

Новое поколение компактного модуля привода SKAI: мощность под контролем

Пол НЬЮМАН (Paul NEWMAN)
Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Снижение уровня выбросов двуокиси углерода и экологическая безопасность — ключевые требования нашего времени. Для того чтобы соответствовать им и уверенно смотреть в будущее, необходимо постоянно быть на шаг впереди прогресса.

Автомобильная индустрия 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. Важнейшим шагом на этом пути стала разработка модулей прижимного типа и внедрение метода низкотемпературного спекания чипов, впервые в мире использованного компанией SEMIKRON при производстве транспортных модулей серии SKiM. С помощью данных технологий удается полностью исключить развитие усталостных процессов в паяных соединениях и обеспечить высокую стойкость к термоциклированию.

К любому электронному устройству, предназначенному для работы на транспорте, предъявляется ряд специальных требований. В первую очередь современный электропривод должен быть легким, компактным и в то же время способным работать в усло-

виях 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 нагреваться до +125 °С, а температура чипов T_j силового модуля способна превысить значение +150 °С. Во время зимней стоянки кристаллы остывают 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. И 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.

Для создания компонентов, удовлетворяющих указанным требованиям и способных работать в транспортных средствах различного назначения — от вилчатых погрузчиков и сельскохозяйственных машин до гибридных

автомобилей и автобусов, в составе компании SEMIKRON действует «Группа Разработки Специальных Систем». Задачей подразделения является проектирование устройств, ориентированных на электротранспорт.

Специализированные силовые модули выпускаются компанией более 20 лет, в 2004 г. появилась торговая марка SKAI (SEMIKRON Automotive Inverter) [1]. 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. 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 г. приз «поставщик года» от компании General Motors. На выставке PCIM-2010 в Нюрнберге было представлено новое семейство SKAI-2, содержащее набор специализированных блоков для построения транспортного привода.

Особенности конструкции

Выпускаемые в настоящее время силовые ключи можно условно разделить по принципиальному конструктивному признаку: наличие или отсутствие 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 [2–5].

Массивная базовая плата (как правило, это медная пластина толщиной 3 мм) позволяет увеличить теплоемкость модуля и способствует лучшему распределению тепла, выделяемого кристаллами. Благодаря этому ди-



Таблица 1. Основные требования, предъявляемые к модулям электропривода

Условия эксплуатации	
Температура окружающей среды T_{amb} , °С	–40...+135
Температура охлаждающей жидкости, °С	–40...+105
Температура кристаллов T_j , °С	–40...+175
Вибрации, m/s^2	10×9,81
Удары, m/s^2	50×9,81
Надежность	
Срок службы	15 лет
Активное термоциклирование (импульсы мощности)	30 000 циклов при $\Delta T = 100 K$
Пассивное термоциклирование (изменение окружающей температуры)	1000 циклов при $\Delta T = 165 K$

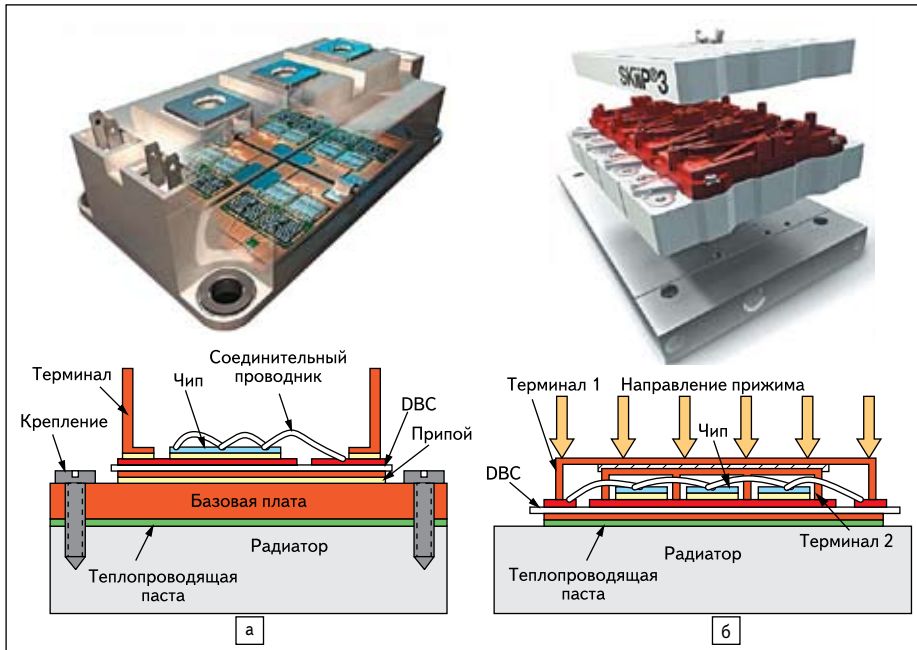


Рис. 1. Особенности конструкции силовых модулей: а) с базовой платой; б) без базовой платы

намический тепловой импеданс стандартных силовых ключей в области постоянных времени 0,1–1 с несколько меньше, чем у «безбазовых» компонентов.

К медному основанию припаяется одна или несколько керамических DBC-подложек с чипами. Кристаллы и силовые терминалы также 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 перегрева. Существует эмпирическое соотношение,

в соответствии с которым стойкость к термоциклированию уменьшается вдвое с ростом средней температуры на 20 °С.

Очевидно, что модули стандартной конструкции (рис. 1а) не предназначены для эксплуатации в условиях, изложенных в таблице 1. Некоторые производители используют для изготовления базовой платы композитные материалы (AlSiC или CuMo), которые гораздо лучше меди согласованы с керамикой по КТР. Однако недостатком композитов является худшая теплопроводность и более высокая стоимость, что ограничивает их массовое применение.

Практически полностью решить проблему, связанную с рассогласованием КТР медного основания и керамической подложки, позволяет технология прижимного контакта SKiP, разработанная компанией SEMIKRON в начале 90-х годов.

На рис. 1б показана структура слоев модуля прижимной конструкции: базовая плата, а следовательно, и паяный соединительный слой большой площади в этом случае отсутствует, 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 смещается 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.

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) [6], впервые в мире примененная SEMIKRON при производстве транспортных модулей серии SKiM и SKAI 2.

SKAI 2 — одна система, три решения

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 (рис. 2). Компоненты SKAI 2 разработаны в соответствии с новейшими автомобильными стандартами и требованиями по надежности.

В состав семейства входят модули привода на базе MOSFET, предназначенные для транспортных средств с батарейным питанием, и высоковольтные блоки IGBT. Существует возможность доработки компонентов SKAI 2 по требованиям заказчика. Необходимо отметить, что SEMIKRON является единственной компанией, которая способна провести все этапы проектирования, начиная с постановки задачи, определения оптимальной архитектуры изделия, моделирования электрических и механических режимов работы и заканчивая производством и испытаниями опытных и серийных образцов.

Высоковольтная версия SKAI 2HV (рис. 3) имеет жидкостное охлаждение, силовой инвертор построен на базе IGBT с рабочим напряжением 600 или 1200 В. Основные характеристики модуля приведены в таблице 2. Блоки мощностью до 250 кВт предназначены для применения в электромобилях, а также в автомобилях и автобусах с гибридной силовой установкой. В состав блока входит новейший силовой модуль SKiM 93 [7] прижимного типа, в котором полностью отсутствуют паяные соединения, а для установки чипов использована технология низкотемпературного спекания. Схема устройства включает звено постоянного тока на основе полипропиленовых конденсаторов, плату управления и защиты, DSP-контроллер последнего поколения, EMC-фильтр, а также датчики тока,

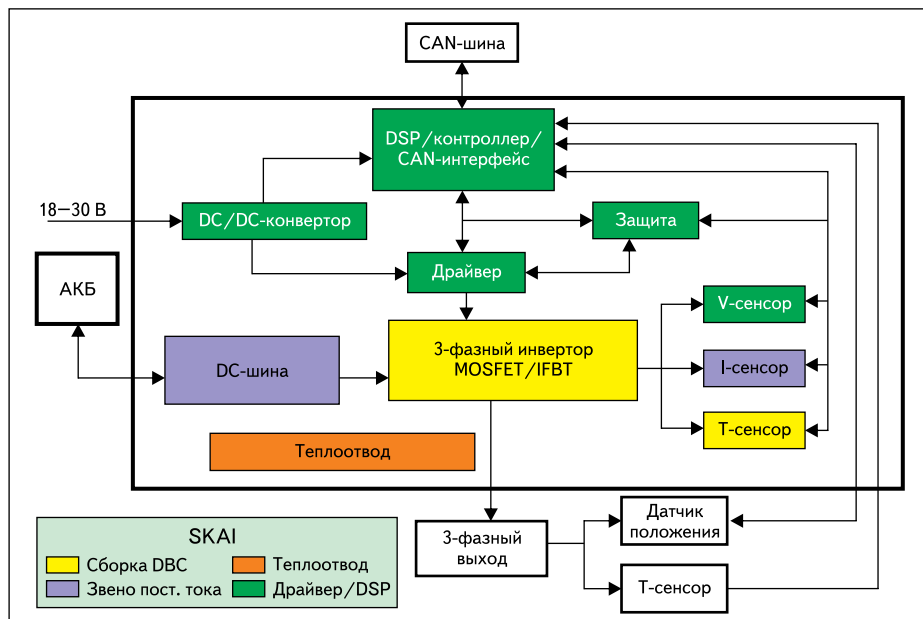


Рис. 2. Типовая архитектура SKAI



Рис. 3. SKAI 2HV — высоковольтный модуль привода (IGBT)



Рис. 4. SKAI 2LV — низковольтный модуль MOSFET с двумя инверторами

напряжения и температуры. Все указанные элементы размещаются в герметичном корпусе класса IP67, связь с контроллером верхнего уровня осуществляется по CAN-шине.

Для транспорта с батарейным питанием предназначены компоненты серии SKAI 2LV (рис. 4), включающие силовой каскад на базе MOSFET с рабочим напряжением 50/100/150/200 В. Данный вариант модуля может иметь как жидкостное, так и воздуш-

ное охлаждение. В состав блока входят один или два инвертора, второй вариант предназначен для использования в вилчатых 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 (основные характеристики приведены в таблице 3).

Третьим представителем семейства SKAI 2 является мультиконверторный блок, содержащий целый набор вспомогательных преобразователей напряжения, необходимых для питания маломощных потребителей. Модуль SKAI 2МСВ (рис. 5), рассчитанный на режим жидкостного охлаждения, размещается в герметичном корпусе IP67. Для связи с управляющим контроллером, как и в предыдущем случае, служит CAN-шина, сигнальный интерфейс имеет аналоговые и цифровые входы, что позволяет подключать к нему датчики различного назначения и внешние цифровые устройства.

В стандартной конфигурации SKAI 2МСВ содержит 3-фазный активный выпрямитель мощностью 40 кВА, два 3-фазных инвертора привода мощностью 20 и 10 кВА и DC/DC-конвертор 14 В/300 А или 28 В/165 А. В качестве силовых каскадов применены модули серии MiniSKiiP 2, отличительной особенностью которых является использование пружинных контактов в сигнальных и силовых цепях.

Все компоненты семейства SKAI 2 проходят полный цикл квалификационных тестов, включая ускоренные испытания на надежность и отказ, которые позволяют выявить критические точки конструкции, а также механизмы и причины ранних выходов из строя. По желанию заказчика могут проводиться тесты в режимах предельных нагрузок и максимально сложных условиях эксплуатации. Анализ полученных результатов позволяет вносить своевременные изменения в процесс производства, а также гарантировать соблюдение жестких требований автомобильных стандартов.

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 успешного решения за-

Таблица 2. Основные характеристики SKAI 2HV

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

Таблица 3. Основные характеристики SKAI 2LV (жидкостное охлаждение, 1 инвертор)

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

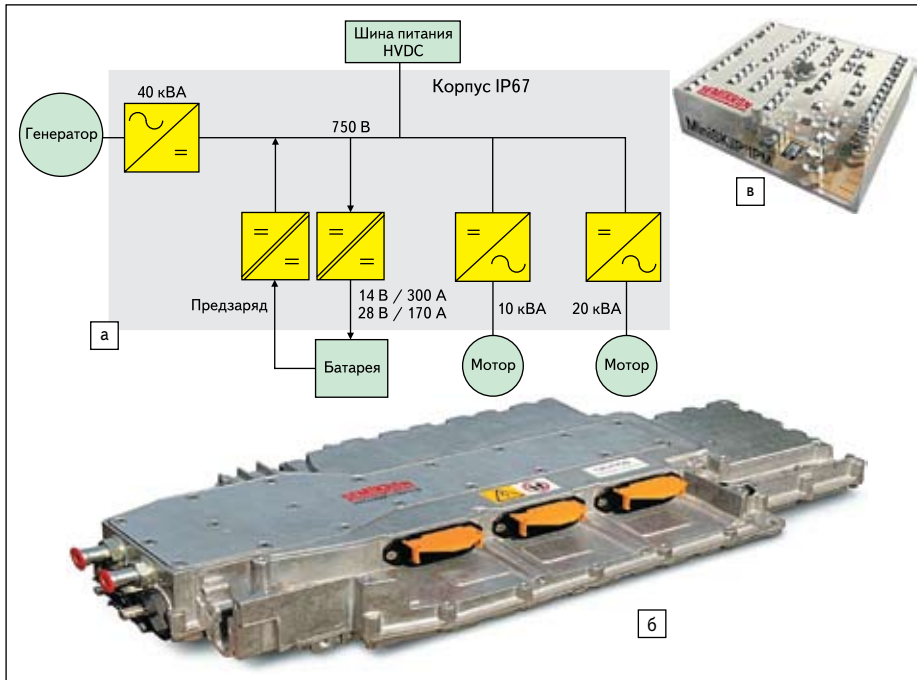


Рис. 5. SKAI 2MCB — мультиконверторный блок: а) структурная схема; б) внешний вид; в) модуль MiniSKiIP 2



Рис. 6. Модуль привода вилчатого погрузчика серии LAC

чатых погрузчиках компании LINDE (рис. 6). Сегодня компания производит в месяц около 10 000 таких блоков, а общее количество выпущенных погрузчиков с асинхронным приводом серии LAC превысило полмиллиона.

Среди последних разработок, выполненных с применением технологии SKAI, следует отметить трактор с гибридной силовой установкой последовательного типа. Подобными проектами, направленными на снижение потребления горючего и уровня шумов, а также на повышение тяговых характеристик и надежности, занимаются ведущие мировые производители сельскохозяйственной техники.

Во всех выпускаемых в настоящее время тракторах подключение вспомогательных устройств осуществляется с помощью механической коробки передач и вторичных валов. Эффективность такого способа отбора мощности очень низка, рабочие характеристики далеки от оптимальных, а потребление топлива и уровень вредных выбросов намного выше современных требований. При разработке электрической трансмиссии трактора нового поколения разработчики поставили задачу отключения вспомогательных устройств от основного привода. Один из таких проектов — «ЭТ-300ЦП» (рис. 7) — был успешно реализован ПО «Минский тракторный завод» и концерном «РУСЭЛПРОМ» в 2009 г. В нем использована схема последовательного типа, при которой дизель-генератор работает как источник электроэнергии, снабжающий вторичные потребители. Для управления мотор-колесами и выработки вспомогательного напряжения питания в машине применено 3 модуля SKAI первого поколения. Проведенные испытания показали высокую эффективность использования гибридного привода: отмечено снижение расхода горючего, уменьшение выброса вредных веществ и уровня шумов, улучшение тяговых характеристик.

Архитектура трактора с электрической трансмиссией отличается большим количеством потребителей электроэнергии различного типа, к которым относятся вентиляторы охлаждения, воздушный компрессор, кондиционер, а также сервоприводы постоянного тока. Использование мультиконверторно-

дачи 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 сделать такой выбор, обеспечив 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, которая развивается в результате воздействия 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.

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 прижимной конструкции и процесса низкотемпературного спекания чипов. Слой спеченного серебряного нанопорошка обладает гораздо более высокой стойкостью к термоциклированию, а его температура плавления в 6 раз выше, чем у любого из традиционных припоев. Кроме этого, серебряное соединение имеет более высокую гибкость и теплопроводность, а его структура отличается однородностью и отсутствием лакун.

Еще одна проблема, связанная с разницей КТР, — отслоение алюминиевых выводов чипов, также являющееся результатом термоциклирования 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 компоненты семейства SKAI 2 имеют встроенную плату контроллера, специализированное программное обеспечение может быть разработано самим заказчиком или компанией SEMIKRON с учетом требований потребителя.

Система SKAI в практических применениях

Отработка общей концепции и отдельных конструктивно-технологических решений, заложенных в блоках SKAI, продолжалась в течение 20 лет. Прообразом изделия стал специализированный модуль привода постоянного тока, разработанный SEMIKRON в начале 90-х годов для применения в виль-



Рис. 7. Трактор 300 л. с. с электрической трансмиссией переменного тока

го блока SKAI 2MCB (рис. 2) позволяет решить задачу питания указанных устройств. Модуль спроектирован с учетом применения в предельно жестких условиях эксплуатации, он может работать от 3-фазного генератора или шины постоянного тока HVDC, управление осуществляется от контроллера верхнего уровня по CAN-шине.

Заключение

В условиях современного рынка основные усилия производителей силовой элементной базы направлены на повышение плотности тока, уровня системной интеграции и надежности. В то же самое время они вынуждены стремиться к улучшению экономических

и потребительских свойств продукции, то есть снижать стоимость, максимально использовать стандартные проверенные решения, повышать гибкость и модульность конструктивного исполнения. Внедрение технологии прижимного контакта и метода низкотемпературного спекания, применение пружинных сигнальных соединений является важной вехой на пути преодоления указанных проблем.

Компания SEMIKRON продолжает работать над проблемами повышения мощностных характеристик и надежности, снижения габаритов и расширения температурного диапазона. Успеху этого процесса способствует высокий уровень компетенции упоминавшегося выше подразделения компании, «Группы Разработки Специальных Систем», деятельность которо-

го непосредственно связана с решением проблем транспортного привода. Последним проектом группы стало семейство интеллектуальных модулей электропривода SKAI 2, о котором шла речь в статье. Дальнейшие разработки направлены на повышение степени интеграции, внедрение более эффективных методов охлаждения, применение силовых кристаллов с расширенным температурным диапазоном, проектирование специализированных микросхем драйверов, внедрение инновационных технологий корпусирования. ■

Литература

1. Колпаков А. Модули SKAI — предельный уровень интеграции // Силовая Электроника. 2005. № 3.
2. Scheuermann U., Hecht U. Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swings, PCIM Nürnberg. 2002.
3. Daucher C. 100% solder-free IGBT Module Purpose-Designed for Automotive Applications. SEMIKRON Elektronik. 2006.
4. Grasshoff T., Daucher C. Solder-free Pressure Contact Modules for Automotive Applications. SEMIKRON International. 2006.
5. Beckedahl P., Tursky W., Scheuermann U. Packaging considerations of an Integrated Inverter Module for Hybrid Vehicles, PCIM Nürnberg. 2005.
6. Göbl C. Технология низкотемпературного спекания в силовых модулях // Компоненты и технологии. 2009. № 7.
7. Колпаков А. SKiM 63/93 — специализированные модули для электротранспорта // Силовая Электроника. 2007. № 3.