

# SKAI — технология компактных автоэлектронных систем

Требования автомобильной индустрии становятся все более жесткими, и их выполнение влечет за собой необходимость совершенствования производственных процессов и ужесточения контроля параметров всех элементов системы. Это касается самого широкого диапазона применений — от погрузчиков до гибридо- и электромобилей, сельскохозяйственных и строительных машин. Автомобильная промышленность является областью, сильнее всего стимулирующей производителей элементной базы к поиску новых решений. Большинство фирм, занимающихся разработкой силовых ключей, пытаются совершенствовать традиционные технологии, приспособив их к условиям эксплуатации транспортной электроники. Однако решение проблем, связанных с работой тягового электропривода, невозможно без использования новых поколений полупроводниковых чипов, внедрения инновационных материалов и технологий сборки. Разработчики электронных систем предпочитают применять функционально законченные модули, поскольку это сокращает расходы на разработку, уменьшает время выхода изделия на рынок, упрощает процесс сертификации. Несколько лет назад компания SEMIKRON разработала семейство компактных электронных блоков, предназначенное для применения на электротранспорте и получившее название SKAI. Данная статья содержит информацию о компонентах нового, второго поколения.

**Роланд Мюлеманн**  
(Roland Mühlemann)

**Пол Ньюман**  
(Paul Newman)

**Перевод и комментарии:**  
**Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Специализированные силовые ключи выпускаются SEMIKRON более 20 лет, торговая марка SKAI (SEMIKRON Automotive Inverter) появилась в 2004 г. Пробразом SKAI стал интеллектуальный модуль двойного инвертора, разработанный компанией для применения в приводах вилчатых погрузчиков. За прошедшие годы выпущено более 600 тыс. шт. подобных изделий.

Система SKAI имеет высший уровень интеграции: компоненты серии содержат в одном корпусе силовой каскад, звено постоянного тока, устройство защиты и мониторинга, а также сигнальный процессор. В зависимости от напряжения питания и об-

ласти применения инвертор SKAI строится на низковольтных MOSFET или IGBT 6-го и 12-го класса.

Схема SKAI может быть адаптирована под требования заказчика, при этом SEMIKRON обеспечивает полный цикл проектирования изделия, включая разработку концепции и выбор оптимальной архитектуры, моделирование электрических, тепловых и механических характеристик, квалификационные испытания и серийное производство.

Современный электропривод должен быть легким, компактным и в то же время способным работать в условиях жестких климатических и механических воздействий. На рис. 1 приведена классификация требований к транспортному приводу в зависимости от напряжения питания, которое, в свою очередь, определяется типом накопителя энергии.

Размер «пузырей» на рисунке отражает количество возможных применений для определенного рынка в соответствующем диапазоне питающих напряжений. Низковольтные версии (напряжения шины 24, 48, 80 и 120 В) предназначены для устройств с батарейным питанием, в основном это технологический транспорт (например, вилчатые погрузчики). Однако тенденцией последних лет в отношении гибридных и электрических автомобилей является повышение напряжения DC-шины до 750 и даже 900 В.

Как показывает рис. 1, большинство приводных задач может быть решено с помощью двух инверторных платформ SKAI: низковольтной LV на базе MOSFET (рабочее напряжение 100, 150 и 200 В) и высоковольтной HV на базе IGBT (600 и 1200 В).

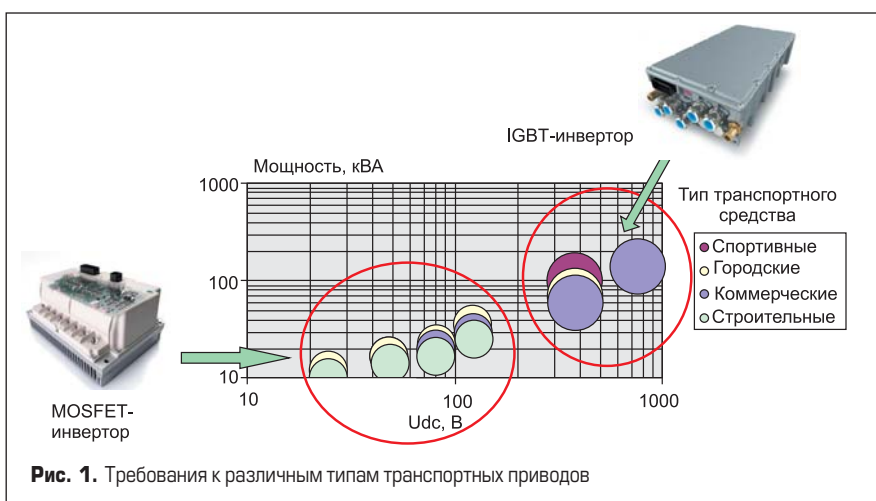


Рис. 1. Требования к различным типам транспортных приводов

Таблица 1. Основные требования, предъявляемые к модулям электропривода

Условия эксплуатации	
Температура окружающей среды $T_{\text{окр}}$ , °C	-40...+125
Температура охлаждающей жидкости, °C	-40...+75
Температура кристаллов $T_{\text{к}}$ , °C	-40...+175
Вибрации, g	5-12
Удары, g	50-100
Класс защиты	IP54-IP6K9K
Удельная мощность (к объему и весу)	Высокая
Надежность	
Полный назначенный срок службы (включая нерабочее состояние), лет	20
Ресурс, ч	10 000-50 000
Активное термостратирование (импульсы мощности)	3 000 000 циклов при $\Delta T = 40$ K
Пассивное термостратирование (изменение окружающей температуры)	10 000 циклов при $\Delta T = 100$ K (два холодных пуска в день)

Таблица 2. Основные характеристики компонентов системы SKAI

Параметры	SKAI MOSFET LV версия	SKAI MOSFET HV версия	SKAI MCB
Применение	Погрузчики, батарейный транспорт	Электро- и гибридомобили	Источник питания собственных нужд для коммерческого транспорта
Мощность, кВ·А	<55	<250	<40
Напряжение DC-шины, В	24-160	150-850	450-850
Состав	Одиночный или двойной трехфазный инвертор, воздушное/жидкостное охлаждение	Трехфазный инвертор, жидкостное охлаждение	Инвертор, DC/DC-конвертер, зарядное устройство

В гибридных автомобилях новейших поколений используется одноконтурная система охлаждения, температура тосола в которой поддерживается на уровне +105 °C в номинальном режиме и достигает +120 °C при кратковременных перегрузках. Окружающий воздух в подкапотном пространстве может нагреваться до +125 °C, а температура чипов  $T_j$  силового модуля способна превысить значение +150 °C. Во время зимней стоянки кристаллы осты-

вают до температур, близких к точке замерзания охлаждающей жидкости.

Работа модулей стандартной конструкции в условиях воздействия термоциклов со столь высокими градиентами неизбежно ведет к сокращению их ресурса. Только специализированные силовые ключи, предназначенные для эксплуатации в составе транспортного привода, могут обеспечить требуемые показатели надежности. Их проектирование должно производиться с учетом приведенных в таблице 1

технических требований для электронной аппаратуры, размещаемой в подкапотном пространстве автомобиля с жидкостным охлаждением.

При формировании требований к транспортному приводу следует обратить внимание на следующие основные моменты:

- Воздействие пассивных термоциклов с градиентом до 100 K является типовым, при сроке службы 15-20 лет их расчетное количество составляет 10 000.
- Требование по активному термостратированию (3 млн при 40 K) может быть удовлетворено только при использовании новейших технологий корпусирования.
- Требования по механическим воздействиям зависят от места установки инвертора. Как правило, это моторный отсек, возможен монтаж непосредственно на двигатель или коробку передач.
- Класс защиты IP также зависит от положения электронного модуля, однако он должен быть не ниже 54.

### SKAI 2 — системная архитектура

Все компоненты семейства SKAI построены на основе единой архитектуры, показанной на рис. 2. Ядром системы является силовая секция, содержащая MOSFET- или IGBT-инвертор, банк конденсаторов, датчики тока, напряжения и температуры, систему охлаждения и EMI-фильтр. Законченное изделие также включает драйвер затворов со схемой защиты, изолированный источник питания и DSP-контроллер.

Модули SKAI могут поставляться с управляющим контроллером и без него, в первом случае система имеет программное обеспечение (ПО) QUASAR, разработанное швейцарской фирмой DriveTEK. ПО QUASAR осуществляет векторный замкнутый контроль привода и гарантирует непрерывное управление электрической машиной в широком диапазоне изменения магнитного поля. Контроллер QUASAR получает команды от центрального процессора по CAN-шине и конвертирует их в сигналы управления скоростью или моментом. В качестве исполнительного устройства может использоваться бесколлекторный DC-мотор, синхронная машина с постоянными магнитами или асинхронный двигатель. Существует возможность доработки ПО в соответствии с техническими требованиями заказчика.

Элементы системы SKAI размещены в герметичном корпусе IP67, на котором находятся силовые терминалы для подключения питания и двигателя, сигнальный интерфейс CAN, а также вспомогательные аналоговые и цифровые выводы. Моторные сенсоры (температуры, положения и скорости) могут подключаться непосредственно к модулю SKAI.

Система высокого уровня интеграции SKAI 2 предназначена для построения транспортного электропривода широкого применения, ее использование позволяет сделать процесс проектирования готового изделия максимально быстрым и простым. Компоненты SKAI 2 (табл. 2) разработаны в соответствии с новейшими автомобильными стандартами и требованиями по надежности.

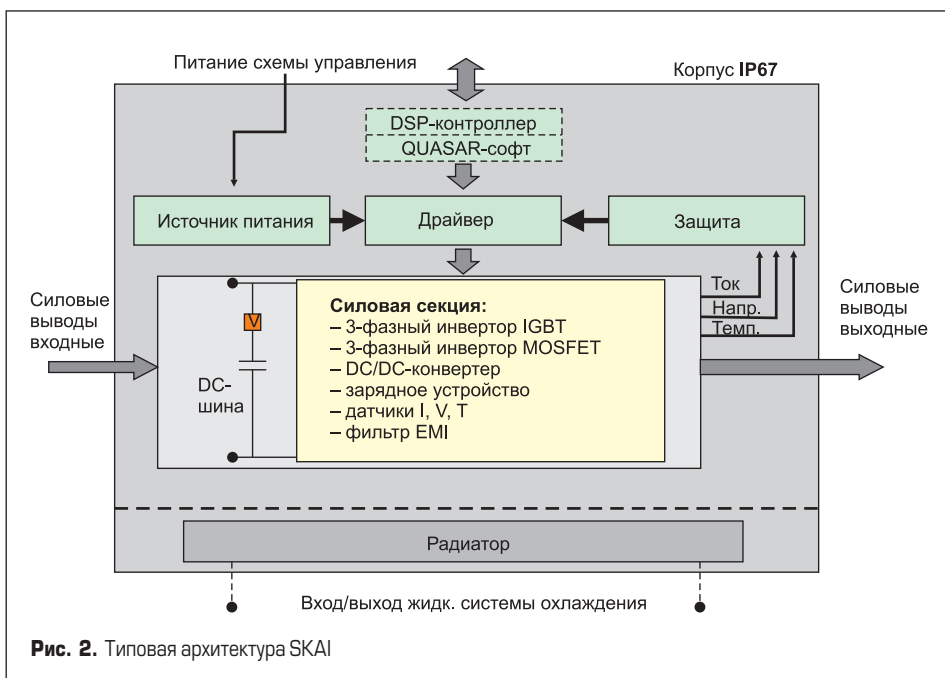


Рис. 2. Типовая архитектура SKAI



Рис. 3. Версии SKAI 2: а) высоковольтная (HV); б) низковольтная (LV)

Таблица 3. Основные характеристики SKAI 2HV

Параметр	Условия измерения	600 В	1200 В
Выходной ток (продолжительный режим), $I_{AC,rmsC}$ , А	$T_c = +60\text{ }^\circ\text{C}$ , $f_{sw} = 4\text{ кГц}$ , синус 50 Гц	300	300
Выходной ток (перегрузка 30 с), $I_{AC,rmsC}$ , А	$T_c = +60\text{ }^\circ\text{C}$ , $f_{sw} = 4\text{ кГц}$ , синус 50 Гц	550	400
Номинальное напряжение DC-шины, $V_{DC}$ , В		375	750
Максимальное напряжение DC-шины, $V_{DCmax}$ , В		450	900
Напряжение изоляции, $V_{isol}$ , В	DC, 1 с	$\pm 2700$	$\pm 4000$
Частота коммутации, $f_{sw}$ , кГц		<20	<20
Температура окружающей среды, $T_A$ , $^\circ\text{C}$	Снижение рабочих режимов при $T_A > +85\text{ }^\circ\text{C}$	-40...+105	
Температура охлаждающей жидкости, $T_C$ , $^\circ\text{C}$	Снижение рабочих режимов при $T_C > +65\text{ }^\circ\text{C}$	-40...+85	
Температура хранения, $T_{stg}$ , $^\circ\text{C}$		-40...+105	
Габаритные размеры, мм	Без кабелей и штуцеров	448×224×109	
Емкость DC-шины, $C_{DC}$ , мФ		1	

Таблица 4. Основные характеристики SKAI 2LV (жидкостное охлаждение, 1 инвертор)

Параметр	Условия измерения	100 В	150 В	200 В
Выходной ток (продолжительный режим), $I_{AC,rmsC}$ , А	$T_c = +65\text{ }^\circ\text{C}$ , $f_{sw} = 4\text{ кГц}$ , синус 50 Гц	450	400	350
Выходной ток (перегрузка 15 с), $I_{AC,rmsC}$ , А	$T_c = +65\text{ }^\circ\text{C}$ , $f_{sw} = 4\text{ кГц}$ , синус 50 Гц	600	500	400
Номинальное напряжение DC-шины, $V_{DC}$ , В		48	80	120
Максимальное напряжение DC-шины, $V_{DCmax}$ , В		72	120	160
Напряжение изоляции, $V_{isol}$ , В	DC, 1 с	$\pm 1500$	$\pm 1500$	$\pm 1500$
Частота коммутации, $f_{sw}$ , кГц		<12	<12	<12
Температура окружающей среды, $T_A$ , $^\circ\text{C}$	Снижение рабочих режимов при $T_A > +85\text{ }^\circ\text{C}$	-40...+105		
Температура охлаждающей жидкости, $T_C$ , $^\circ\text{C}$	Снижение рабочих режимов при $T_C > +65\text{ }^\circ\text{C}$	-40...+85		
Температура хранения, $T_{stg}$ , $^\circ\text{C}$		-40...+105		
Габаритные размеры, мм	Без кабелей и штуцеров	290×200×108		
Емкость DC-шины, $C_{DC}$ , мФ		25,2	11,7	8,1

Высоковольтная версия SKAI 2HV (рис. 3а) мощностью до 250 кВт предназначена для применения в гибридо- и электромобилях, а также в автомобилях и автобусах с гибридной силовой установкой. Она имеет жидкостное охлаждение, силовой инвертор построен на базе IGBT с рабочим напряжением 600 или 1200 В, основные параметры приведены в таблице 3.

В состав SKAI 2HV входит новейший силовой модуль SKiM 93 [6] прижимного типа, в котором полностью отсутствуют паяные соединения, а для установки чипов впервые использована технология низкотемпературного спекания. Устройство содержит звено постоянного тока на основе полипропиленовых конденсаторов, плату управления и защиты, DSP-контроллер последнего поколения, ЕМI-фильтр, а также датчики тока, напряжения и температуры. Все указанные элементы размещаются в герметичном корпусе класса защиты IP67, связь с контроллером верхнего уровня осуществляется по CAN-шине.

Для транспорта с батарейным питанием предназначены компоненты серии SKAI 2LV (рис. 3б и табл. 4), включающие силовой каскад на базе MOSFET с рабочим напряжением 50/100/150/200 В. Данный вариант модуля может иметь как жидкостное, так и воздушное охлаждение. В состав блока входят один или два инвертора, второй вариант предназначен для использования в вилочных погрузчиках, где один силовой каскад управляет тяговым мотором, а второй — приводом «вилки». Блок способен работать с двигателем мощностью до 40 кВт, по структуре он аналогичен описанному выше высоковольтному SKAI 2HV.

Третьим представителем семейства SKAI 2 является так называемый мультиконверторный блок (Multi Converter Block, MCB), содержащий набор преобразователей напряжения, необходимых для питания вспомогательных узлов трактора. Модуль SKAI 2MCB (рис. 4), рассчитанный на режим жидкостного охлаждения, размещается в герметичном корпусе IP67. Для связи с управляющим контроллером, как и в предыдущем случае, служит CAN-шина, сигнальный I/O-интерфейс позволяет подключать к нему датчики различного назначения и внешние цифровые устройства.

В стандартной конфигурации SKAI 2MCB содержит трехфазный активный выпрямитель на 40 кВА, два трехфазных инвертора мощностью 20 и 10 кВА и DC/DC-конвертер 14 В/300 А или 28 В/170 А. Силовые каскады блока построены на компонентах серии MiniSKiiP 2, отличительной особенностью которых является использование пружинных контактов для внешних подключений. Модуль MCB может использоваться в качестве источника питания собственных нужд для тракторов, автобусов и грузовиков с гибридной силовой установкой.

Все компоненты семейства SKAI 2 проходят полный цикл квалификационных тестов, включая ускоренные испытания на отказ, которые позволяют выявить критические точки конструкции, а также механизмы и причины ранних выходов из строя. По желанию за-

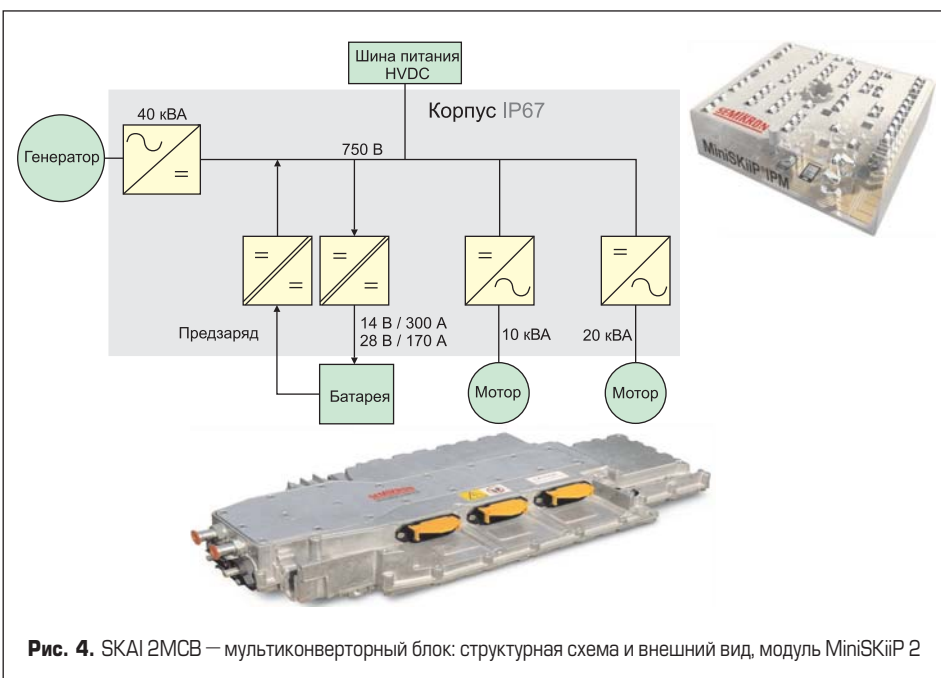


Рис. 4. SKAI 2MCB — мультиконверторный блок: структурная схема и внешний вид, модуль MiniSKiiP 2

казчика могут проводиться тесты в условиях предельных нагрузок, при повышенном напряжении и максимальной температуре.

**Инновационные технологии**

Надежность, мощностные характеристики и КПД силового преобразовательного устройства зависят от многих факторов. Чтобы достичь максимальной технической и экономической эффективности и обеспечить при этом минимальные габариты и высокую надежность изделия, необходимо использовать новейшие поколения полупроводниковых ключей и методы их корпусирования. Большинство традиционных, используемых в настоящее время технологий непригодно для создания транспортного привода, удовлетворяющего современным стандартам.

Разнообразие требований, касающихся условий эксплуатации, электрических характеристик, а также диапазона напряжения питания делает необходимым использование силовых ключей различного типа, класса напряжения, токового диапазона. Выбор полупроводников с учетом указанных параметров позволяет оптимизировать характеристики инвертора для различных применений и условий работы.

Компания SEMIKRON, как производитель силовых модулей и готовых решений, способна обеспечить наилучшее соотношение плотности мощности, габаритных размеров и тепловых режимов. Оптимизация силового каскада предусматривает использование чипов MOSFET/IGBT или дискретных модулей, а также разработку специализированных микросхем (ASIC) для построения платы управления. Это позволяет существенно снизить количество элементов и стоимость готовой системы, уменьшить ее габариты и повысить надежность.

Основной проблемой стандартных модулей является усталость паяных соединений, прогрессирующая по мере работы в условиях термомеханических стрессов. Перепады температуры, возникающие при изменении нагрузки, разрушают жесткие связи конструктивных слоев модуля, к которым в первую очередь относятся соединения базы и изолирующей DBC-платы, а также кремниевых чипов и подложки. С ростом градиента температуры и ее среднего значения процесс деградации паяных соединений ускоряется. Требования, предъявляемые к транспортным модулям по активному и пассивному термодетерминированию, приведены в таблице 1.

Для борьбы с указанными явлениями разработано несколько инновационных технологий, внедрение которых позволяет создавать силовые модули, удовлетворяющие самым жестким стандартам автоиндустрии. Проблема разрушения паяных соединений полностью устранена в компонентах серии SKAI благодаря использованию технологий прижимного контакта и низкотемпературного спекания. Слой спеченного серебряного нанопорошка обладает гораздо более высокой стойкостью к термодетерминированию, а его

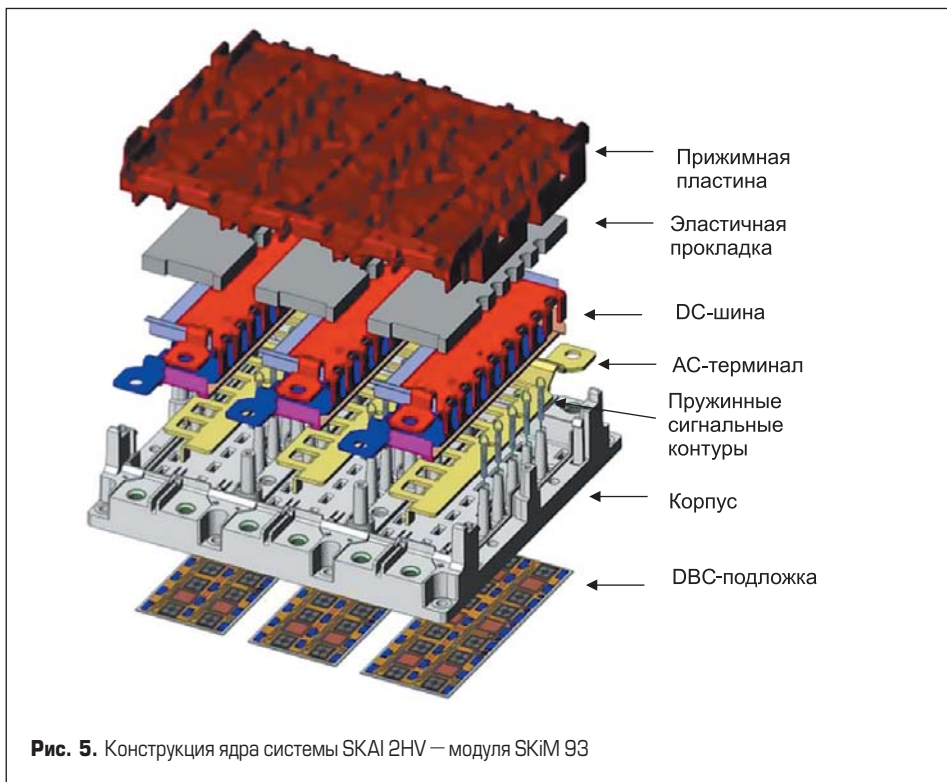


Рис. 5. Конструкция ядра системы SKAI 2HV — модуля SKiM 93

температура плавления в шесть раз выше, чем у любого из традиционных припоев. Кроме того, серебряное соединение имеет более высокую эластичность и теплопроводность, а его структура отличается однородностью и отсутствием лагун.

Еще одна проблема, связанная с разницей КТР, — отслоение алюминиевых выводов чипов, также являющееся результатом термодетерминирования при больших градиентах температуры. Для решения данного вопроса применяется ряд технологических приемов, включающих оптимизацию геометрии контактных зон и использование отжига для снижения напряжения при сварке.

Все описанные выше технологические инновации реализованы в ключевом компоненте

высоковольтной версии SKAI 2HV — модуле SKiM 93 (рис. 5). Это первый силовой ключ SEMIKRON, в котором полностью отсутствуют паяные соединения, кристаллы установлены методом низкотемпературного спекания, а электрические соединения обеспечиваются только за счет прижима.

Аналогичная конструкторская концепция используется и в низковольтной версии SKAI 2LV. Разница состоит в том, что при сборке блока LV на радиатор устанавливается не готовый модуль, а изолирующая DBC-подложка с силовыми кристаллами (рис. 6).

Тепловое сопротивление спеченного слоя в 15 раз, а электропроводность — в пять раз ниже, чем у аналогичного паяного соединения. Столь существенное улучшение характе-

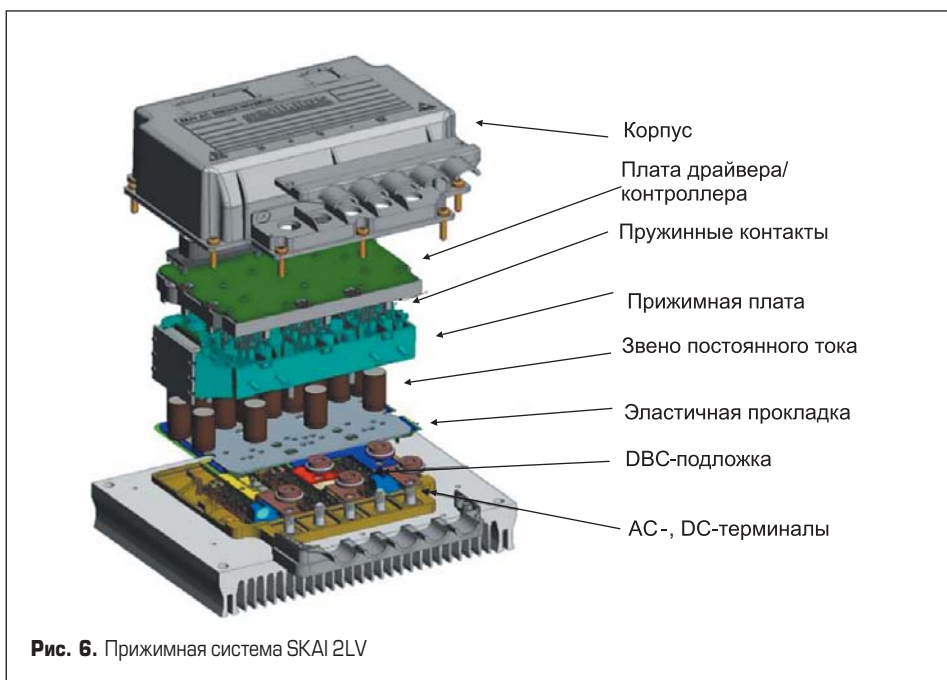


Рис. 6. Прижимная система SKAI 2LV

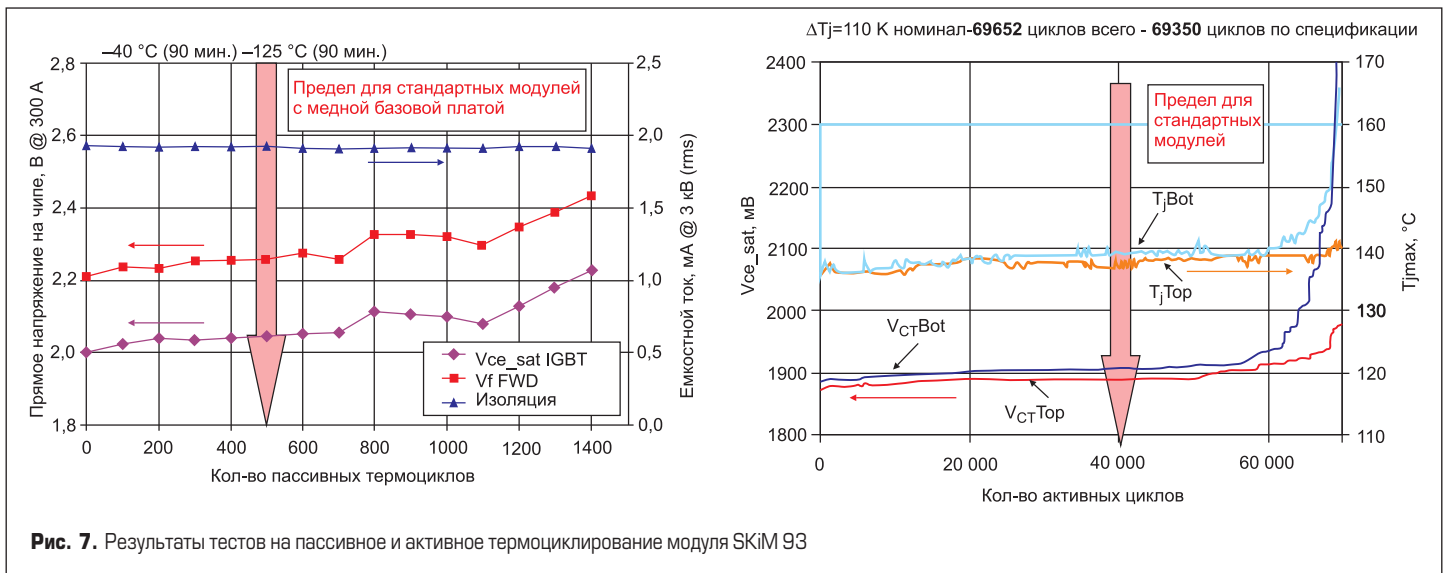


Рис. 7. Результаты тестов на пассивное и активное термоциклирование модуля SKiM 93

ристик обусловлено уникальными свойствами серебра и особенностями порошковой структуры. Соответствующее изменение показателей надежности поясняется графиками, приведенными на рис. 7. Количество пассивных циклов до отказа силового ключа типа SKiM 93 примерно в три раза выше, чем у традиционного модуля с паяным медным основанием. На рисунке видно, что прижимная конструкция SKiM позволяет ему выдержать без повреждения 1500 циклов при градиенте 165 K (-40...+125 °C). Для обычных компонентов в соответствии со стандартом IEC 68-2-14 нормой является всего лишь 100 подобных воздействий.

Аналогичные результаты дала проверка на воздействие активных термоциклов (правая часть рис. 7). В отличие от ключа традиционной конструкции, способного выдержать не более 40 тыс. перепадов температуры, модуль SKiM отработал около 70 тыс. циклов (+75%). Хотя доминантным механизмом его отказа стало отслоение сварных алюминиевых выводов, отметим, что разрушение паяных соединений только ускоряет этот процесс у стандартных компонентов. Для сравнения укажем, что по стандарту IEC 147-4 при квалификации модулей традиционной конструк-

ции они должны выдерживать не более 20 000 циклов при градиенте 100 K.

Объединение в едином компактном корпусе силовой секции и звена постоянного тока имеет ряд преимуществ. Суммарная распределенная индуктивность  $L_S$  соединительных шин самого мощного модуля SKAI HV с учетом конденсаторов составляет всего 35 нГн. Столь низкое значение  $L_S$  достигнуто также за счет многоточечной конструкции слоев DC-шины (рис. 5), обеспечивающей доступ к каждому чипу и, как следствие, сверхмалое значение контактного сопротивления. Использование подобного дизайна шин в модулях прижимной конструкции позволяет существенно улучшить баланс токов параллельных кристаллов в статических и динамических режимах.

Особенности динамических характеристик 600-В Trench IGBT требуют оптимизации схемы управления затворами для обеспечения безопасного уровня перенапряжения при выключении. Желательно, чтобы импеданс драйвера динамически изменялся в зависимости от напряжения  $V_{CE}$  и тока коллектора  $I_C$  и такой режим реализован в SKAI 2. На рис. 8а показан процесс выключения 600-В IGBT при  $I_C = 900$  А и напряжении питания  $V_{DC} = 450$  В.

На кривой  $V_{CE}$  ясно виден изгиб, соответствующий точке, где происходит уменьшение скорости выключения. Подобный режим «интеллектуального» запираания IGBT позволяет инвертору работать при напряжении DC-шины до 450 В во всем диапазоне температур и исключить риск пробоя транзисторов из-за коммутационных всплесков. Следствием «динамического запираания» является небольшой рост динамических потерь на высоких рабочих токах, что может быть скомпенсировано уменьшением частоты коммутации в предельных режимах.

Еще одним важным требованием, предъявляемым к транспортным электронным блокам, является хорошая электромагнитная совместимость. Конструкция инвертора SKAI HV обеспечивает его соответствие европейской директиве 72/245/EWG по EMI для дорожного транспорта без любых дополнительных внешних устройств. Это достигнуто за счет использования встроенного фильтра, состоящего из Y-конденсаторов, двух RC-цепочек и двух дросселей для подавления синфазных помех в критических диапазонах частот (рис. 9). Кроме того, внешние коннекторы SKAI позволяют подключать экранированные кабели.

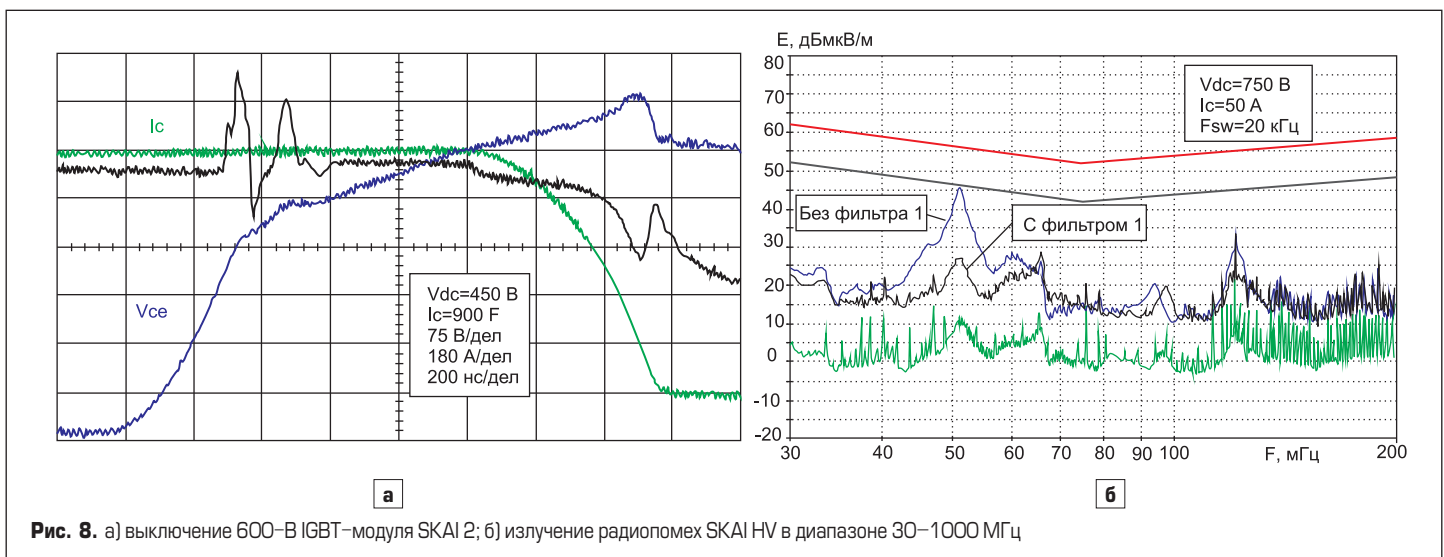


Рис. 8. а) выключение 600-В IGBT-модуля SKAI 2; б) излучение радиопомех SKAI HV в диапазоне 30–1000 МГц

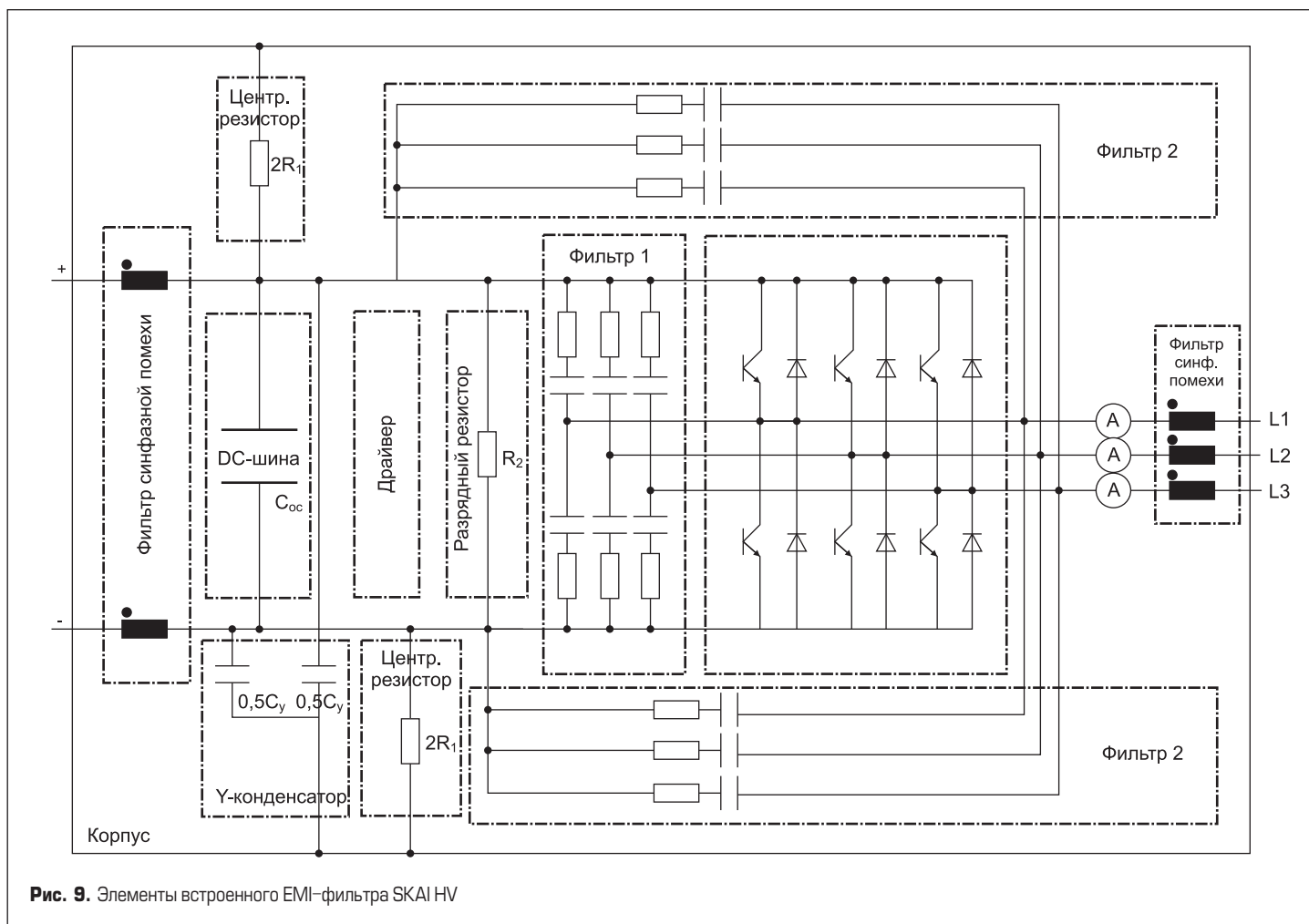


Рис. 9. Элементы встроенного EMI-фильтра SKAI HV

Результаты проверки изделия на электромагнитную совместимость, проводимой по методике стандарта CISPR 25, представлены на рис. 8б. При испытаниях применялись экранированные провода со специальными кабельными EMI-муфтами. Эффект от применения цепи «Фильтр 1» хорошо виден на рисунке (черная кривая). Фильтр, устанавливаемый непосредственно на силовом модуле, имеет очень высокую резонансную частоту; уровень ослабления шумов составляет примерно 20 дБмкВ на 50 МГц. Зеленая эпюра дает усредненный вид спектра при установке «фильтра 1», условия нагрузки выбраны наихудшими с точки зрения генерации помех.

### Силовые терминалы

Предельное значение выходного тока модуля SKAI HV составляет 300 А (эффективное значение в длительном режиме), соответствующие требования предъявляются к терминалам для подключения силовых цепей. Традиционным решением, обеспечивающим универсальность соединения, является использование кабельных муфт, кабельных наконечников и резьбовых соединений. Существует достаточно большое количество типов и поставщиков подобных изделий, однако при большом объеме производства следует обращать внимание на следующие факторы:

- Способ монтажа должен исключать ошибку соединения.
- Сборка должна иметь высокую степень качества и воспроизводимости, ее параметры (например, момент затяжки) должны контролироваться.
- Соединение должно занимать минимум времени.

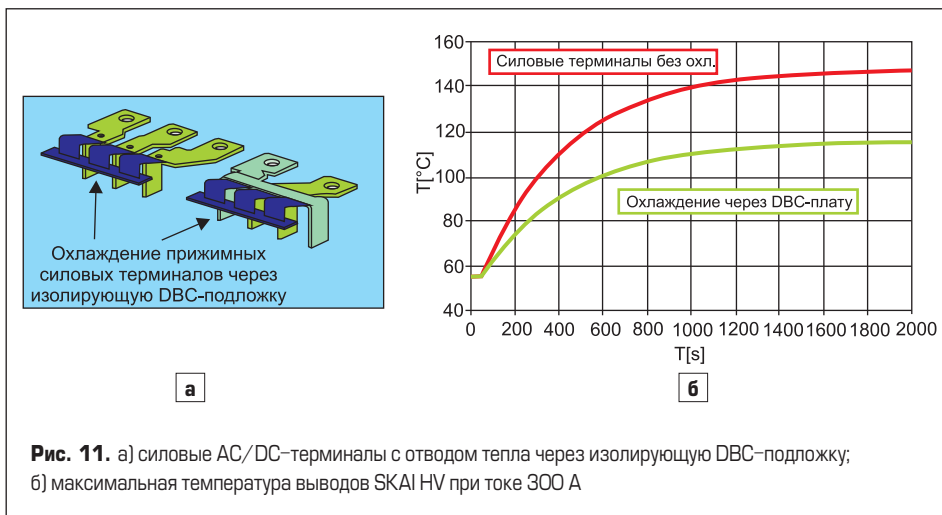
Конструкция терминалов, показанная на рис. 10, удовлетворяет приведенным выше требованиям. Все кабельные соединения могут быть протестированы после предварительного подключения, окончательная сборка включает

три контролируемых этапа по каждому силовому коннектору. Решение А предусматривает подключение жгута с кабельным наконечником к IPT-выводу модуля, который выполняет функцию кабельной муфты и имеет кодовый штифт, исключающий ошибку при сборке.

Это решение может оказаться недостаточным при наличии требований по безопасности, предусматривающих интегрированную высоковольтную блокировку (HVIL). Для такого случая существует вариант с ножевыми контактами в защищенном разьеме, показанный на рис. 10б. Сечение кабеля при этом



Рис. 10. Конструкция силовых терминалов SKAI HV: а) в исполнении IPT (класс защиты IP6K9K, сечение жгута не более 50 мм<sup>2</sup>); б) сборка с мощными ножевыми разьемами



не должно превышать 50 мм<sup>2</sup>, размер контактных ножей составляет 1,8×14,5 мм.

Если величина тока превышает 300 А в продолжительном режиме, два DC-контакта соединяются параллельно. В противном случае вторая пара ножей может использоваться для подключения другого потребителя или на них устанавливаются защитные заглушки.

Для защиты ножевых контактов от перегрева внутри модуля SKAI необходимо обеспечить дополнительный путь отвода тепла. С этой целью силовые терминалы напрессовываются на изолирующую DBC-подложку силового модуля, изготовленную из оксида алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 11а). Подложка, размещенная на корпусе модуля, имеет хороший тепловой контакт с радиатором, что дает возможность эффективно отводить тепло как от силовых кристаллов, так и от терминалов. Как показывают графики на рис. 11б, подобная конструкция выводов позволяет снизить их температуру примерно на 30 °С.

### Применение блока SKAI 2 MCB в сельскохозяйственной технике

В числе прочих к современной сельскохозяйственной технике предъявляются требования по снижению потребления топлива, улучшению экологических характеристик и уменьшению уровня шума. До настоящего времени отбор мощности от основного привода для управления вторичным оборудованием трактора производился механическим способом посредством редукторов. Это не позволяло силовой установке работать в оптимальном режиме, что приводило к повышенному расходу топлива и высокому уровню выбросов вредных веществ.

Основной задачей разработки гибридной системы с электрической трансмиссией было отключение вспомогательных устройств от основного привода. Усовершенствованный асинхронный генератор мощностью 200 кВт, установленный в гибридном тракторе, используется только как источник электроэнергии. Система электропитания обеспечивает оптимальные режимы работы вентилятора охлаждения

(асинхронный мотор 10 кВт), компрессора кондиционера (синхронный двигатель с постоянными магнитами 5 кВт) и бортового источника питания 14 В/300 А.

Мультikonверторный модуль высокого уровня интеграции SKAI 2 MCB разрабатывался по техническому заданию компании Deere — крупнейшего мирового производителя тракторов. Блок, предназначенный для эксплуатации в крайне жестких условиях воздействия окружающей среды, может работать от трехфазного генератора или высоковольтной DC-шины. Он содержит несколько преобразователей, построенных на базе модулей MiniSKiP 2-го поколения. Управление режимами работы устройства производится от контроллера верхнего уровня по CAN-шине. Сигнальный I/O-интерфейс позволяет подключать к блоку MCB различные типы аналоговых и цифровых сенсоров.

Платформа SKAI 2 MCB предназначена для решения широкого круга задач, она может использоваться как источник питания собственных нужд или вспомогательный сервопривод. Применение подобных высокотехнологичных эффективных устройств позволяет снизить потребление топлива и удовлетворить самые современные требования по снижению выбросов вредных веществ.

### Заключение

В условиях современного рынка основные усилия производителей силовой элементной базы направлены на повышение плотности тока, уровня системной интеграции и надежности. Разработка семейства компонентов SKAI 2, предназначенных для использования в новейших электро- и гибридных автомобилях, является важной вехой на пути создания транспорта нового поколения.

Основной проблемой разработки силовых модулей для транспортного применения является обеспечение высокой надежности при многократном воздействии термоциклов. По климатическим и механическим воздействиям условия работы автоэлектроники также относятся к наиболее жестким. Решение этих задач стало

возможным благодаря внедрению ряда инноваций, к которым относятся технологии прижимного контакта и низкотемпературного спекания. Прижимные терминалы обладают большой токонесящей способностью и высокой стойкостью к вибрационным нагрузкам и термоциклам. Благодаря хорошему тепловому контакту с изолирующей подложкой и радиатором удается эффективно отводить тепло от выводов данного типа. Принцип прижимного контакта был использован при разработке «безбазовых» модулей SEMIKRON, стойкость к термоциклированию которых во много раз выше, чем у силовых ключей традиционной конструкции.

Специально для применения в блоках семейства SKAI 2 были разработаны банки полипропиленовых конденсаторов, способные работать при больших перепадах температуры. Наличие встроенного EMI-фильтра обеспечивает компоненту SKAI 2 соответствие европейской директиве 72/245/EWG по электромагнитной совместимости.

Компания SEMIKRON проводит исследования, направленные на повышение эффективности преобразования, уменьшение габаритов, повышение уровня интеграции и расширение температурного диапазона. Большие перспективы на пути дальнейшего совершенствования силовых модулей открывает внедрение новой SKiN-технологии [7], позволяющей отказаться от сварного подключения выводов чипов.

Отметим, что SEMIKRON является единственной компанией, способной провести все этапы проектирования специализированных модулей, начиная с постановки задачи, определения оптимальной архитектуры изделия, моделирования электрических и механических режимов работы и заканчивая производством и испытаниями опытных и серийных образцов.

### Литература

1. SKAI 90 A2 GD06-W12CI, SKAI 45 A2 GD12-W12CI. Datasheet. www.semikron.com.
2. Wintrich A., Beckedahl P., Wurm T. Electrical and thermal optimization of an automotive power module family // APE. Paris, France. 2007.
3. Scheuermann U., Beckedahl P. The Road to the Next Generation Power Module — 100% Solder Free Design // CIPS. Nürnberg, Germany. 2008.
4. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Applikationshandbuch Leistungshalbleiter // ISLE Verlag. 2010.
5. Колпаков А. Модули SKAI — предельный уровень интеграции // Силовая электроника. 2005. № 3.
6. Колпаков А. SKiM 63/93 — специализированные модули для электротранспорта // Силовая электроника. 2007. № 3.
7. Грассофф Т. Технологии силовой электроники сегодня и завтра // Силовая электроника. 2011. № 4.