

SKAI — интеллектуальный привод XXI века

Требования автомобильной индустрии становятся все более жесткими, для их выполнения необходимы внедрение новых технологий, совершенствование производственных процессов и ужесточение контроля параметров всех элементов системы. Это касается самого широкого диапазона применений — от гибридо- и электромобилей, сельскохозяйственных и строительных машин до судовых приводов.

Разработка электронных блоков для транспортного и морского применения более всего стимулирует производителей элементной базы к поиску новых решений. В большинстве случаев очень сложно приспособить традиционные технологии производства силовых модулей к условиям эксплуатации транспортной электроники. Проблемы, связанные с работой тягового электропривода, невозможно решить без использования новых поколений полупроводниковых чипов и инновационных материалов, а также методов корпусирования.

Клаус Бакхаус
(Klaus Backhaus)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

SKAI: общие положения, системная архитектура

Применение электрических приводов в общественном транспорте позволяет повысить эффективность использования энергии, уменьшить эксплуатационные затраты, исключить загрязнение окружающей среды. Однако условия эксплуатации

на транспорте создают серьезные проблемы для обеспечения долговременной надежности силового электронного оборудования. Например, общее время работы общественного автобуса может составлять 50 тыс. ч в течение 10-летнего срока службы. Как правило, электродвигатели и генераторы переменного тока сохраняют работоспособность во время всего ресурсного периода. Однако для аккумуляла-

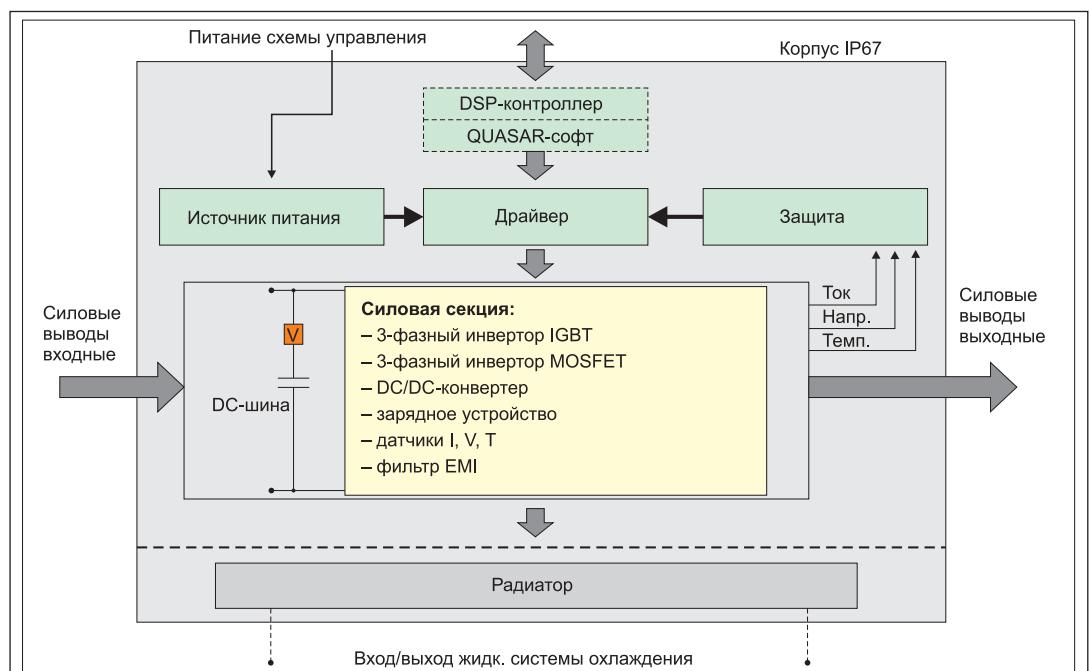


Рис. 1. Системная архитектура SKAI

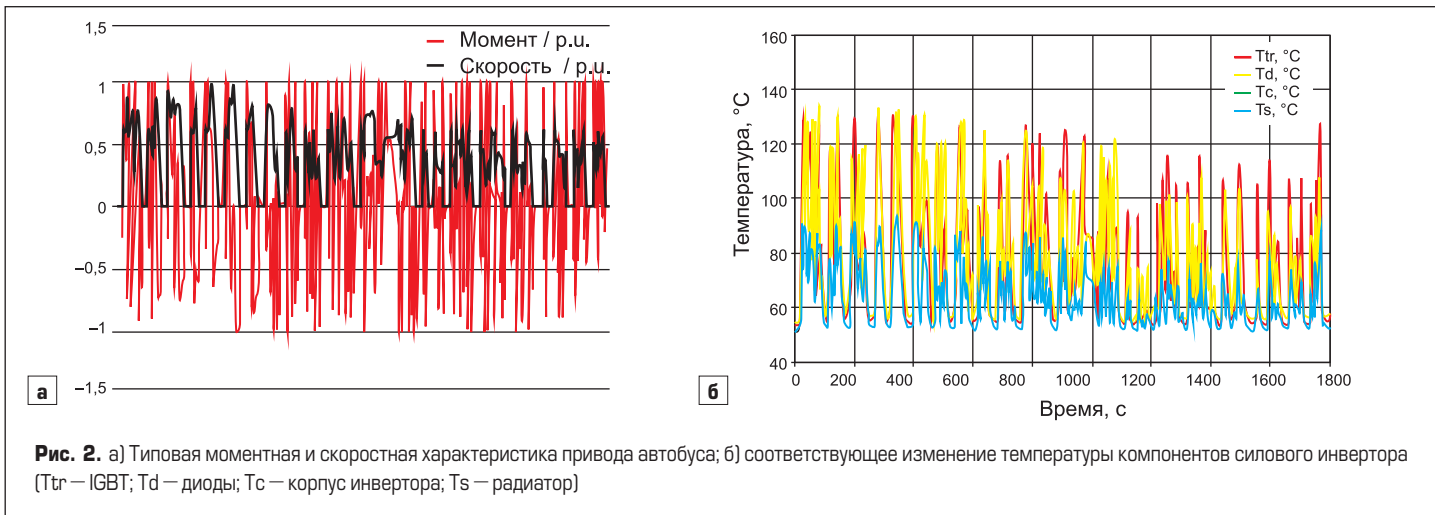


Рис. 2. а) Типовая моментная и скоростная характеристика привода автобуса; б) соответствующее изменение температуры компонентов силового инвертора (Ttr – IGBT; Td – диоды; Tc – корпус инвертора; Ts – радиатор)

торов и элементов силовой электроники это становится серьезной проблемой, связанной, прежде всего, с развитием усталостных процессов.

Благодаря внедрению ряда новых технологий, в настоящее время задача увеличения количества циклов «заряд-разряд» аккумуляторных батарей в значительной степени решена. Целью производителей компонентов транспортной электроники является создание необслуживаемых силовых модулей, способных сохранять свои параметры в пределах допусков до конца службы машины. Сложность решения такой задачи связана с увеличением ресурса транспортных средств и ужесточением требований по механическим и климатическим воздействиям.

Самой большой проблемой является поддержание необходимых электрических характеристик привода с учетом изменения температуры и скорости потока охлаждающей жидкости, температуры окружающей среды, напряжения батареи, особенностей индивидуального стиля вождения, дорожной обстановки и маршрута. Чтобы исключить накопление критической усталости в силовых полупроводниковых приборах, нужно проводить мониторинг количества циклов нагрузки и контроль соответствующего изменения температуры кристаллов в течение каждого рабочего цикла.

В интеллектуальных модулях привода SKAI 2 компании SEMIKRON использовано программное обеспечение (ПО) QUASAR, позволяющее проводить мониторинг температуры полупроводниковых кристаллов в режиме реального времени (рис. 1). Это помогает выбирать режимы работы инвертора с учетом усталостных эффектов и параметров термодублирования, а также адаптировать алгоритмы управления для сложных условий эксплуатации. В зависимости от настройки ПО можно ограничить перегрев кристаллов путем снижения потерь мощности, что обеспечивается снижением выходного тока или частоты коммутации при перегрузке. При этом могут несколько ухудшаться ходовые характеристики транспортного средства, но, что более важно, сохранится его работоспособность.

Реализация адаптивного программного обеспечения для управления электроприводом обеспечивает его надежную эксплуатацию и позволяет сохранить основные параметры в течение заданного срока службы. Чтобы выбрать оптимальные алгоритмы ПО, нужно непрерывно анализировать рабочие режимы, например постоянно контролировать нагрузочные характеристики в течение всего ежедневного маршрута городского транспорта. На рис. 2а показан типовой график изменения момента и скорости двигателя привода автобуса в процессе его эксплуатации.

На рис. 2б приведены соответствующие кривые изменения температуры элементов инвертора, рассчитанные для типовых условий применения, к которым относятся температура и скорость потока охлаждающей жидкости, а также состояние окружающей среды. Полученные данные дают возможность достаточно точно спрогнозировать срок службы инвертора и определить допустимые пределы перегрева кристаллов. При этом работа привода в наихудших условиях, соответствующих нагрузочному профилю, будет осуществляться без ущерба для ресурсных показателей. Таким образом, ин-

теллектуальное управление, учитывающее зависимость срока службы от параметров термоцикла, позволяет значительно повысить надежность привода.

Компоненты семейства SKAI 2 демонстрируют рекордные значения плотности мощности (20 кВт·А/л) и эффективности преобразования (более 98%). Высокое значение КПД инвертора способствует увеличению пробега транспортного средства и улучшению экономических показателей. Кроме того, при этом снижается нагрузка на тяговые батареи и, следовательно, продлевается их ресурс.

Усилия специалистов SEMIKRON направлены на расширение диапазона рабочих температур, улучшение электромагнитной совместимости, снижение уровня потерь, достижение наилучших массо-габаритных показателей. Система SKAI 2 имеет высший уровень интеграции: в одном корпусе находятся силовой каскад, звено постоянного тока, устройство защиты и мониторинга, сигнальный процессор и фильтр ЕМI (рис. 3). В зависимости от напряжения питания и области применения инвертор строится на низковольтных MOSFET-транзисторах или IGBT с рабочим напряжением 600 и 1200 В.

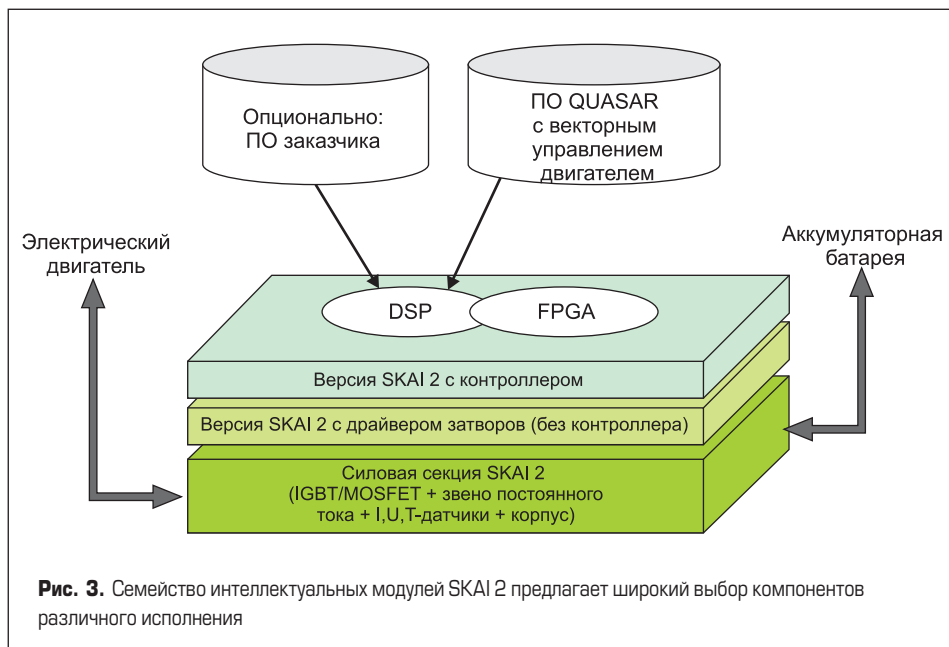
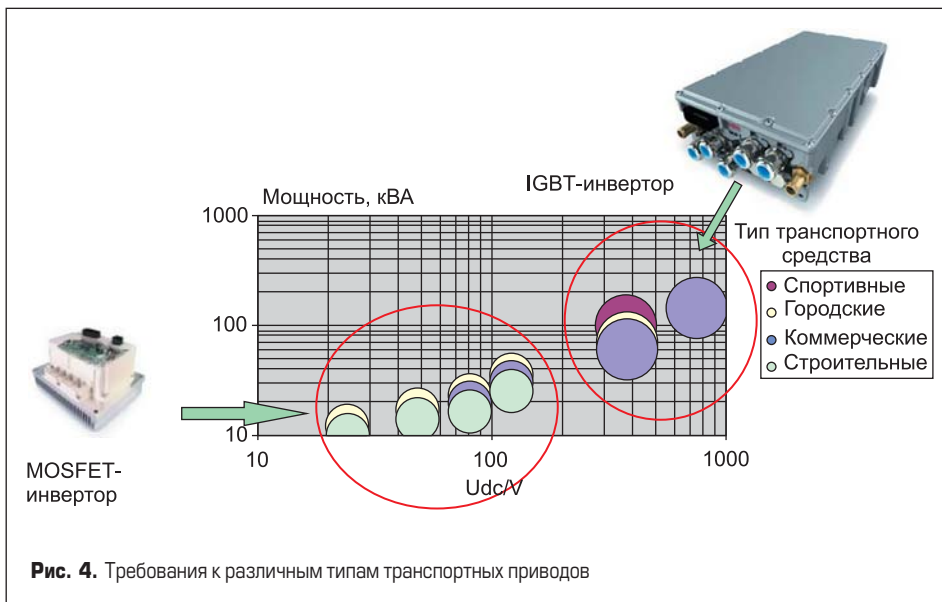


Рис. 3. Семейство интеллектуальных модулей SKAI 2 предлагает широкий выбор компонентов различного исполнения



На рис. 4 представлены классифицированные требования к транспортному приводу в зависимости от напряжения питания, которое, в свою очередь, определяется типом накопителя энергии. Размер «шариков» отражает количество различных применений для определенного рынка в соответствующем диапазоне питающих напряжений. Низковольтные версии (напряжение DC-шины 12–120 В) предназначены для устройств с батарейным питанием, в основном это технологический транспорт (например, вилочные погрузчики). Тенденцией последних лет в отношении гибридных и электрических автомобилей является повышение напряжения DC-шины до 750–900 В для снижения токовой нагрузки.

Как видно из рис. 4, большинство приводных задач могут быть решены с помощью двух инверторных платформ SKAI: низковольтной LV на базе MOSFET (рабочее напряжение 100, 150 и 200 В) и высоковольтной HV на базе IGBT-транзисторов (600 и 1200 В). В основе системы лежит силовая секция, содержащая полупроводниковые ключи, конденсаторы звена постоянного тока, а также датчики тока (I), напряжения (V) и температуры (T). Кроме силового каскада, модули SKAI в базовом варианте (версия D) содержат драйвер затворов и интерфейс для подключения внешнего контроллера. Версия D предназначена для «продвинутых» пользователей, имеющих собственную плату управления и ПО. Стандартный интерфейс обеспечивает управление силовыми полупроводниковыми приборами и получение изолированных аналоговых сигналов с датчиков I , V , T .

Более высокую степень системной интеграции предоставляет вариант SKAI 2 с встроенным DSP-контроллером. В этом случае пользователь получает возможность реализовать свое программное обеспечение. Модуль SKAI 2 также может поставляться с ПО QUASAR, адаптированным для различных типов электродвигателей или генераторов и обеспечивающим надежное и эффективное управление двигателем в широком диапазоне режимов, включая ослабление поля.

ПО QUASAR предназначено для управления трехфазными бесколлекторными двигателями постоянного тока (BLDC), синхронными электрическими машинами с встроенными и поверхностными постоянными магнитами, а также асинхронными электродвигателями. Программный пакет разработан в соответствии с MISRA-C стандартом программного обеспечения на языке C, выпущенным ассоциацией MISRA (Motor Industry Software Reliability Association) и нацеленным на повышение безопасности и надежности программ для встраиваемых систем.

Алгоритмы QUASAR обеспечивают защиту силовых полупроводниковых ключей от динамических перегрузок. При обнаружении аварийного состояния привод плавно снижает выходную мощность до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние, что гарантирует сохранение эксплуатационных характеристик в течение длительного срока службы.

Чтобы оптимизировать экономические показатели системы, ее целесообразно масштабировать по напряжению питания и по выходной мощности. Например, в приводе вилочных погрузчиков, для которых предназначена версия SKAI 2LV, используются аккумуляторные батареи с напряжением от 24–48 В до 80–120 В. Электрическому и гибриднему транспорту нужны приводы, работающие от стандартного аккумулятора напряжением 12 В (например, система старт-стоп), а также от шин с 48 В (так называемые «микригибриды») и с 150–300 В (гибридные и 100%-ные электрические приводы легкового автомобиля). Для грузового и коммерческого транспорта, а также для сельскохозяйственной техники, имеющей гораздо более мощную трансмиссию, необходим модуль привода, имеющего напряжение питания 600–750 В. Согласование шкалы мощностей с уровнем напряжения DC-шины позволяет ограничить предельное значение выходного тока и четко определить параметры силовых разъемов и подводных кабелей.

Семейство компонентов SKAI 2 предназначено для широкого круга применения,

который условно можно разделить на три сегмента.

- Сегмент 1: 10–20 кВт

Можно свести к минимуму требования к изоляции, когда рабочее напряжение батареи будет ниже 60 В. Преобразователи SKAI 2LV на основе низковольтных MOSFET способны управлять двигателями мощностью до 20 кВт. Блоки имеют герметичный корпус IP67, защищающий электронные компоненты привода от воздействия окружающей среды. При тщательном выборе алгоритмов управления электроприводом его общая эффективность может быть до 10 раз выше, чем у бензиновых двигателей. Низкоскоростные синхронные машины обеспечивают полный момент с нулевых скоростей и поддерживают его в широком диапазоне оборотов. Привод может быть запущен в течение 1 с даже после длительного простоя, а герметичный корпус исключает риск загрязнения, возгорания или взрыва.

- Сегмент 2: 20–40 кВт.

Применение 200-В MOSFET в преобразователях SKAI 2LV является оптимальным при напряжении DC-шины от 60 до 120 В. Но при этом уже необходимо обеспечить надежную защиту от касания токоведущих частей. Экономические показатели подобных систем во многом зависят от цены батареи. Однако динамичное развитие технологий автомобильных аккумуляторов и увеличение объемов выпуска ведут к тому, что инвестиции на разработку «чистого» электропривода в данном диапазоне мощностей могут окупиться достаточно быстро.

- Сегмент 3: 40–200 кВт.

Для таких мощностей необходимо более высокое напряжение питания, чем в предыдущем случае. Как видно из рис. 4, диапазон до 120 кВт может быть обеспечен применением 600-В IGBT, для больших мощностей использованы модули 12-го класса.

В гибридных и электрических транспортных средствах, а также в судовой технике есть, кроме тяговых двигателей, еще достаточно много мощных вспомогательных систем, нуждающихся в трехфазных источниках питания. Модули SKAI 2HV могут быть использованы и для этой цели, а благодаря высокой плотности мощности (до 20 кВт·А/л) их применение позволяет сэкономить столь дефицитное рабочее пространство.

В данном сегменте мощностей «чистый» электрический привод пока что занимает небольшую нишу, поскольку современный путь развития транспорта ориентирован в основном на гибридизацию с использованием дизель-генераторов. Однако в течение ближайших 10 лет выбор 100%-ного электропривода с питанием, например, от топливных ячеек может стать экономически оправданным для многих областей применения, включая морские.

При мощности нагрузки свыше 200 кВт единичные модули SKAI 2HV можно соединять параллельно, хотя более надежным решением является использование секционных обмоток моторов или генераторов и их подключение

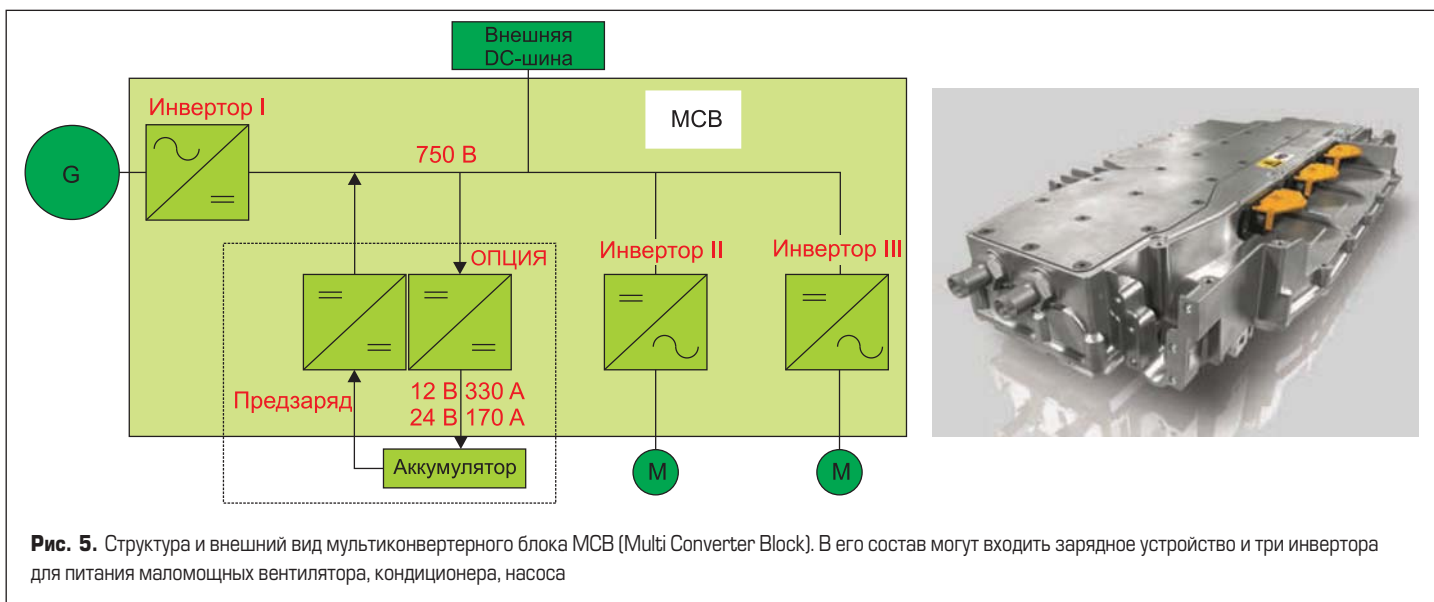


Рис. 5. Структура и внешний вид мультиконвертерного блока MCB (Multi Converter Block). В его состав могут входить зарядное устройство и три инвертора для питания маломощных вентилятора, кондиционера, насоса

к отдельным инверторам. Этот подход также обеспечивает мажоритарность системы, что позволяет ей сохранять работоспособность с пониженной выходной мощностью в случае единичных отказов.

Блоки SKAI 2HV предназначены для работы в жестких климатических и механических условиях. Их литой корпус из алюминиевого сплава способен выдержать воздействие морской воды и вибраций с ускорением до 10g. Все компоненты семейства SKAI 2 проходят квалификационные испытания в соответствии с транспортными стандартами ISO 16750-F, B-N-K-D-(Z)-IP(6K7; 6K9K).

Изначально разработанный для применения в системе питания гибридного трактора, так называемый «мультиконвертерный блок» (МСВ) может быть использован для работы с любыми устройствами мощностью до 100 кВт. На рис. 5 представлена блок-схема модуля MCB, содержащего три трехфазных инвертора (1×35 кВт, 2×20 кВт), предназначенных для управления вентиляторами, кондиционерами, насосами и т. д. Кроме того, устройство может включать однонаправленный DC/DC-преобразователь (4,5 кВт) с выходным напряжением 12 или 24 В. Как и все компоненты семейства SKAI 2, блок MCB оснащен CAN-шиной и предназначен для эксплуатации в предельно тяжелых условиях. Он заключен в литой корпус IP67, выдерживающий давление мощной водной струи в соответствии со стандартом IP6K9K.

Инновационные технологии

Компания SEMIKRON ставит своей задачей поиск наилучшего соотношения плотности, мощности, габаритов, тепловых режимов и надежности. Для создания безотказных электронных и мехатронных узлов следует использовать результаты анализа эффектов старения и механизмов отказа компонентов предыдущих поколений. При этом нужно принимать во внимание не только экстремальные температуры вблизи места установки оборудования, но и параметры термоциклов,

во многом определяющие ресурс силовых электронных модулей.

При проектировании транспортного привода наряду с количеством и градиентом температурных циклов необходимо знать уровень механических нагрузок, влажности, запыленности и химически активных загрязнений. Общий срок службы с учетом влияния циклических изменений нагрузки может быть определен путем анализа профиля рассеиваемой мощности.

Надежность, мощностные характеристики и КПД силового преобразовательного устройства зависят от многих факторов. Чтобы достичь максимальной технической и экономической эффективности инвертора и обеспечить минимальные габариты и высокую надежность, необходимо использовать новейшие поколения полупроводниковых ключей, а также методы их корпусирования. Большинство традиционных, проверенных временем технологий оказываются непригодными для создания транспортного привода, удовлетворяющего современным стандартам.

Основной проблемой стандартных модулей является усталость паяных соединений, прогрессирующая в процессе 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 связей ускоряется.

Для борьбы с указанными явлениями SEMIKRON внедрил ряд инновационных технологий, позволяющих обеспечить жесткие требования автоиндустрии. Проблема разрушения паяных соединений полностью устранена в компонентах серии SKAI 2 благодаря использованию технологии прижимного контакта (SKiiP) и низкотемпературного спекания (Sintering Technology). Слой спеченного серебряного нанопорошка обладает гораздо более высокой стойкостью к термоциклированию,

чем любой из традиционных припоев, а его температура плавления в 6 раз выше. Кроме того, серебряное соединение имеет более высокие эластичность и теплопроводность, а также отличается однородностью и отсутствием лакун.

Еще одной проблемой, связанной с разницей КТР, является отслоение алюминиевых выводов чипов, являющееся результатом термомеханических стрессов при больших градиентах температуры. Для разрешения данной проблемы применяется ряд технологических приемов, включающих оптимизацию геометрии контактных зон и отжиг для снижения напряжения при сварке. В силовой секции SKAI 2HV использован модуль SKiM 93 [4]. В нем, впервые в мире, полностью отсутствуют паяные соединения — кристаллы установлены методом низкотемпературного спекания, а электрические соединения обеспечиваются только путем прижима.

Опыт эксплуатации

В предыдущих публикациях, посвященных технологии SKAI, рассказано об успешном опыте применения компонентов семейства в гибридном тракторе ЭТ-300ЦП Минского тракторного завода и гибридном автобусе, изготовленном на ЛиАЗе [5, 6].

В журнале Electric & Hybrid Marine Technology International (Sun Gods, 2013, April, p. 48–52) опубликована статья о катамаране Tûranor PlanetSolar с электрическим приводом, получающим энергию от солнечных батарей (рис. 6). Катамаран Tûranor в период с сентября 2010 по май 2012 г. совершил кругосветное путешествие, пройдя более 60 тыс. км за 584 дня. В 2013 г. Tûranor пересек Атлантический океан за 22 дня, побив свой собственный мировой рекорд, установленный в 2010 г., когда ему понадобилось на четыре дня больше. В приводе катамарана использованы модули SKAI 2HV, которые действовали безупречно в течение всего путешествия. Опыт плавания показал, что, благодаря применению инновационных технологий силовой электроники и передовой



Рис. 6. Модуль SKAI 2HV использован в приводе «солнечного катамарана» Túrnapor, совершившего кругосветное путешествие



Рис. 7. Модуль «Стартер-генератор» является неотъемлемой частью гибридных автобусов и грузовиков, оснащенных системой «старт-стоп». Низковольтный блок SKAI 2LV на MOSFET-транзисторах с сопротивлением открытого канала 0,3 мОм

программной платформы QUASAR, блоки SKAI 2 прекрасно справились с работой и в морских условиях эксплуатации.

До настоящего времени не определены стандартные значения напряжения для мощных приводов электрических автобусов и грузовых автомобилей. Ситуация с мало-мощными преобразователями гораздо яснее. Например, считается, что при питании от шины напряжением 48 В обеспечивается

разумный баланс мощности, безопасности и стоимости системы. Причем очень важно определить необходимый уровень суммарной мощности потребляющих устройств, работающих в данном диапазоне, а также требования к их надежности. Это можно сделать на основе большого опыта эксплуатации погрузчиков и насосных агрегатов с мощностью привода 5–40 кВт, где используются системы переменного тока с питанием от аккумулятор-



Рис. 8. Gaussin Manuistique ATT V3 — тяжелый терминальный трейлер со 100%-ной электрической трансмиссией на базе интеллектуального модуля SKAI 2HV мощностью 250 кВт

ной батареи в 24–80 В, срок службы которых составляет свыше 20 тыс. ч.

В состав современных электрических транспортных средств с питанием от шины 48 В наряду с тяговым приводом входят несколько вспомогательных преобразователей, а также генератор или стартер-генератор (рис. 7). В автобусах и грузовиках данный мехатронный модуль является одним из самых ответственных узлов. С учетом срока службы (более 12 лет) и времени наработки (более 45 тыс. ч) условия работы блока стартер-генератор оказываются заметно жестче, чем, например, у привода погрузчика. Обеспечение длительного ресурса является серьезной задачей, причем даже с учетом небольшой мощности, потребляемой этим устройством в непрерывном режиме работы (типичное значение для генераторов автобусов и грузовиков — около 5 кВт). Термическое старение некоторых компонентов, таких как электролитические конденсаторы, ограничивает общий ресурс системы. Одним из способов его продления является снижение температуры, однако обеспечить достаточно эффективное охлаждение не всегда возможно.

Увеличение ресурсных показателей является не единственной проблемой при проектировании транспортной электроники. Предположим, что стартер-генератор осуществляет пуск и остановку каждую минуту. Это означает, что электронный модуль в течение срока службы должен выдержать около 2,7 млн циклов «старт/стоп» при высоких пиковых токах (до 900 А), продолжающихся менее 1 с. Подобные колебания нагрузки создают очень большие термомеханические напряжения для компонентов инвертора, в первую очередь для силовых ключей.

Модуль SKAI 2LV способен надежно работать в описанных условиях благодаря использованию кристаллов MOSFET с низким сопротивлением открытого канала. Например, в блоке с номинальным напряжением питания 48 В применены MOSFET-ключи с $R_{ds(on)} = 0,3$ мОм, что позволяет существенно снизить градиенты температуры при пиковых нагрузках. Технология SKiP обеспечивает не только высокую стойкость системы к воздействию термочиклов, но и минимальные значения распределенных индуктивностей силовых и сигнальных цепей, что необходимо для надежной работы при больших скоростях коммутации. Модули SKAI LV, рассчитанные на работу от батарей с напряжением 48–120 В, могут иметь как воздушное, так и жидкостное охлаждение.

В зависимости от исполнения в состав SKAI LV могут входить один или два силовых инвертора. Второй вариант предназначен для использования в вилочном погрузчике, где необходимо раздельное управление тяговым двигателем и приводом вилки.

Экономическая и техническая эффективность гибридизации коммерческого транспорта становится все более очевидной. В настоящее время в мощных контейнеровозах в качестве силовой установки используется дизельный двигатель. Ведущий мировой производитель тяжелых тягачей, компания Gaussin Manuistique, совместно со своим техническим отделом реши-

ла отказаться от традиционных подходов к проектированию подобных транспортных средств и разработать полностью электрический силовой привод для нового семейства терминальных трейлеров — Gaussin АТТ (Automotive Terminal Trailer) (рис. 8). Результатом явилось создание уникальной платформы, объединяющей в своем составе тягач и трейлер. При максимальной грузоподъемности, равной 60 т, контейнеровоз способен двигаться со скоростью 25 км/ч (максимальная скорость без нагрузки 40 км/ч). Трейлер может быть изготовлен в различных конфигурациях, предназначенных для перевозки стандартных контейнеров размером 6, 12 и 13,5 м.

Контейнеровоз Gaussin АТТ имеет привод на два колеса, что позволяет наиболее эффективно распределять массу основной нагрузки (контейнеры и блоки батарей) непосредственно между осями. Передняя, ведущая ось трейлера АТТ снабжена управляющей системой, включающей два независимых 8-полюсных синхронных мотора с постоянными магнитами, интегрированных в колеса для эффективной передачи момента без потери энергии. В результате этого тяговая установка способна развивать момент до 580 Н·м при максимальной частоте вращения 3400 об/мин. Эти уникальные показатели позволяют силовой установке поддерживать оптимальное соотношение момента и мощности при любой дорожной обстановке.

Модуль SKAI 2HV мощностью 250 кВт был выбран Gaussin Manugistique, поскольку он является законченной системой, отличающейся высокой плотностью мощности, надежностью, простотой масштабирования и адаптации к конкретному типу двигателя.

Блок сертифицирован на соответствие жестким европейским транспортным стандартам. Эффективность привода при питании от блока батарей с напряжением 750 В составляет около 95%.

Типовой рабочий цикл трейлера выглядит следующим образом. Он ожидает загрузки в очереди, затем принимает контейнеры массой до 60 т, перевозит их в зону складирования, разгружается и перемещается в начальную точку. Длительность цикла составляет около 15 мин, при его выполнении момент и скорость изменяются очень сильно. Это означает, что силовая часть инвертора испытывает мощные термомеханические стрессы. Конструкция SKAI 2HV разработана с учетом предельно высоких требований по стойкости к термодиклированию. Проект Gaussin АТТ является хорошим примером успешной кооперации ведущих производителей силовой элементной базы и программного обеспечения, ориентированной на конечного потребителя.

Заключение

Внедрение современных электроприводов на транспорте приводит к кардинальному улучшению энергоэффективности и экологических показателей, а также к уменьшению эксплуатационных расходов. Одной из основных задач является снижение начальных затрат на компоненты привода, для того чтобы добиться его окупаемости в течение приемлемого периода времени. В первую очередь это касается ключевых элементов электрической трансмиссии, к которым относятся накопители энергии, электродвигатель и силовой инвертор.

Разработка электронных преобразователей для применения на транспорте связана с большими трудностями, обусловленными жесткими условиями эксплуатации. Семейство модулей SKAI 2 создано в кооперации тремя известными компаниями: SEMIKRON (силовая секция), SKAItek (программное обеспечение QUASAR) и Drivetek (инжиниринговые услуги). Эффективная совместная работа этих партнеров, использование новейших технологий силовой электроники, а также выбор оптимальных алгоритмов управления для конкретных типов приводов обеспечивают пользователям полный набор инструментов, необходимых для проектирования транспортного привода.

Литература

1. Electrical and thermal optimization of an automotive power module family / A. Wintrich, P. Beckedahl, T. Wurm // APE, Paris/France, 2007.
2. Scheuermann U., Beckedahl P.: The Road to the Next Generation Power Module – 100% Solder Free Design // CIPS, Nürnberg/Germany, 2008.
3. Колпаков А. SKAI — технология компактных автоэлектронных систем // Силавая электроника. №3. 2011.
4. Колпаков А. Оптимизация характеристик силовых модулей для сложных условий эксплуатации // Силавая электроника. № 1. 2008.
5. Ньюман П. Новое поколение компактных модулей SKAI // Компоненты и технологии. № 9. 2010.
6. Флоренцев С. Опыт разработки и внедрения комплектного тягового электрооборудования электромеханических трансмиссий. УДК 621.333-235:629.