

Интеллектуальный транспорт XXI века

Силовая электроника все активнее внедряется в нашу повседневную жизнь. Постоянно используя достижения этой интереснейшей отрасли индустрии, мы не задумываемся о сложнейших технологиях, применяемых, например, в городском транспорте: в метро, трамваях, троллейбусах.

Очевидно, что транспортный привод должен обладать высочайшими показателями надежности, исключаящими, например, такое чрезвычайное событие, как остановка вагона метро в тоннеле. Для решения проблем современной транспортной электроники необходима согласованная совместная работа производителей силовых модулей и разработчиков готовых систем. Примером подобной успешной кооперации является многолетнее сотрудничество компаний Semikron и ŠKODA ELECTRIC.

**Ладислав Сobotка
(Ladislav Sobotka)**

**Ральф Херрманн
(Ralf Herrmann)**

**Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

С точки зрения воздействия окружающей среды, условия эксплуатации транспортной электроники являются одними из самых жестких, как по климатическим факторам, так и по механике. Элементы тягового привода, как правило, требуются размещать в ограниченном объеме, поэтому сам привод должен быть достаточно компактным и, соответственно, обладать высокой удельной мощностью. Во время зимней ночной стоянки температура воздуха в окружающем привода пространстве (или температура тосола) может опускаться значительно ниже нуля, а летом при полной нагрузке достигать значения 100 °С и выше. Такие режимы «пассивного» термоциклирования предъявляют высокие требования к конструкции всей электронной системы. Она должна надежно работать в условиях постоянных вибрационных и ударных нагрузок, не прекращающихся в течение всего срока службы транспортного средства.

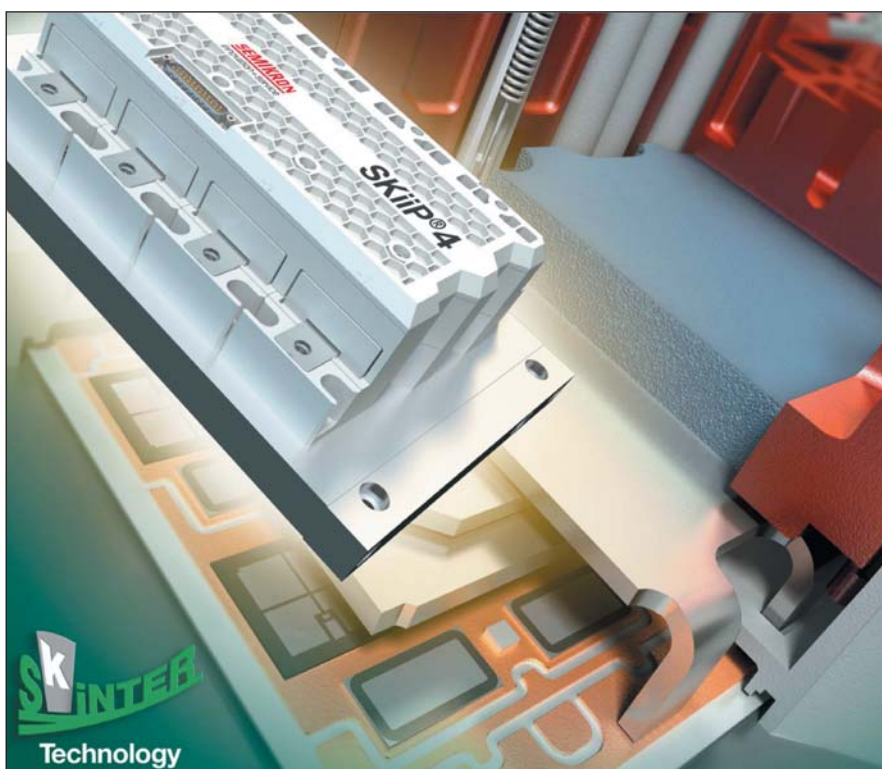
Все приведенные выше требования должны быть учтены при разработке тяговых инверторов на базе IGBT-модулей — «рабочей лошади» силовой электроники. Одним из самых сложных вопросов проектирования тягового привода является обеспечение высокой удельной мощности и стойкости к термоциклированию при воздействии знакопеременных температур окружающей среды.

Интеллектуальные силовые модули (IPM)

Особенностям электронных компонентов, предназначенных для эксплуатации на транспорте, посвящено достаточно много публикаций [1, 2]. Выпускаемые в настоящее время силовые ключи можно условно разделить по принципиальному технологическому признаку: наличию или отсутствию базовой платы (baseplate). Базовая плата является несущим элементом конструкции стандартных модулей, с ее помощью производится крепление к радиатору. В так называемых «безбазовых» (baseless) силовых ключах керамическая изолирующая DBC-подложка устанавливается непосредственно на теплоотвод, а крепежные отверстия находятся в корпусе. Основные конструктивные особенности «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 чипами. Благодаря этому динамический тепловой импеданс стандартных силовых ключей в области постоянных времени 0,1–1 с несколько меньше, чем у «безбазовых» компонентов. Модули стандартной конструкции широко используются в различных устройствах, работающих при постоянных или слабо меняющихся выходных токах.

Однако именно паяное соединение базовой платы является основным источником отказов в случае, когда нагрузка циклически меняется в широких пределах, что характерно для транспортного привода. Причина этого — разность коэффициентов теплового расширения (КТР или СТЕ — Coefficient of Thermal Expansion) сопрягающихся элементов:



SK
INTEK
Technology

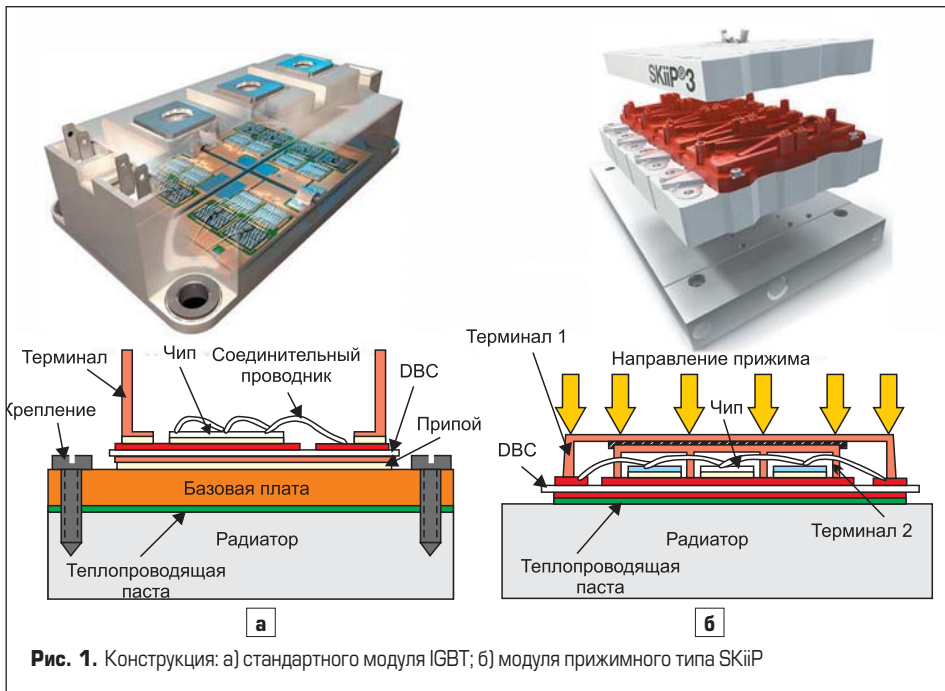


Рис. 1. Конструкция: а) стандартного модуля IGBT; б) модуля прижимного типа SKiiP

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 контактных слоев.

Наибольшую площадь имеет соединение базовой платы и керамической DBC-подложки (рис. 1а), поэтому повреждение вследствие усталости паяного соединения 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.

Ряд производителей (например, Infineon) решают данную проблему, используя в модулях, предназначенных для транспортных применений, композитные материалы (AlSiC или CuMo), которые лучше согласованы с керамикой по КТР. Однако недостатком композитов является худшая теплопроводность и более высокая стоимость.

Использование даже специализированных модулей требует больших временных затрат на разработку и испытания привода. Конструктор должен выбрать подходящий драйвер, радиатор, рассчитать систему охлаждения. Именно поэтому на рынке транспортных электроприводов растет популярность компонентов высокой степени интеграции, к которым относятся интеллектуальные силовые ключи (IPM). Примером подобного законченного решения является семейство модулей SKiiP, содержащих силовой каскад (полумост, однофазный или 3-фазный мост), драйвер затворов, источник питания, датчики тока и температуры, а также воздушный или жидкостный радиатор [3].

В конструкции модулей SKiiP воплотился более чем 20-летний опыт компании Semikron по разработке компонентов прижимного типа. Данная технология позволяет полностью решить проблему, связанную с разрушением соединительного слоя медного основания и керамической подложки. На рис. 1б показана структура модуля прижимной конструкции: базовая плата в этом случае отсутствует, а керамическая DBC-подложка с кристаллами IGBT и диодами устанавливается непосредственно на теплоотвод. Специальная пластиковая рамка создает давление в местах наибольшего локального тепловыделения, обеспечивая равномерный отвод тепла на радиатор.

При прижимном 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 в несколько раз 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, для компонентов прижимного типа, отличающихся более высокой равномерностью и плоскостью керамического основания, — 20–60 мкм.

Следующим по частоте отказов соединением является паяный слой между кремниевыми чипами и керамической DBC-платой. Кремний гораздо лучше, чем медь, согласован с керамикой по КТР, однако, как показывают испытания, именно отслоение кристаллов от изолирующей подложки является основной причиной выхода из строя модулей прижимного типа. Решить данную проблему позволила технология низкотемпературного

спекания (low temperature sintering technology), впервые в мире примененная Semikron при разработке интеллектуального модуля привода электромобиля SKAI. Суть данного метода в соединении кремниевых чипов с подложкой посредством спекания порошка из наночастиц серебра под высоким давлением. Модернизированный производственный процесс использован при производстве новых поколений модулей SKiM63/93 и SKiiP 4.

Более 10 лет известная чешская компания ŠKODA ELECTRIC занимается производством трамваев, троллейбусов и вагонов метро. Все эти транспортные средства комплектуются асинхронными приводами собственной разработки, силовая часть которых создана на базе модулей SKiiP 17 класса. Опыт эксплуатации подтвердил высокие мощностные характеристики и хорошую устойчивость силовых ключей данного класса к климатическим, механическим воздействиям и термоциклированию. В преобразователях трамваев и троллейбусов ŠKODA используется воздушное охлаждение, приводы поездов метро охлаждаются жидкостью, что особенно важно в режиме электродинамического торможения. Подобный способ отвода тепла, обеспечивающий минимальное значение теплового сопротивления, позволяет максимально полно использовать нагрузочные характеристики SKiiP. Датчики температуры и тока, интегрированные в состав SKiiP, используются для защиты от перегрузок, а также для диагностики и формирования управляющих сигналов центрального процессора.

Экономическая эффективность, надежность и срок службы



Рис. 2. Троллейбусы ŠKODA в Праге

В настоящее время инверторы на базе IGBT используются практически во всех асинхронных приводах, независимо от назначения. Следует отметить, что любое электронное устройство для городского электротранспорта должно быть не только надежным, но и недорогим, ценовое давление рынка сейчас ощущается всеми производителями. Начиная новый проект, разработчику следует проанализировать все преимущества, которые обеспечивает использование интеллектуальных силовых модулей по сравнению со стандартными компонентами.

Определяющими факторами для выбора элементной базы являются экономическая



Рис. 3. Трамваи ŠKODA ForCity моделей 15T и 14T (дизайн Porsche)

эффективность, надежность и срок службы конечного изделия. Для транспортного привода не меньшее значение имеет стойкость к термодиклированию. По мнению специалистов компании ŠKODA ELECTRIC, силовые ключи серии SKiiP представляют собой в данном случае оптимальное решение. Каждый год ŠKODA производит на базе модулей SKiiP более 300 преобразователей для городского электро-транспорта (рис. 2), характеристики которых удовлетворяют самым жестким требованиям современных европейских стандартов.

Модули IPM SKiiP использованы и в новейших разработках ŠKODA, таких как низкопольный трамвай с вращающимися тележками ForCity 15T (рис. 3).

Трамвай модели 15T снабжен четырьмя вращающимися тяговыми тележками с 16 синхронными низкоскоростными двигателями с постоянными магнитами. Каждый из моторов независимо управляется от инвертора напряжения. Тяговое электрооборудование одной тележки вместе с изолированным тормозным резистором расположено в контейнере на крыше трамвая (рис. 4). Силовые преобразователи работают на частоте 5 кГц в режиме ШИМ-модуляции. С учетом ограниченного пространства контейнера и требований, предъявляемых к приводу синхронного двигателя с постоянными магнитами, такое



Рис. 4. Контейнер тягового инвертора с модулями SKiiP IPM

решение, обеспечивающее эффективный отвод тепла при высокой удельной мощности, является оптимальным.

В своих приводах ŠKODA использует модули SKiiP с рабочим напряжением 1700 В, среднее напряжение на DC-шине инвертора составляет 1000 В, номинальный выходной ток — 500 А. Ток тормозного каскада и входного ключа, предназначенного для защиты инвертора от сброса энергии при КЗ сети, в режиме рекуперации достигает 1000 А.

Дизайн звена постоянного тока инвертора обеспечивает сверхнизкое значение расцепленной индуктивности, что позволяет свести к минимуму коммутационные перенапряжения и снизить ударные нагрузки в режиме отключения тока короткого замыкания. Расположение основных элементов схемы обеспечивает удобный доступ при сборке и простоту сервисного обслуживания. Готовые изделия подвергаются различного вида тестам, относящимся к самым жестким группам по нагрузочным параметрам, климатическим и механическим воздействиям. В 2009 г. ŠKODA заключила контракт на поставку более чем 1000 готовых приводов (4000 инверторов SKiiP) для трамваев семейства ForCity.

В настоящее время ŠKODA ELECTRIC занимается разработкой нескольких новых типов преобразователей, в том числе тягового привода для вагонов метро в Санкт-Петербурге. Особенностью данного проекта является режим электродинамического торможения, в котором мощность конвертора временно достигает значения 1 МВт. Работа привода поездов метро отличается высокими циклическими нагрузками, поэтому стойкость к термодиклированию является одним из ключевых требований к силовым модулям. На этапе разработки режимы термодиклирования тщательно рассчитываются и моделируются, готовый привод подвергается ускоренным тестам с большими перепадами температуры в пассивном (изменение внешней температуры) и активном (изменение тока нагрузки) режиме. Важно отметить, что данные виды испытаний являются обязательными для модулей SKiiP на предприятии-изготовителе

(Semikron), что гарантирует высокую надежность и повышенный срок службы готовых изделий.

Силовые ключи SKiiP были выбраны для проекта новейшего гибридного автобуса с энергетической установкой на водородном топливе. В настоящее время начались ходовые испытания этого автобуса, который скоро будет представлен на специализированных выставках. Еще одна новая разработка ŠKODA ELECTRIC — источник питания собственных нужд для железнодорожного транспорта: электровоза и электропоезда (EMU), в которых также использованы силовые ключи семейства SKiiP.

SKiiP IPM — 100%-ное тестирование всей системы

Как было указано выше, в процессе производства на заводе компании Semikron 100% модулей SKiiP проходит полный цикл испытаний, включая специальные тесты, ориентированные на транспортные применения. Поскольку схема SKiiP содержит силовой каскад, плату управления, датчики и систему охлаждения, данное тестирование практически полностью подтверждает характеристики надежности готового изделия. В том случае, когда проектировщик использует набор дискретных компонентов (силовые модули, драйверы) разных производителей, задача обеспечения и тестирования надежности привода в целом лежит на нем. Таким образом, применение силовых ключей SKiiP помогает сэкономить средства, необходимые на разработку, производство и испытания, что способствует повышению экономических показателей изделия.

По желанию заказчика Semikron проводит специальные тесты, в ходе которых производится проверка надежности модулей SKiiP в реальной инверторной схеме при полной нагрузке. Основной целью таких испытаний является определение ключевых причин ранних отказов и их устранение. В течение 2 ч модули SKiiP подвергаются 2 циклам воздействий с предельной нагрузкой при максимальном рабочем напряжении на DC-шине и повышенной температуре охлаждающей жидкости (80 °C). Перегрев силовых кристаллов при этом составляет 140 °C, что обеспечивает высокий термомеханический стресс для всей конструкции силового ключа. Наибольшее тепловое воздействие обеспечивается при максимальной плотности мощности, когда температура тосола достигает 105 °C, а чипы IGBT прогреваются выше 150 °C.

В 2009 г. начался выпуск новой, 4-й генерации SKiiP. По своим токовым характеристикам модули SKiiP 4 более чем на 30% превосходят компоненты 3 поколения в аналогичном конструктиве и являются на сегодняшний день самыми мощными интеллектуальными ключами в мире. Это достигнуто за счет применения новейших технологий чипов IGBT (Trench 4), диодов (CAL 4) и модификации прижимной конструкции. Применение SKiiP 4 позволяет созда-

вать преобразователи с еще большей удельной мощностью и меньшей удельной стоимостью (за 1 кВт или 1 А). Кроме того, семейство пополнено 6-элементным модулем с номинальным током 3600 А – SKiIP 3614 GB12E4.

В драйвере SKiIP впервые использован цифровой способ передачи информации по дифференциальному каналу, реализована функция «интеллектуальной защиты», добавлен диагностический канал с CAN-интерфейсом [4]. Основные характеристики SKiIP 4 в сравнении с модулями 3 поколения представлены в таблице.

Заключение

Компания ŠKODA ELECTRIC, головной офис которой расположен в г. Пльзень (Чехия), является мировым производителем электрооборудования для железнодорожного подвижного состава и городского электротранспорта. Фирма предлагает широкий класс преобразователей мощностью от 100 кВт до 6,5 МВт для транспортных применений. Выпускаемые компанией электровозы одни из самых мощных в мире.

Совместная работа ŠKODA и Semikron, продолжающаяся более 10 лет, является примером успешного и плодотворного сотрудничества

Таблица. Основные характеристики модулей SKiIP 3 и 4 поколения

Параметр	SKiIP 3	SKiIP 4
Номинальный ток, I_c (при $T_s = 25^\circ\text{C}$), А	До 2400	До 3600
Рабочее напряжение, В	1200 и 1700	1200 и 1700
Конфигурация схемы	Полумост (GB), 1-фазный (GH) и 3-фазный мост (GD)	Полумост (GB)
Тип драйвера	Аналоговый	Цифровой
Датчики	Выходной ток, температура	Выходной ток, температура, напряжение DC-шины
Система охлаждения	Воздушная, жидкостная	Воздушная, жидкостная

производителя элементной базы и разработчика готовых транспортных приводов. Подобная кооперация позволяет оптимально выбирать силовые ключи, в минимальные сроки проводить разработку и испытания, оперативно реагировать на возникающие проблемы. По мнению специалистов фирмы ŠKODA, максимально заинтересованных в высокой экономической и технической эффективности готовых изделий, модули IPM SKiIP являются оптимальным выбором для производства транспортных и общепромышленных приводов высокой мощности, преобразователей для возобновляемых источников энергии, а также промышленного лифтового оборудования.

Литература

1. Колпаков А. Оптимизация тепловых параметров силовых модулей для транспортных применений // Силовая электроника 2008. №1.
2. Колпаков А. Новые модули для транспорта SKiM 63/93 // Силовая электроника 2007. №4.
3. Колпаков А. SKiIP против IPM или Сколько интеллекта нужно модулю? // Электронные компоненты 2004. №9, 10.
4. Колпаков А. Сверхмощный интеллектуальный силовой модуль SKiIP 4 // Силовая электроника 2009. №4.