видно из представленных эпюр, после 30 тысяч испытательных термоциклов (при $dT = 110$ °C) тепловое сопротивление модуля традиционной конструкции увеличивается примерно на 15%, а после 40 тысяч термоциклов — уже более чем на 50% относительно начального значения. При этих же условиях тепловые характеристики силового ключа, изготовленного с применением процесса спекания, остаются неизменными.

Для обеспечения хорошего распределения токов и снижения потерь проводимости в модулях SKiM организован так называемый многоточечный доступ к силовым шинам, при ко-

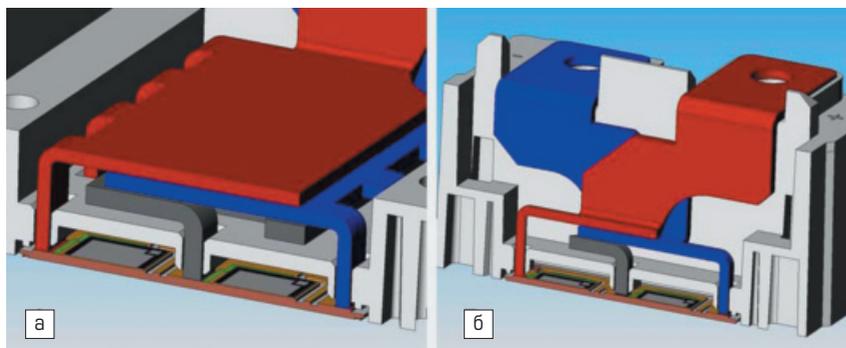


Рис. 4. Копланарная конструкция силовых DC-шин и терминалов SKiM

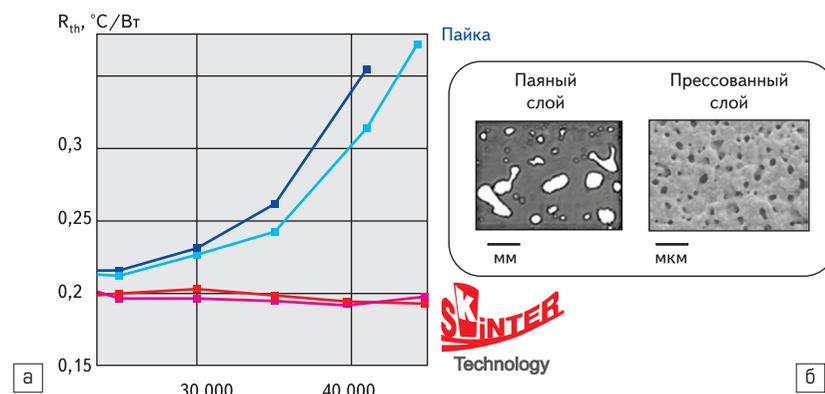


Рис. 5. а) Изменение теплового сопротивления R_{th} при термоциклировании; б) сравнение соединительных слоев припоя и прессованного нанопорошка Ag

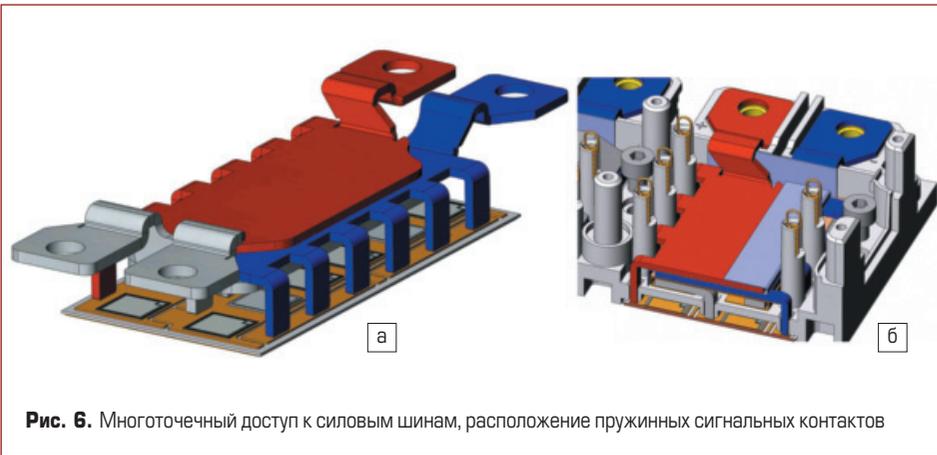


Рис. 6. Многоточечный доступ к силовым шинам, расположение пружинных сигнальных контактов

тором выводы каждого чипа IGBT и антипараллельного диода имеют индивидуальное соединение с силовыми терминалами модуля (см. рис. 6а). Такая конструкция позволяет кардинально снизить активное сопротивление соединительных шин и обеспечить суммарное значение сопротивления силовых выводов на уровне $R_{CC+EE} \leq 0,3 \text{ м}\Omega$, это в 3,5 раза меньше аналогичного показателя для стандартных модулей типоразмера 62 мм (типичное значение $R_{CC+EE} \approx 1,1 \text{ м}\Omega$). На рис. 6 показано, как организован многоточечный доступ к DCB-плате, расположение силовых кристаллов на которой приведено на рис. 7. Красными и синими стрелками указан путь тока DC-шины при работе чипов IGBT верхнего плеча и оппозитных диодов, зеленые стрелки соответствуют выходному току полумоста.

Перед проектировщиками модулей SKiM стояло две основных задачи: разработка конструкции, удовлетворяющей жестким климатическим и механическим требованиям, и поиск оптимального сочетания IGBT и диодов, обеспечивающего минимальный уровень потерь мощности и хорошую электромагнитную совместимость. Для силовых ключей с рабочим напряжением 600 В были использованы кристаллы IGBT семейства Trench 3 и диоды CAL HD [6].

В модулях SKiM, рассчитанных на напряжение 1200 В, применены новейшие разработки Infineon и SEMIKRON: чипы Trench IGBT и CAL HD четвертого поколения [7]. Они отличаются пониженным уровнем потерь и расширенным температурным диапазоном (температура кристаллов T_{jmax} повышена до 175 °С), что позволило существенно повысить стойкость силовых ключей к перегрузочным режимам.

Основные технические характеристики новых модулей серии SKiM приведены в таблице 2, а их внешний вид показан на рис. 8.

Таблица 2. Основные электрические характеристики SKiM

Параметр, единица измерения	SKiM 63	SKiM 93
R_{thjs} IGBT, К/Вт	0,14	0,95
R_{thjs} Diode, К/Вт	0,27	0,18
$I_{C\text{ ном}}$ 600 В, А	600	900
$I_{C\text{ ном}}$ 1200 В, А	300	450
I_{RMS} 600 В, А	280	410
I_{RMS} 1200 В, А	165	250

Заключение

В конструкции элементов новой серии SKiM воплотился 15-летний опыт производства модулей прижимной конструкции на основе технологии SKiP, разработанной компанией SEMIKRON. Благодаря отсутствию базовой несущей платы устраняется основная причина отказов силовых ключей, вызванных воздействием термомеханических стрессов. Сегодня модули IGBT, изготовленные по прижимной технологии SKiP, используются в приводах 400 000 вильчатых погрузчиков и 1000 автобусов с гибридной силовой установкой.

Компоненты серии SKiM имеют сверхнизкое значение распределенной индуктивности соединительных шин ($L_{CE} < 10 \text{ нГн}$) и омического сопротивления силовых выводов ($R_{CC+EE} \leq 0,3 \text{ м}\Omega$), что обеспечивает предельно низкий уровень динамических и статических потерь. Они могут работать при температуре кристаллов до 175 °С и температуре окружающей среды

до 135 °С, это дает возможность использовать силовые ключи данного типа в транспортных средствах с одноконтурной системой жидкостного охлаждения.

За счет внедрения технологии низкотемпературного спекания для установки силовых чипов удалось в 5 раз повысить стойкость к термоциклированию и исключить использование пайки. Применение новых производственных процессов позволяет практически полностью реализовать мощностные возможности силовых кристаллов, что способствует повышению экономической эффективности силовых ключей семейства SKiM.

Благодаря прижимной конструкции, а также использованию пружинных сигнальных выводов и новейших полимерных материалов для изготовления корпуса силовые ключи семейства SKiM удовлетворяют самым жестким транспортным требованиям по вибрационным и ударным воздействиям. Они являются наиболее перспективными компонентами для применения в тяговых приводах электро- и гибридомобилей ближайшего будущего.

Литература

1. Scheuermann U., Hecht U Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swings. PCIM Nürnberg, 2002.
2. Daucher C. 100% solder-free IGBT Module Purpose-Designed for Automotive Applications. SEMIKRON Elektronik, 2006.
3. Grasshoff T., Daucher C. Solder-free Pressure Contact Modules for Automotive Applications. SEMIKRON International, 2006.
4. Beckedahl P., Tursky W., Scheuermann U. Packaging considerations of an Integrated Inverter Module for Hybrid Vehicles. PCIM Nürnberg, 2005.
5. Колпаков А. Новые технологии силовой электроники // Компоненты и технологии. 2007. № 3–4.
6. Колпаков А. Антипараллельные диоды SEMIKRON для новых поколений модулей IGBT // Электронные компоненты. 2005. № 2.
7. Колпаков А. Trench 4 — универсальная технология IGBT // Силовая электроника. 2007. № 3.
8. Колпаков А. Надежность пружинных контактов в условиях промышленных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.

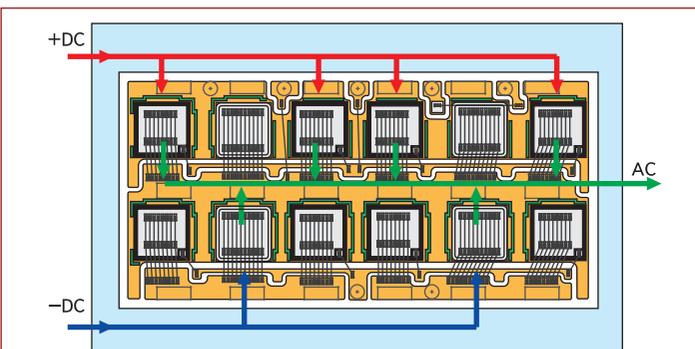


Рис. 7. Расположение чипов IGBT и диодов на DCB-подложке SKiM, путь тока DC-шины и AC-выхода

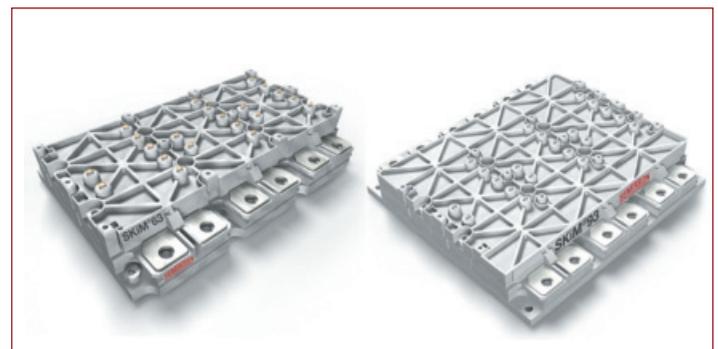


Рис. 8. Внешний вид модулей SKiM 63 и SKiM 93