

Модули SKAI/SKADS — предельный уровень интеграции!

В январе 2000 года американское отделение фирмы SEMIKRON получило заказ министерства энергетики США на разработку интегрального силового модуля AIPM (Automotive Integrated Power Module) для автомобилей нового поколения, создаваемых в сотрудничестве с PNGV (PNGV — Partnership for a New Generation Vehicle). Организация PNGV образована тремя крупнейшими американскими автопроизводителями с целью разработки технологий, необходимых для создания гибридных транспортных средств, использующих для движения комбинированный тип двигателя — внутреннего сгорания и электрический, потребляющий не более 3 литров бензина на 100 км (75 миль на галлон по стандарту США). Перед SEMIKRON была поставлена задача — создать компактный мощный универсальный модуль инвертора, способный работать в силовых установках гибридомобилей, а также лифтов, погрузчиков, транспортеров и т. д. Первые варианты блоков именовались SKAI (SEMIKRON Automotive Inverter, позднее SEMIKRON Advanced Integration) [3]. Но поскольку область применения этих изделий оказалась чрезвычайно широкой, в окончательном виде некоторые версии приводных интеллектуальных модулей SEMIKRON получили название SKADS — SEMIKRON Advanced Drive System.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Компания SEMIKRON имеет огромный опыт разработки специализированных приводных блоков, предназначенных для электро-транспорта. На рисунке, приведенном в начале статьи, изображен автомобиль с электромотором, установивший рекорд скорости для данного класса транспортных средств — 514 км/ч. Результат был зафиксирован на соляном озере Бонневиль, расположенном в штате Юта, США. Электромотор электро-мобиля-рекордсмена оснащен приводом мощностью 375 кВт, собранным на модулях IGBT SEMITRANS SKM400GB124, управляемых драйверами SKHI22. Данный продукт — итог совместного труда специалистов исследовательского центра Университета Огайо и SEMIKRON. В настоящее время создатели машины проектируют следующую версию на основе новейших модулей SEMIX и драйверов SKYPER. Цель — поставить новый рекорд скорости 600 км/ч!

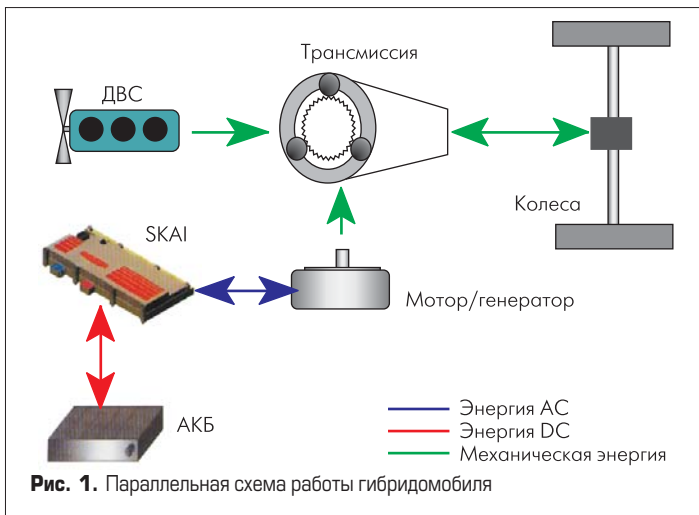
Блоки серии SKAI/SKADS представляют собой функционально законченные модули привода переменного тока, они содержат все компоненты, необходимые для управления 3-фазным электродвигателем электро- или гибридомобиля, и предназначены для широкого спектра приводных приложений мощностью 15...250 кВт, рассчитанных на питание от шины постоянного тока напряжением от 42 до 900 В.

Концепция гибридомобиля с параллельной силовой установкой, разрабатываемая сотрудничеством американских автопроизводителей, показана на рис. 1. По такой схеме создано большинство современных транспортных средств, применяющих комбинированный привод. Основным источником механической энергии в гибридомобиле служит двигатель внутреннего сгорания (ДВС), а электрическая энергия накапливается в аккумуляторной батарее (АКБ). При использовании параллельной, последовательной или других, более сложных, схем в автомобиле должен находиться узел, осуществляющий заряд АКБ и преобразование напряжения постоянного тока в напряжение, управляющее электродвигателем. Именно эту функцию выполняют модули SKAI. В зависимости от условий работы автомобиля нагрузка перераспределяется между ДВС и электроприводом, которые связаны единой трансмиссией, а потому такая схема и называется параллельной.

Функциональная схема и конструкция

Основные функциональные узлы SKAI/SKADS показаны на рис. 2. Модуль содержит силовой 3-фазный инвертор MOSFET или IGBT, звено посто-





янного тока (DC-шина с накопительными конденсаторами), датчики тока, температуры и напряжения шины, драйверы затворов, управляющий контроллер, CAN-интерфейс, DC/DC-конвертор для питания платы управления и систему охлаждения.

Алгоритмы функций, выполняемых электронными блоками модуля, оптимизированы для управления 3-фазными электродвигателями постоянного тока. Исключение избыточных функций, необходимых для работы приводов широкого применения, позволило упростить и удешевить электронную схему. Для управления использован DSP-процессор, связь с которым осуществляется с помощью CAN/IEE485-интерфейса. Главный процессор соединен со специализированным SKAI-контроллером, который получает информацию от датчиков напряжения, тока, температуры и положения, формирует 3-фазный ШИМ-сигнал и через драйвер приводит в действие 3-фазный силовой каскад.

Все маломощные каскады модуля, включая схему управления, защиты, мониторинга и связи с внешними устройствами, расположены на одной печатной плате (драйвер/контроллер на рис. 3). Плата содержит контроллер (TMS320LF2406/2407), изолированный драйвер затворов MOSFET/IGBT, изолированный источник питания и ряд вспомогательных элементов. Используемые в SKAI/SKADS драйверы осуществляют все виды защит, необходимые для данного применения: от перегрузки по току (over-current protection), перегрева (over-temperature protection), перенапряжения на шине питания (over-voltage protection) и падения сигнального напряжения (under-voltage protection).

Печатная плата закрепляется в крышке модуля, ее подключение к силовому каскаду происходит с помощью пружинных контактов — это фирменный элемент конструкции модулей SEMIKRON. Пружинные контакты расположены в отверстиях в прижимной плате. Специальная форма пружин и серебряное покрытие обеспечивают высокую стабильность контактного сопротивления при различных механических и электрических нагрузках, в том числе при работе с микроточками. Чтобы переходное сопротивление контактов оставалось низким и постоянным при изменении условий эксплуатации, плата

контроллера/драйвера имеет свою прижимную рамку, закрепляемую на основании модуля, как показано на рис. 3.

Прижимная плата обеспечивает надежный тепловой контакт теплопровода и керамической DVC-пластины с силовыми кристаллами. Между керамикой и радиатором находится слой теплопроводящей пасты, наносимой методом шелкографии (толщина слоя пасты не превышает 50 мкм). В модулях SKAI/SKADS может использоваться жидкостное (W в названии модуля) и принудительное воздушное (L в названии модуля) охлаждение.

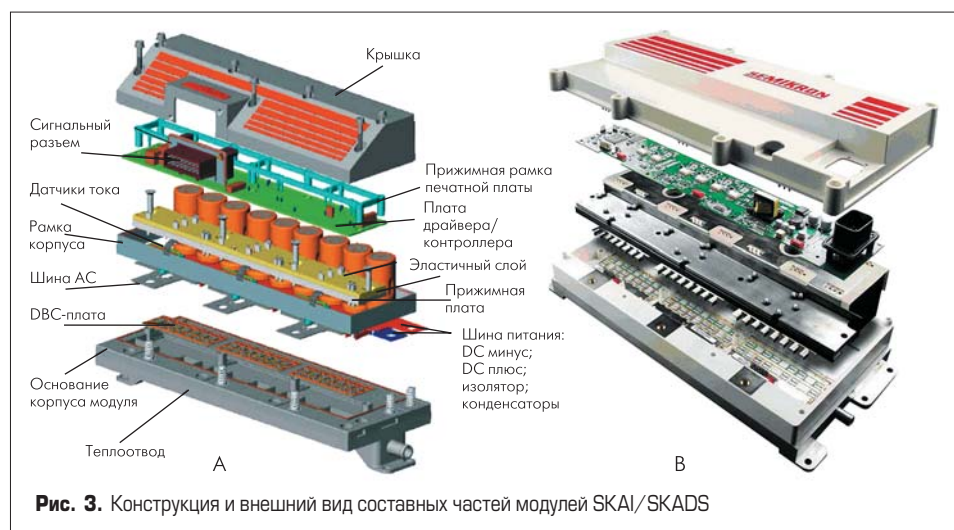
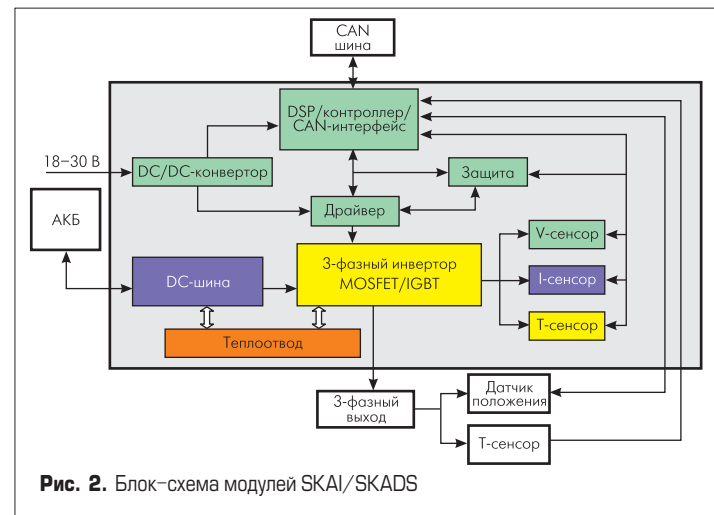
Жидкостная система охлаждения, как стандартная система автомобиля, является наиболее привлекательным способом отвода тепла автомобильного привода. Проблема состоит в том, что при нормальной эксплуатации температура тосола обычно превышает 100 °С. Для надежной работы силового привода в таких условиях необходимо, чтобы допустимая температура кристаллов силовых ключей была не ниже 175 °С, а материалы печатных плат и корпуса допускали нагрев до 150 °С. Применительно к автомобильному электроприводу под надежностью подразумевается безотказная работа в течение 15 лет, что соответствует примерно 150 тыс. км пробега. Всем указанным требованиям соответствуют модули SKAI/SKADS.

В основе конструкции заложена прижимная технология SKiIP, разработанная компанией SEMIKRON в 1992 году и многократно

подтвердившая отличные тепловые характеристики и высокую стойкость к термоциклированию. Таким образом обеспечивается высокая надежность модуля и хорошая временная стабильность параметров в жестких условиях транспортных применений. Исключение из конструкции модуля медного или композитного основания, имеющего паяное соединение с DVC-керамической платой, позволило решить проблемы, связанные с усталостными процессами паяного шва и рассогласованием коэффициентов теплового расширения керамики и меди.

Основная задача, решаемая при использовании технологии SKiIP, — получение хороших тепловых характеристик и высокой надежности при минимальных весогабаритных показателях. Прижимная конструкция модулей SKAI/SKADS имеет следующие основные особенности (см. рис. 4):

- DVC-плата (Direct Bonded Copper — керамическая пластина с медными шинами, нанесенными диффузионным методом) с силовыми кристаллами устанавливается непосредственно на теплосток;
- все конструктивные слои модуля соединяются с помощью прижима, паяные и сварные варианты исключены (пайка используется только для установки силовых чипов на DVC-плату);
- сигнальные связи силового модуля с устройством управления выполняются посредством пружинных контактов.



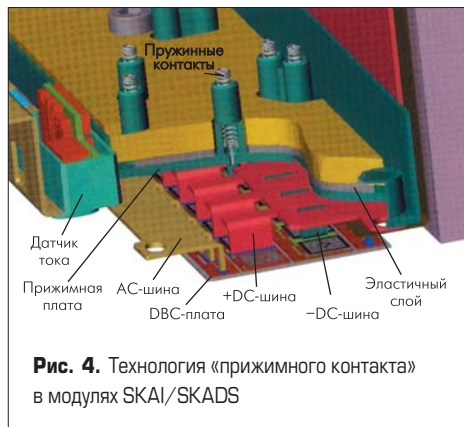


Рис. 4. Технология «прижимного контакта» в модулях SKAI/SKADS

Керамическая DBC-пластина с установленными на ней кристаллами силовых транзисторов прижимается к радиатору с помощью платы, осуществляющей давление на керамику в точках наибольшего локального перегрева (усилие прижима 153 кг/см^2). Такая конструкция позволяет заметно уменьшить величину теплового сопротивления «кристалл — теплосток» R_{thj} , в результате чего температура кристалла при данном значении рассеиваемой мощности оказывается ниже. В модулях SKAI/SKADS керамическая плата изготовлена из нитрида алюминия AlN , тепловые и механические характеристики которого намного лучше, чем у традиционного менее дорогого оксида алюминия Al_2O_3 . Кроме того, использование нитрида алюминия в модулях прижимной конструкции предоставляет возможность увеличить срок службы изделия почти в два раза.

Эластичная прокладка, состоящая из нескольких слоев пористой силиконовой резины, передает давление от жесткой прижимной платы к сопрягаемым элементам и обеспечи-

вает равномерность распределения давления. Крышка корпуса, имеющая стальную вставку, электрически соединяется с теплоотводом крепежными болтами и служит экраном, снижающим уровень наводок на плату драйвера.

В модуле прижимной конструкции отсутствуют паяные и сварные соединения (кроме соединения чипов с DBC-керамикой) — это исключает механические напряжения из-за рассогласования коэффициентов теплового сопротивления сопрягающихся материалов и усталостные процессы, которые наблюдаются в паяных сочленениях. Исследования показывают, что прижимная конструкция, используемая в модулях SEMIKRON, многократно повышает их надежность при испытаниях на термоциклирование.

Технология и конструкция

Проектирование мощных компактных устройств, оптимизация тепловых характеристик и обеспечение минимальных значений распределенных параметров немаловажны без компьютерного моделирования. Для успешного решения подобных задач необходим анализ плотности тока и распределения температуры в проводящих слоях и оценка распределенной индуктивности силовых шин. На каждом этапе разработки модулей SKAI/SKADS проводилось подобное моделирование, на рис. 5а представлена упрощенная модель, используемая для оценки значения плотности тока в шинах DBC-подложки, в силовых кристаллах и DC-шине. Рис. 5б демонстрирует плотность тока в различных точках конструкции при открытом транзисторе IGBT верхнего плеча.

На рис. 6 показано расположение на керамической подложке кристаллов транзисторов

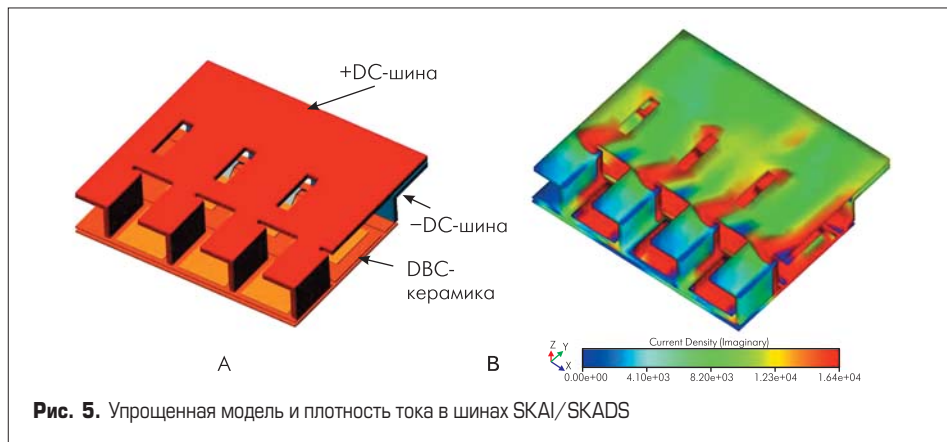


Рис. 5. Упрощенная модель и плотность тока в шинах SKAI/SKADS

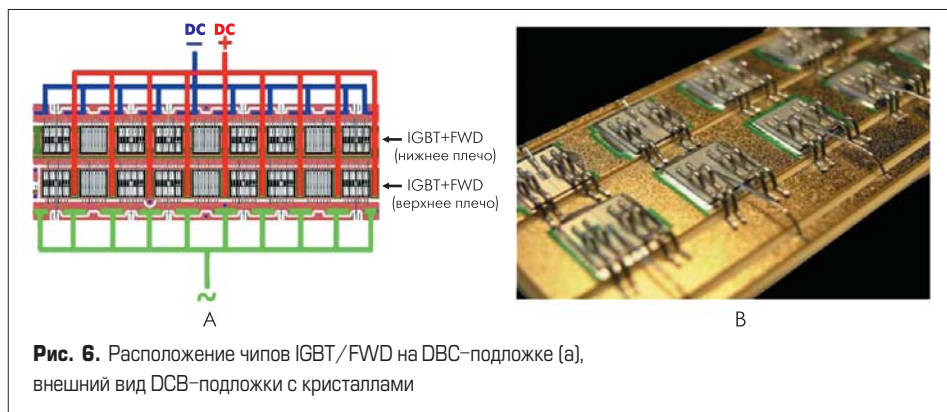


Рис. 6. Расположение чипов IGBT/FWD на DBC-подложке (а), внешний вид DBC-подложки с кристаллами

IGBT и антипараллельных диодов (FWD) высоковольтного модуля SKAI/SKADS, оптимизированное с точки зрения получения минимальной индуктивности шины и обеспечивающее так называемый принцип многоточечного доступа к DBC-плате. Реализованная в блоках SKAI/SKADS топология соединений обеспечивает минимальное расстояние между элементами коммутирующих цепей и наилучший динамический токовый баланс между параллельно соединенными кристаллами.

В результате тщательной проработки топологии соединений и компьютерного моделирования измеренное значение распределенной индуктивности звена постоянного тока низковольтных вариантов SKAI/SKADS не превышает 1 нГн для полумостового каскада с MOSFET-ключами и 4 нГн для всей цепи, включающей DC-шину ($+1 \text{ нГн}$) и банк конденсаторов ($+2 \text{ нГн}$). Поэтому уровень перенапряжений, возникающий при коммутации силового каскада, даже в предельных рабочих режимах не превышает безопасного значения (15 В).

Низковольтные модули SKAI/SKADS с MOSFET-ключами предназначены для применения в силовых установках транспортных средств с батарейным питанием. Они поддерживают ток нагрузки от 300 до $700 \text{ A}_{\text{RMS}}$, зависящий от напряжения питания и способа охлаждения. Транзисторы, применяемые в таких блоках, имеют рабочее напряжение 75 , 100 и 150 В . Они отличаются сверхнизкими потерями проводимости: сопротивление открытого канала R_{dson} не превышает $0,86 \text{ мОм}$ для версий с напряжением 75 В ; $1,14 \text{ мОм}$ — для версий с напряжением 100 В ; $2,09 \text{ мОм}$ — для модулей SKAI/SKADS, рассчитанных на 150 В . В блоках данного типа для обеспечения требуемого выходного тока используется до 7 чипов MOSFET, соединенных параллельно.

Эпюры, приведенные на рис. 7, позволяют косвенно оценить значение распределенной индуктивности шины низковольтного блока SKAI/SKADS по уровню перенапряжения при выключении MOSFET-транзистора. Ток выключения составляет 700 А , скорость спада тока — 7100 А/мкс . Полученное значение всплеска напряжения $\Delta V = L_B \times di/dt = 5,89 \text{ В}$ соответствует величине $L_B = 0,83 \text{ нГн}$. Расчетное значение L_B , полученное в процессе моделирования с помощью программы, достигает $0,9 \text{ нГн}$. Столь высокая степень достоверности подтверждает как корректность использован-

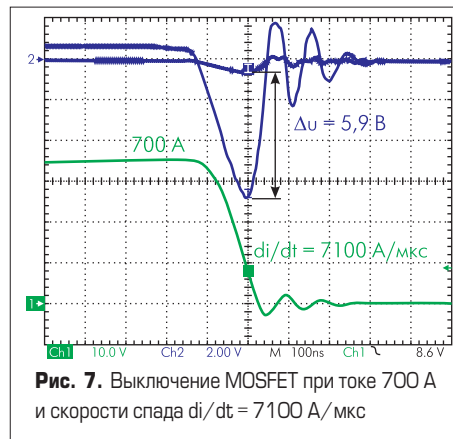


Рис. 7. Выключение MOSFET при токе 700 А и скорости спада $di/dt = 7100 \text{ А/мкс}$

ных математических моделей, так и высокий уровень технологий SEMIKRON.

Датчик тока

Магниторезистивные датчики выходного тока SKAI/SKADS встроены в пазы, прорезанные в выходных AC-терминалах модуля. Датчик компенсационного типа представляет собой чип с двумя сенсорами, позволяющий в двух точках измерять градиент магнитного поля, создаваемого выходным током, и таким образом устранять влияние внешних полей. Диапазон измеряемых токов для сенсоров данного типа зависит от геометрии паза, а основными преимуществами является широкий температурный спектр, высокая точность, малый ток потребления и миниатюрность. Принцип действия датчика рассмотрен на рис. 8а, а на рис. 8б приведен внешний вид AC-терминала со встроенным датчиком.

На рис. 9 показан внешний вид одной из версий модулей с MOSFET-ключами (а) и IGBT (б) без системы охлаждения. В приведенном варианте габаритные размеры блоков — 315×115×95 мм, вес — 3 кг.

В высоковольтных версиях SKAI/SKADS с напряжением 600 и 1200 В в качестве силовых ключей применяются транзисторы IGBT с антипараллельными диодами, изготовленными по CAL-технологии. Данный тип модулей предназначен для использования в перспективных транспортных средствах, энергия в которых вырабатывается с помощью топливных элементов. Структура силовой установки такого автомобиля показана на рис. 10.

Из-за большого тока пульсаций и необходимости обеспечения высокого срока службы, в DC-шине высоковольтных SKAI/SKADS использованы пленочные конденсаторы. Основные параметры выпускаемых блоков показаны в таблице, а краткие сведения о топливных элементах — новом и очень перспективном источнике энергии — приведены ниже.

В настоящее время известны различные типы топливных элементов, но наибольшую популярность получила технология так называемой протонной обменной мембраны PEM (Proton Exchange Membrane). Главное преимущество этих устройств состоит в том, что процесс производства электроэнергии происходит в них в результате электрохимической реакции. То есть в отличие от существующих классических методик, в том числе от чрезвычайно невыгодного с позиций КПД,

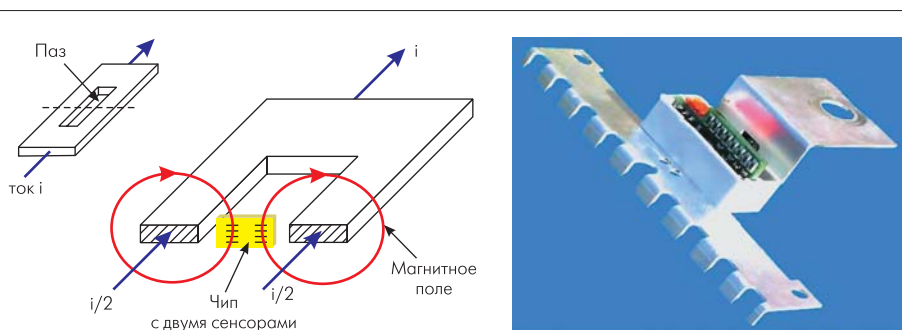


Рис. 8. Принцип работы магниторезистивного датчика тока SKAI/SKADS (а), внешний вид AC-терминала со встроенным датчиком (б)

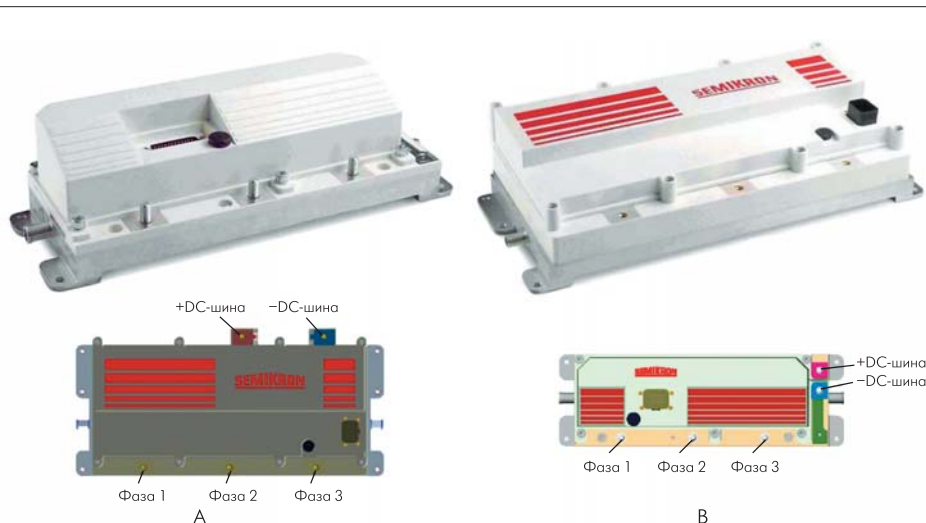


Рис. 9. Внешний вид низковольтных (а) и высоковольтных модулей SKAI/SKADS (б)

Таблица. Основные характеристики блоков серии SKAI/SKADS с жидкостным охлаждением

| Тип модуля | SKAI/SKADS 7001MD075-145x-W | SKAI/SKADS 6001MD075-145x-W | SKAI/SKADS 4001GD06-145x-W | SKAI/SKADS 3001GD12-145x-W |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $V_{(BR)DSS}, V_{CES}$ | 75 В | 100 В | 600 В | 1200 В |
| V_{DCmax} | 62 В | 80 В | 450 В | 900 В |
| I_{AC-RMS} ($T_w = 70^\circ\text{C}$, $f_{sw} = 10\text{ кГц}$, $P_F = 0,8$) | 500 А | 500 А | 400 А | 300 А |
| V_{DS} ($T_1 = 25^\circ\text{C}$, $I_{DS} = 500\text{ А}$), V_{CESat} ($T_1 = 25^\circ\text{C}$, $I_C = 400\text{ А}$) | 0,43 В | 0,57 В | 1,76 В | 1,90 В |
| R_{thjw} (50% гликоль, 15 л/мин) | 0,169 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ | 0,169 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ | 0,121 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ | 0,121 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ |
| Размеры, мм | 315×115×95 | 315×115×95 | 400×215×100 | 400×215×100 |

$V_{(BR)DSS}, V_{CES}$ — максимальное напряжение «сток — исток» MOSFET, «коллектор — эмиттер» IGBT;

V_{DCmax} — напряжение силовой шины постоянного тока;

I_{AC-RMS} — максимальный продолжительный выходной ток (среднеквадратичное значение);

V_{DS}, V_{CESat} — напряжение открытого MOSFET, напряжение насыщения IGBT;

R_{thjw} — тепловое сопротивление «кристалл — радиатор»

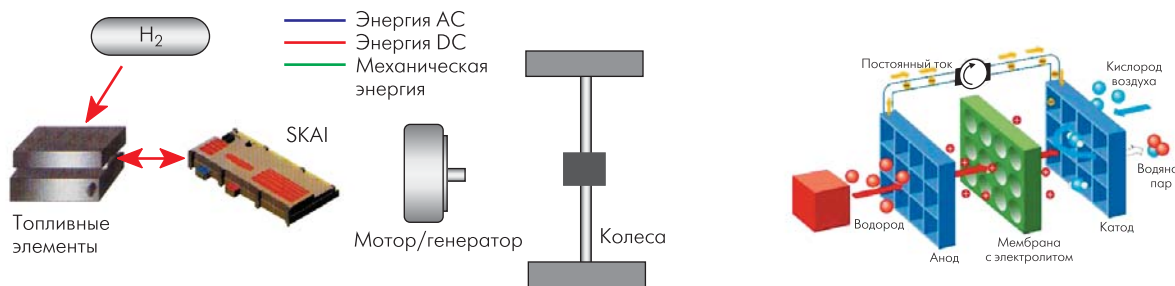


Рис. 10. Схема электромобиля с питанием от топливных элементов, конструкция топливной ячейки

но столь популярного ныне двигателя внутреннего сгорания, отсутствует расточительный во всех отношениях этап сгорания — PEM-элемент фактически превращает топливо сразу в электричество.

Между анодом и катодом топливной ячейки (см. рис. 10) находятся мембрана и катализатор с платиновым покрытием. На анод поступает водород, а на катод — кислород (например, из воздуха). На аноде водород при помощи катализатора разлагается на протоны и электроны. Протоны водорода [H+] проходят через мембрану и попадают на катод, а электроны идут через особый токопровод — так возникает электрический ток. На стороне катода протоны водорода окисляются кислородом. В результате возникает водяной пар, который и становится основным элементом выхлопных газов автомобиля.

Обладая высоким КПД, PEM-элементы имеют один существенный недостаток — для их работы требуется чистый водород, чье хранение является достаточно сложной проблемой. Для обычных городских машин предлагается иной тип топливных элементов — твердо-оксидные ячейки SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Подобные ячейки не только значительно менее требовательны к чистоте топлива, но и имеют другое, куда более существенное преимущество, делающее их применение в современных автомобилях абсолютно естественным. Благодаря использованию ПОХ-реформера (Partial Oxidation — частичное окисление) такие ячейки в качестве топлива могут потреблять обычный бензин.

Процесс превращения бензина непосредственно в электричество выглядит следующим образом. В особом устройстве — реформере, при температуре около 800 °С бензин испаряется и разлагается на составные элементы. При этом выделяется водород и привычный для нас углекислый газ (CO₂). Далее, также под воздействием температуры и при помощи SOFC (небольшой куб, состоящий из пористого керамического материала на основе окиси циркония) водород окисляется кислородом, находящимся в воздухе. После получения из бензина водорода процесс протекает по описанному выше аналогичному сценарию с одной лишь разницей: топливная ячейка SOFC, в отличие от устройств, работающих на водороде и метаноле, менее чувствительна к посторонним примесям в исходном топливе. Так что качество бензина не должно повлиять на работоспособность топливного элемента. Но главное, эффективность данного способа производства энергии значительно выше, чем у стандартных бензиновых ДВС.

Заключение

25 мая 2004 фирма SEMIKRON International получила от компании General Motors диплом «Поставщик года» (см. рис. 11) в знак признания за разработку интеллектуального модуля привода для автомобилей GM на топливных элементах. Награда за проект SKAI/SKADS была вручена на официальной церемонии, состоявшейся в Праге.



Рис. 11. Дипломом «Поставщик года» от компании General Motors

Победа модуля SEMIKRON обусловлена существенными преимуществами приводных решений перед предложениями других компаний, занимающихся созданием аналогичных устройств. По заключению специалистов GM модули SEMIKRON на 40% меньше аналогов, их основные технические характеристики на 25% лучше, при этом стоимость блоков SKAI/SKADS на 35% ниже, чем у изделий, предлагаемых конкурентами.

По словам Питера Фрея, главного менеджера отдела маркетинга компании SEMIKRON International, основная причина успеха фирмы — многолетний опыт производства силовых электронных сборок для рынка транспортных средств с электроприводом. В области проектирования приводов для гибридомобилей разработка фирмы SEMIKRON является полностью инновационной.

Конструкция модулей SKAI/SKADS обеспечивает уровень защиты IP64. На данный момент изделия прошли полный цикл испытаний на соответствие автомобильным стандартам США и международным IEC. Модули протестированы на устойчивость к воздействию повреждающих перегрузок, включая перенапряжения и многократные короткие замыкания. Испытания рабочих режимов проводились в диапазоне температур от -40

до +105 °С. Во всех рабочих режимах КПД модулей превышает 95%.

О необычайном многообразии применений разработанных SEMIKRON модулей говорит следующий факт. Низковольтная версия модуля SKAI и сборка SEMISTACK на основе силовых интеллектуальных модулей SKiiP SEMIKRON использованы при проектировании гибридного маневрового локомотива будущего, названного Green Goat (рис. 12). Модуль SEMISTACK представляет собой 3-фазный инвертор, состоящий из полумостовых модулей SKiiP с жидкостным охлаждением. Сборка является составной частью тягового привода, а модуль SKAI с воздушным охлаждением используется как вспомогательный источник питания. Создание гибридных маневровых локомотивов, задача которых — буксирование вагонов и формирование составов, производится в рамках проводимой в США программы, направленной на повышение экономичности транспортных средств и снижение вредных выбросов.

В настоящее время SEMIKRON готовит к выпуску модуль SKAI второго поколения, отличающийся расширенным температурным диапазоном и повышенной мощностью. При производстве усовершенствованных блоков использованы новейшие кристаллы Trench IGBT и более мощный контроллер серии TI 28xx, а для изготовления корпуса применены пластики с более высокой теплопроводностью.

Литература

1. Tursky W., Beckedahl P. SKAI/SKADS — Advanced Integration of Electric Drive Systems. SEMIKRON Inc.
2. Toland M., Beckedahl P. SKAI/SKADS — SEMIKRON Automotive Inverter. SEMIKRON Inc., USA.
3. Mookken J. Future Vehicle Drive Next Generation of Power Modules. SEMIKRON Inc., USA.
4. Колпаков А. SKAI — новая разработка SEMIKRON для электротранспорта // Электронные компоненты, № 7'2003 г.

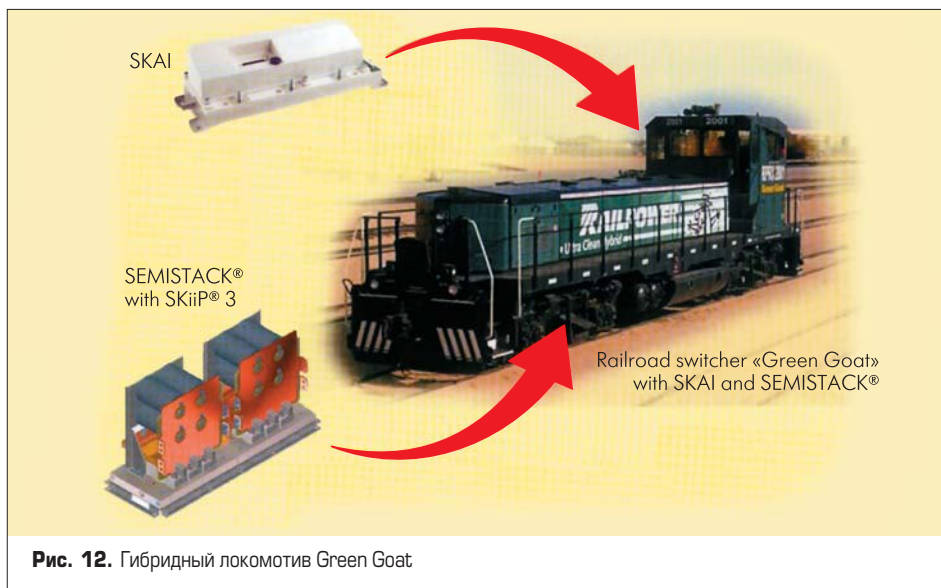


Рис. 12. Гибридный локомотив Green Goat