

Окончание. Начало в № 6' 2009

Топливная экономия, эффективность, экологичность — атрибуты новых автомобилей, двигателей и систем

В заключительной части публикации подводятся итоги обзора автомобильных технологий и решений ведущих производителей, направленных на осуществление тех стратегий мирового автомобильного бизнеса, которые обозначены в заглавии статьи. Комплексный мехатронный подход к созданию новых электронно-управляемых автомобильных систем повышает роль электроники, компонентов и датчиков. Также на мировом автомобильном рынке наблюдаются структурные и качественные изменения, связанные с растущей актуальностью гибридов и электромобилей, что находит отражение и в рыночном сегменте автомобильной электроники.

Светлана СЫСОВЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Актуальные автомобильные технологии, электроника и электронные компоненты

Технологии повышения экономии топлива и эффективности автомобилей с бензиновыми и дизельными ДВС во многом основываются на усовершенствованиях двигателей, трансмиссии, аэродинамики, электрификации систем управления основных и вспомогательных узлов. При осуществлении этих методов роль электроники, полупроводниковых компонентов и датчиков является значительной [1–3].

Автомобильная электроника, предназначенная повысить топливную эффективность автомобиля, включает полупроводниковые и другие датчики, схемы управления с актюаторами, силовые полупроводники и микроконтроллеры.

Во многом методы экономии топлива основываются на применении общих рекомендаций по повышению эффективности вождения.

Рекомендации по эффективному вождению и роль электронных систем в минимизации расхода топлива ДВС

1. Поддержание скоростного режима, оптимального с точки зрения расхода топлива и безопасности движения, выработка навыков экономичного/эффективного вождения. Известно, что расход топлива на километраж пробега меньше при постоянной скорости, но чем выше скорость и обороты, тем выше расход топлива. Оптимальная скорость для каждого автомобиля своя, детали экономичного во-

ждения различны для бензиновых и дизельных двигателей, но в общем наиболее экономичным считается вождение на средней скорости. Еще в начале движения рекомендуются: переход на более высокую передачу, разгон до определенной скорости, езда накатом на постоянной скорости до пункта назначения. Предпочтительна езда на более высокой передаче без чрезмерного занижения оборотов, а также без остановок, вынуждающих двигатель работать вхолостую. При разгоне в начале езды расход топлива будет выше, но средний расход топлива за поездку при такой технике ниже, чем при полностью равномерном движении на всем отрезке пути. Экономичность вождения индицирует бортовой компьютер на основе показаний датчика скорости автомобиля или различные индикаторы экологичности. Топлива требуется больше и в условиях резких разгонов и торможений, которые неизбежны из-за соображений безопасности, на участках с потоковым движением, в пробках, а также из-за остановок перед светофорами и скоростных ограничений. Поэтому полезно раннее обнаружение препятствий и переход на движение накатом, включение радарного АКК, еще более раннее планирование маршрута с навигационной системой, использование телематического сервиса. Все датчики систем безопасности в той или иной степени задействуются с целью поддержания оптимального скоростного режима. В выработке топливно-экономичного и эффективного стиля вождения огромную роль играют датчики педалей газа, тормоза, положения сцепле-

ния, дроссельной заслонки, угла поворота и крутящего момента руля, PRNDL переключателя передач, то есть все датчики, осуществляющие интерфейс (взаимодействие) водителя и автомобиля. Например, следует избегать резких нажатий на педаль акселератора, особенно при переключениях передач, так как в зависимости от системы топливоподачи автомобиля расход топлива может значительно увеличиться. Новые мехатронные системы имеют все меньше механических связей и используют все больше электронных сетевых коммуникаций, что позволяет водителям с разными стилями вождения оптимизировать расход топлива, эмиссию и безопасность. Для достижения поставленных целей используются модифицированные электронные схемы и компоненты.

2. Электрооборудование автомобиля, которое потребляет значительную мощность — фары, кондиционер, обогреватели стекол, аудиосистема, дисплеи (светодиодное освещение) — целесообразно использовать только в случае необходимости, которую не следует создавать искусственно (даже натяжители пристяжных ремней могут, например, не потребоваться, если применить меры безопасности в процессе езды). Если вдобавок узел не электрифицирован и не выполняет полезных функций, то рекомендуется использовать его как можно реже, хотя электропитание новых систем является хорошей альтернативой механическим приводам, отбирающих мощность двигателя, и, напротив, прямо или косвенно помогает экономить топливо, повышать эффективность, безопасность, снижать эмиссию, улучшать

характеристики и комфорт. Очень важную роль в экономии мощности ДВС, например, играет электрическое рулевое управление EPS. Результатом массовой электрификации является то, что современный автомобиль включает 40–50 малых двигателей, автомобиль премиум-класса — порядка 70. В батарейной концепции все узлы автомобиля должны быть электрифицированы. Еще одно средство повышения эффективности — применение регенеративного торможения. Приобретают актуальность датчики, ответственные за распределение энергии в системе. Это датчики температуры (NTC-термисторы), напряжения, мощности/тока, положения/частоты вращения двигателей, все датчики состояния узлов, сред, условий, указывающие на необходимость подключения электрифицированных узлов.

3. Обеспечение общего технического состояния автомобиля и электрооборудования в адекватном состоянии. Все узлы и агрегаты автомобиля, ответственные за передвижение автомобиля, должны быть исправны, настроены и отрегулированы — независимо от оснащенности электронными системами, которые участвуют в функционировании узлов и агрегатов автомобиля. Роль электронных систем в новых автомобилях, применяющих технологии повышения экономичности/эффективности систем powertrain и эмиссии, повышается. В группу электронных систем входят, прежде всего, системы контроля топливopодачи, смесеобразования и сгорания. Задействованные в этом компоненте включают датчики давления MAP/BAR, положения дроссельной заслонки, массового расхода воздуха, датчики давления в камерах сгорания, высокого давления дизельных двигателей, частоты вращения двигателя, коленчатого вала, распределительного вала, датчики, установленные в трансмиссии, и ряд других. Ярким примером актуального компонента является датчик состояния масла двигателя. Новые мехатронные системы имеют меньше механических связей, и в данную группу включаются новые и более прецизионные устройства. Помимо датчиков, примером являются 32-битные микроконтроллеры, которые заменили 16- и 8-битные устройства, что позволило более точно регулировать впрыск, снизить потребление топлива и эмиссию. В группу powertrain входит также система рекуперации, которая захватывает и запасает в батарее часть кинетической энергии в процессе торможения, а также силовая электроника, приобретающая наибольшую актуальность в гибридах. Эффективность автомобилей поддерживается системами EGR с соответствующими датчиками давления и положения, а экологичность (соответствие новым высоким стандартам эмиссии) контролируется с помощью датчиков концентрации

кислорода. Важную роль в поддержании эмиссии дизельных автомобилей на необходимом уровне играют датчики NOx.

За обеспечение ходовых характеристик (динамика, управляемость) ответственны системы динамической стабилизации ESC, электрического рулевого управления EPS, ABS/ПБС, контроля подвески, а также датчики частоты вращения и положения.

Все эти системы должны надежно и точно функционировать.

4. Особое внимание следует обращать на состояние шин. Для езды, оптимальной с точки зрения расхода топлива и безопасности, рекомендуется удерживать высокое давление, на верхних пределах (впрочем для грунтовых дорог слишком высокое давление также не рекомендуется). В поддержании давления шин на необходимом уровне огромную роль играют системы мониторинга давления шин TPMS с датчиками давления, ускорения, состояния батареи, напряжения, температуры батарейного узла. Рекомендуются шины со сниженным сопротивлением качения и другими специальными характеристиками.

5. Улучшение динамики автомобиля. Рекомендуются к эксплуатации автомобили с высокими аэродинамическими показателями, заявленными производителями. Аэродинамику на высоких скоростях дополнительно улучшают закрытые окна, люки, отсутствие багажа. В обеспечении динамических характеристик езды участвуют следующие электронные системы: динамической стабилизации ESC, электрического рулевого управления EPS, ABS/ПБС. Концептуально основные компоненты EPS включают электрический двигатель, ECU на основе микроконтроллера, который обрабатывает сигналы от трех основных датчиков (положения рулевого колеса, крутящего момента руля, положения двигателя), а также датчиков скорости автомобиля или скорости колес ABS и датчиков скорости двигателя/коленчатого вала. ECU EPS также включает схему-драйвер электрического двигателя, обычно с бесконтактным переключением (трехфазный бесколлекторный двигатель) и соответствующими датчиками положения/переключения двигателя.

6. Обеспечение благоприятных условий эксплуатации. Расход топлива отличается при движении по городу и по шоссе, по асфальту или по проселочной дороге. Очень важно состояние дороги: ухабы, гололед, дождь, снег, метель увеличивают расход топлива. Названные погодные условия также осложняют езду из-за условий плохой видимости, в которых должен использоваться другой скоростной режим. Отрицательно на расход топлива влияют условия темного времени суток — по той же причине. Поздней осенью и зимой расход топлива всегда выше

по многим причинам: это работа двигателя в условиях холодного старта, дорожные условия, плохая видимость, необходимость в отопительных приборах.

Но и в жару расход топлива повышается — горячего воздуха, поступающего в двигатель, требуется больше, а также необходим кондиционер. Ясно, что ИК-датчики и системы безопасности, всепогодные радары, датчики температуры и частоты вращения колес тоже помогают экономить топливо и повышают эффективность автомобиля.

Приведенные выше рекомендации — самые общие, применимые для любых типов автомобилей, включающих ДВС. Новые системы все более снижают нагрузку на водителя, оптимизируя экономичность/эффективность вождения. Над усовершенствованием систем с ДВС сейчас работают ведущие автопроизводители, но многие из них одновременно заняты проектами по осуществлению стратегий гибридной модернизации своих автомобилей. Ярким примером этого служит модульный подход компании Daimler. Концепция «зеленой кнопки» (Green Button) TRW, например, означает автоматический переход автомобиля в режим максимальной экономии топлива. Аналогичную функциональность обеспечивают и другие поставщики электронных систем.

Электроника для гибридов

Авторитетная французская консалтинговая организация Yole Development (www.yole.fr, www.i-micronews.com) прогнозирует, что в 2015 году в мире будет произведено более 17 млн гибридных и электрических автомобилей [4]. Согласно более общим прогнозам 50 млн автомобилей будет продано в 2020 году, то есть половина произведенных в это время автомобилей. С 2010 года на автомобильный рынок входят и EV-автомобили (Mitsubishi, Renault, GM, Ford, Daimler). Эту технологию отличает все еще несколько ограниченный диапазон хода (40 миль) и высокая цена, но благодаря инвестициям в литий-ионные батареи в данной области ожидается прогресс.

Согласно этим общим тенденциям в автомобильном бизнесе в ближайшие несколько лет наиболее актуален рыночный сектор, объединяющий автомобильную электронику, компоненты для гибридов (обычных и плагинных) и электромобилей.

Автоматический старт/стоп, регенеративное торможение или чисто электрический режим позволяют в большей степени повысить экономичность и эффективность автомобиля, и водитель при этом не отвлекается, долго раздумывая об экономических и экологических аспектах поездки. Электроника выполняет калькуляцию, информирует и инструктирует водителя о необходимости выполнения топливно-сберегающих действий или выполняет большую долю этих действий самостоятельно.

Электромобили и плагинные гибриды как переходное звено между гибридами характеризуются еще меньшим числом механических систем и узлов (например, отсутствует коробка передач), но в этих автомобилях все более повышается роль электронных систем, двигателей для обеспечения электропитания подвижных механических частей.

В гибридах используются схемы управления и компоненты для контроля ДВС, а также электроника для контроля и управления гибридной системы.

Силовая электроника — ключевая технология для гибридов [4–10]. Согласно самым общим данным силовая электроника составляет 20% или более (порядка 50%) от общей материальной стоимости гибридного автомобиля, что даже выше, чем для EV, причем значительная доля цены силовой электроники приходится на батарею.

Главный полупроводниковый силовой компонент HEV/EV — это транзистор с изолированным затвором (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT), используемый в инверторе. Полупроводниковое переключающее устройство IGBT усиливает напряжение от батареи и преобразует усиленную DC-мощность в AC-мощность для питания электродвигателя.

HEV/EV силовые устройства используются также в преобразователях постоянного напряжения DC/DC, AC/DC преобразователях энергии (генератор-батарея). Так, силовая электроника в HEV необходима для преобразования низкого батарейного напряжения к высокому входному напряжению инвертора, для преобразователя-усилителя (boost-converter) и преобразователя, понижающего высоковольтное батарейное напряжение к низковольтному батарейному напряжению (buck converter).

Контент автомобильной электроники различается в зависимости от типа гибрида (микро-гибрид, мягкий, полный двухрежимный гибридный, плагинный гибридный), архитектуры (последовательная, параллельная и powersplit), основной и добавленной функциональности, требований мощности.

Микрогибриды в ближайшем будущем ожидают самый высокий рост ввиду их низкой цены и легкой интеграции технологии. Параллельные микрогибриды, в которых стартер и альтернатор замещены системой интегрированного стартера и альтернатора, популярны благодаря функции старт/стоп. Напряжение и уровень мощности в этих системах относительно низкие, и улучшение потребления топлива укладывается в 10%-ный диапазон.

Для низких напряжений и токов в микрогибридных применениях MOSFET-технология дает даже лучшую плотность мощности, чем IGBT.

В дополнение к функции старт/стоп средняя гибридная система может помогать мощности двигателя и захватывать энергию торможения. Рекуперация энергии позволяет

достигать экономии топлива до 25% и выше. Если сравнивать в цифрах влияние усовершенствований двигателя, трансакла и других систем, то наибольший вклад в повышение эффективности гибридных систем привносит именно регенеративное торможение.

Системы торможения различаются в зависимости от производителя и назначения [6]. Для негибридных автомобилей применяются гидравлическое и электрогидравлическое торможение (Continental EHB в Ford Escape), а также электромеханическое торможение (Continental EMB), разработано много концепций торможения (например, электронная парковка EPB Continental). Регенеративное торможение для гибридов, EV, FCV (RBS Continental, TRW ESC-R (Electronic Stability Control-Regenerative) и Slip Control Boost (SCB)) помогает захватывать энергию торможения. Многие из таких систем оснащены педальным симулятором, дающим водителю «чувство педали». Регенеративное торможение может повышать эффективность и негибридных автомобилей. TRW SCB (Chevrolet Tahoe, GMC Yukon), например, представляет собой гидравлическую усиленную тормозную систему. В негибридных автомобилях SCB не обеспечивает регенеративную часть торможения, но она представляет собой альтернативу для систем прямого бензинового впрыска с турбонаддувом и дизельных двигателей, которые имеют значительные механические потери вследствие применения вакуумных насосов.

BMW повысила топливную эффективность до 3% стандартного негибридного автомобиля благодаря использованию технологии Brake Energy Regeneration (BER). В системе применяется специально разработанный альтернатор с интеллектуальной схемой управления, служащий как электрическая машина для генерации энергии при торможении. В батарее BER система заряжается на 80% емкости с использованием мощности двигателя, затем, по сигналам датчика, она заряжается при торможении или при запуске от аккумулятора другого автомобиля (overgun), в течение ускорения функция деактивируется, и становится доступным более высокий выход двигателя с меньшими CO₂ эмиссией и уровнями потребления топлива. Но в целях безопасности BER может заряжать батарею и в процессе ускорения, чтобы предотвратить разряд. Система поддерживает резервный заряд, адекватный требованиям мощности, пока автомобиль работает на холостом ходу, и достаточный для старта двигателя при любых условиях. Обычные тормоза автомобиля прикладывают дополнительную мощность. BMW ввела эту систему в сериях 1, 3, 5–7 и Mini Cooper. Для получения большего заряда, чем обычная свинцово-кислотная батарея, применена батарейная технология Absorbent Glass Mat (AGM). Вместе с системой старт/стоп и BER достигается 8%-ная экономия топлива.

Bosch и Rexroth представили свою гидростатическую систему рекуперации (Hydro-static Regenerative Braking, HRB) для негибридных коммерческих автомобилей и мобильного оборудования. Было заявлено, что начальные измерения показывают снижение потребления топлива до 25%. В HRB-системе с электронным управлением энергия торможения преобразуется в гидравлическое давление и запасается в гидравлическом резервуаре высокого давления. Когда устройство ускоряется, запасенная гидравлическая энергия прикладывается к трансмиссии, что позволяет снизить потребление мощности двигателя и топлива.

Более высокое потребление электрической мощности для добавленной функциональности также означает, что должны использоваться устройства с более высоким напряжением. В среднегибридных применениях, где в основном применяются системы рекуперации, IGBT также рекомендуется как устройство, рассчитанное на напряжения выше 120 В.

Полная гибридная система может иметь последовательную, параллельную или powersplit архитектуру и, в зависимости от применения, снижать потребление топлива до 35%.

Для того чтобы запустить гибридный автомобиль в полном электрическом режиме, используется полная гибридная система, работающая на основе IGBT с высокими токами и напряжениями. 650 В — это стандартное напряжение для IGBT-устройств, но существует тенденция к повышению автомобильных рабочих напряжений в гибридах (700/800 В или 1,2 кВ). Это объясняется тем, что, если преобразователь может усиливать напряжение на том же самом уровне тока, то это позволяет получить более высокий выход электродвигателя по мощности и крутящий момент, что привносит вклад в увеличение эффективности/экономичности автомобиля, снижение потерь мощности, а также размера инверторов.

Например, силовая высоковольтная схема была добавлена для поддержки системы THS II полных гибридных автомобилей Prius Toyota последних лет (рис. 12) [7]. Блок контроля мощности (Power Control Unit, PCU) включает инвертор, выполняющий функции преобразования DC мощности батареи в AC для управления двигателя и DC/DC-преобразователь для преобразования к напряжению 12 В. Напряжение двигателя и генератора было повышено от 274 В в THS до максимального напряжения 500 В в THS II. Мощность гибридной системы была повышена в 1,5 раза — с 33 до 50 кВт в автомобилях Prius, которые начали выпускать с 2003 года.

Согласно данным Yole Development, приблизительно одинаковые инверторы для полных, плагинных гибридов и электромобилей со средней мощностью 50 кВт формируют в 2009 году 74% рынка силовых модулей HEV и EV.

В RX400h напряжение шины PCU было повышено далее — до 650 В.

Поскольку в устройствах преобразования энергии часто переключаются высокие напряжения и большой ток, должны применяться силовые устройства с минимальными потерями энергии. Контроль тока и температуры также должны быть схемно интегрированы с IGBT.

Полупроводниковая технология позволяет получать более высоковольтные системы, отвечающие перечисленным требованиям. Примером является структура IGBT Toyota, которая с использованием метода дисперсии электрического поля (Electric Field Dispersion, EFD) (рис. 12г) дала возможность снизить потери, повысить пробивное напряжение с 970 В в Prius 2003 года до 1200 В в RX400h SUV Lexus, что позволило дать больший крутящий момент и выходную мощность. Также это позволило уменьшить размер кристалла и снизить толщину пластины. Одновременно были снижены потери при включении on-state.

Поскольку переключающий ток высокий, важной задачей является минимизация тепла. Toyota в THS II применила транзистор, который на 20% меньше, чем устройство в THS, и достигает низкой генерации тепла и высокой эффективности.

Согласно данным Yole Development, IGBT как устройство, рекомендуемое для высокомоощных применений, составляет 80% от общего рынка силовых модулей HEV/EV. В 2009 году рынок силовых модулей удерживается на уровне \$300 млн, ожидается его 30%-ный рост — до 2020 года, в котором будет достигнут уровень в \$5 млрд. Сегодня рынок силовых модулей отличается ярко выраженным доминированием компании Toyota, располагающей собственным производством модулей. Но и другие автопроизводители, и автомобильные поставщики tier one инвестируют системы HEV/EV powertrain: Bosch, Continental, Valeo, Delphi, Denso, Hitachi. Компании, выпускающие полупроводники (Infineon, Fuji, Mitsubishi, STMicro и другие), также стремятся занять рынок силовых модулей.

Автомобильная среда характеризуется жесткими условиями эксплуатации, требующими повышенной надежности компонен-

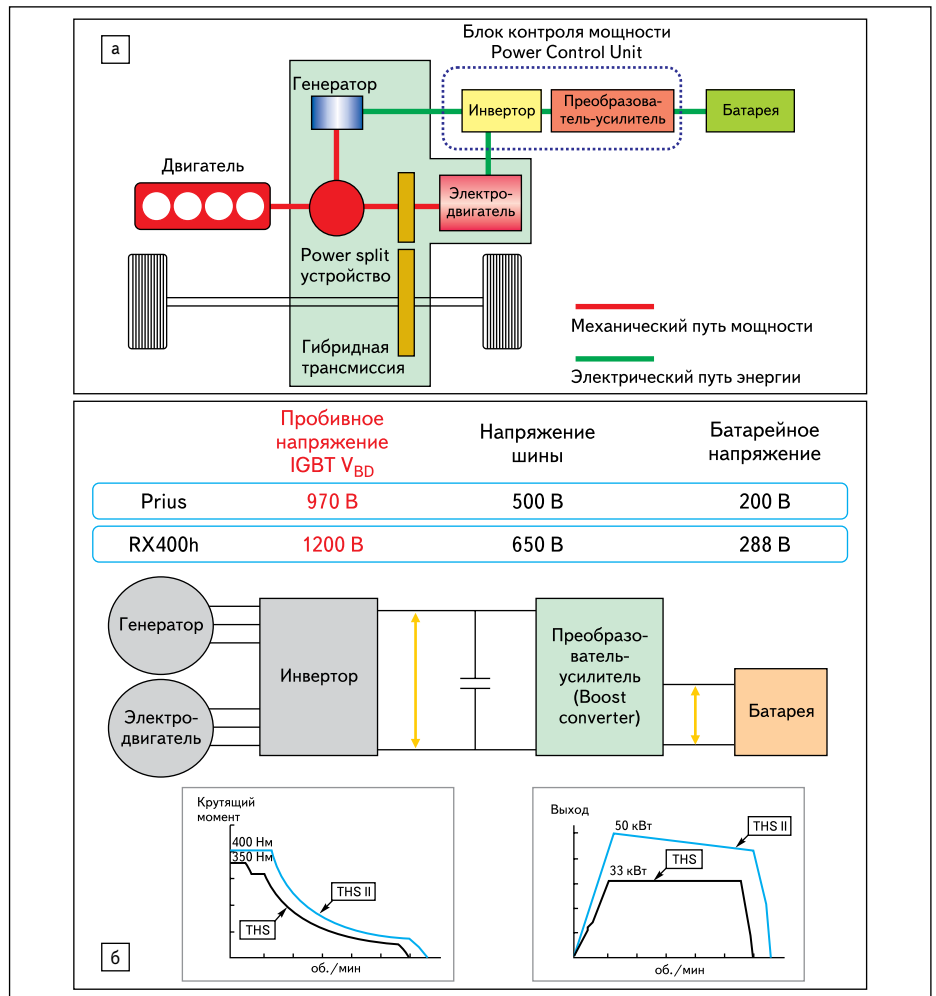


Рис. 12. Технологии Toyota для высоковольтных систем: а) Toyota Hybrid System-II (THS-II); б) высоковольтные электрические системы THS-II Prius и RX400h

тов: это высокая температура, ее изменения вследствие работы устройств и температуры окружающей среды, вибрация. Ожидаемый срок службы силовых модулей для гибридных применений составляет 15 лет/150 000 миль.

Для соответствия автомобильным требованиям необходима дополнительная квалификация, тестовое оборудование, испытания. Чтобы квалифицировать силовые устройства

для автомобильного рынка, необходимы повышение способности устройств к циклированию мощности и температуры, улучшения в технологиях корпусирования, охлаждения, предотвращения сбоев вследствие многих циклов термоциклирования. В данном направлении проделала значительные шаги компания Infineon: помимо усовершенствований технологии, повышения напряжений

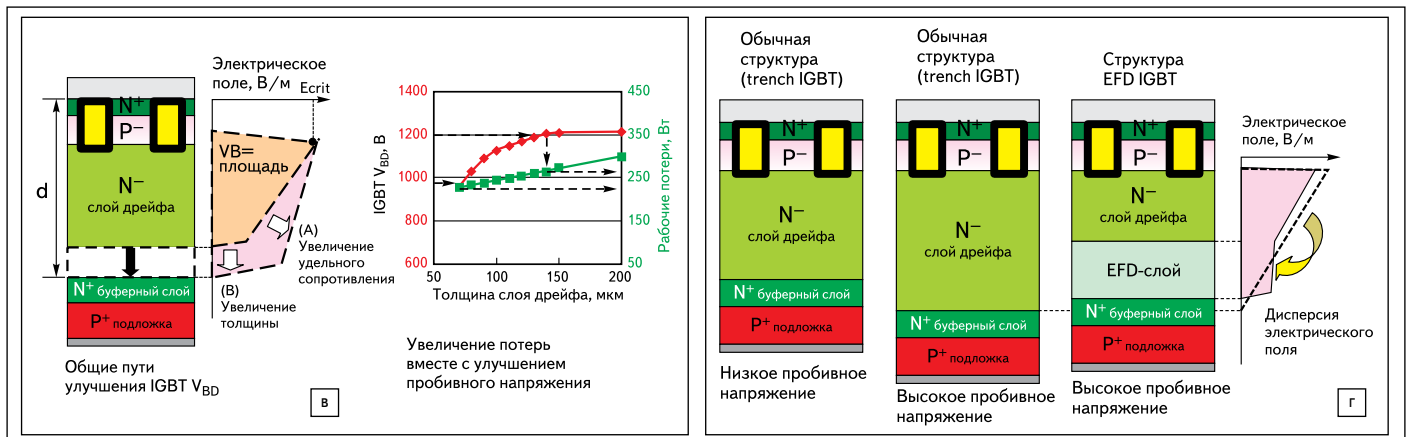


Рис. 12. Технологии Toyota для высоковольтных систем: в) улучшение пробивного напряжения IGBT; г) введение слоя Electric Field Dispersion (EFD)

и рабочих температур, усовершенствована технология корпусирования силовых модулей [8].

Силовые модули Infineon для гибридов

Технологии Infineon trench FieldStop IGBT и диодов EmCon дают увеличение плотности тока в чипе. Одновременно потери мощности во включенном состоянии (on-state loss) и потери при переключении (switching loss) также снижены по сравнению с классическими NPT IGBT, для которых принят компромисс: если потери on-state снижаются, потери переключения увеличиваются.

Меньшие потери достигаются за счет введения FieldStop-слоя, снижающего толщину устройства и падение напряжения в нем (рис. 13а, [8]). Известны две различные IGBT-технологии — планарных и trench-устройств. В trench-структуре каналы (trenches) формируются на поверхности кристалла, а затворы MOSFET и IGBT — на боковых стенках каналов; структура не имеет паразитного JFET-сопротивления¹, присущего планарным

MOSFET, и ее можно выполнить меньшей по объему; сопротивление в течение работы ON-resistance низкое. FieldStop-устройства на основе trench-технологии работают непрерывно при так называемой переходной температуре 150 °C (junction temperature — самая высокая рабочая температура активного элемента в полупроводниковой схеме), достигая максимума в 175 °C, что повышает плотность тока чипа и делает возможным использование более высоких температур охладителя.

Кремний допускает такие рабочие температуры. Некоторые силовые устройства могут работать и на более высоких температурах (порядка 200 °C), но более высокие температуры дают более высокую температурную разницу на проводном интерфейсе, что снижает надежность при циклировании мощности модуля. Поэтому и технология, и корпусирование устройства должны быть оптимизированы для обеспечения характеристик, надежности, цены.

Гибридные применения требуют высокой плотности мощности в модулях, что форму-

лирует требование снижения размера на единицу тока. Устройства FieldStop значительно меньше по размеру в сравнении с NPT.

Ряд изменений, которые выполняются с целью противостояния высоким температурам, включает усовершенствования в проводных материалах и материалах для процесса пайки и прикрепления кристалла.

Дизайн корпусирования и технологии межсоединений имеют сильное влияние на паразитную индуктивность модуля, и для повышения плотности мощности становится важным выбор материала. Все эти аспекты нашли отражение при разработке продуктовой линейки силовых полупроводниковых модулей Infineon, которая включает:

- модуль для средних гибридов HybridPack1;
- модуль HybridPack2 для полных гибридов;
- семейство ИС драйверов EiceDRIVER²;
- оценочный комплект Hybrid-Kit.

Во всех модулях использована технология trench FieldStop, но технологии корпусирования различны. Конфигурация модулей HybridPack1 и HybridPack2 Six-Pack (6 пакетов) (рис. 13б) на основе технологии trench FieldStop IGBT третьего поколения характеризуется сниженным значением проводимости и потерь при переключении.

1 JFET-транзистор (Junction Field Effect Transistor) с управляющим *pnp* (*npn*) переходом.

2 Infineon EiceDRIVER представляет собой ИС драйвера IGBT, квалифицируемую согласно AEC Q101 и обеспечивающую двунаправленную передачу сигналов с малыми временными задержками, а также со способностью противостоять высоким окружающим температурам. Устройство с интегрированной ступенью на 2 А управляет IGBT на 100 А/1200 В, его отличают надежность и приемлемая цена для гибридов. Гальваническая изоляция выполнена согласно IEC60747-5-2.

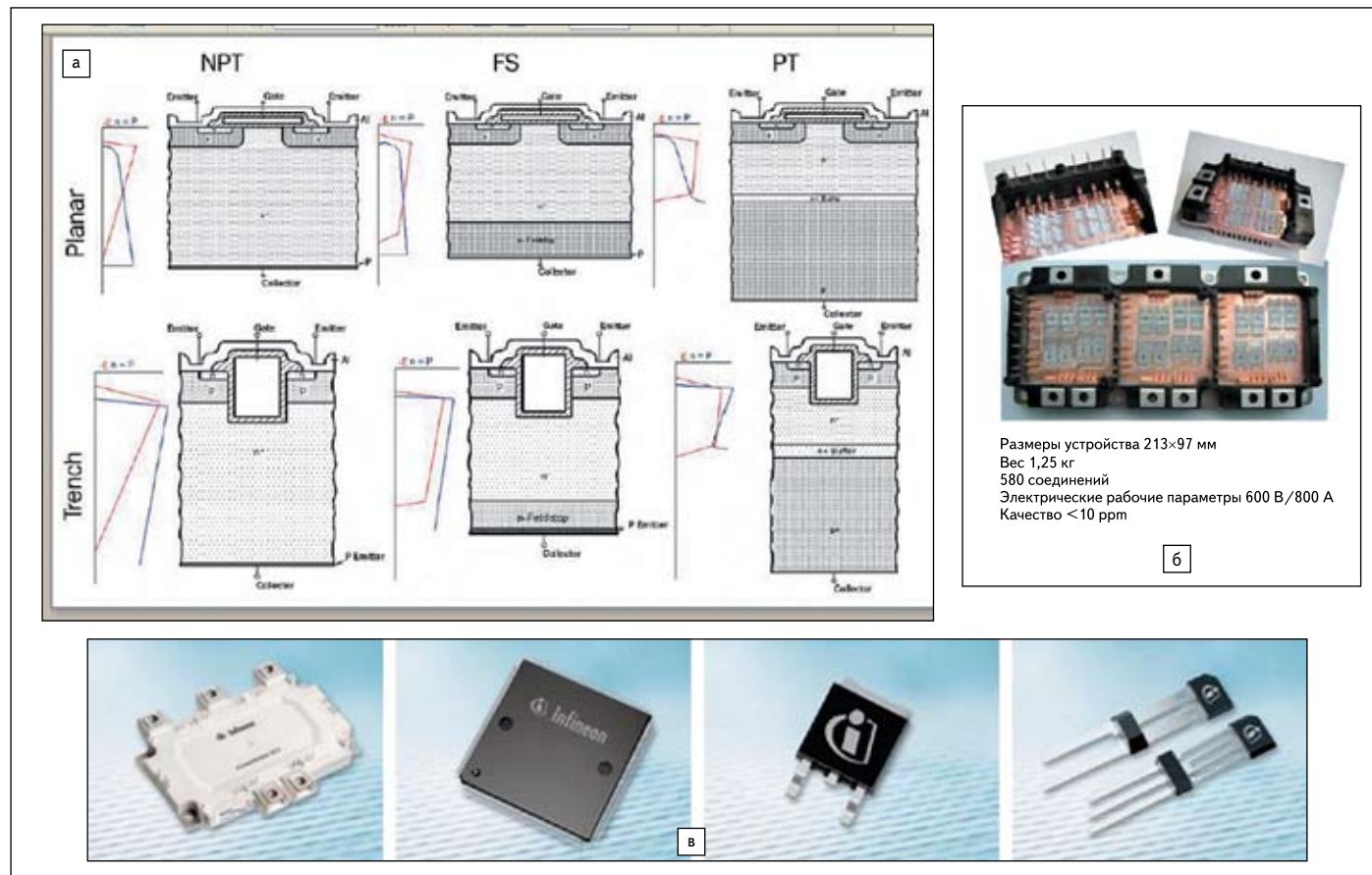


Рис. 13. Технологии Infineon для автомобильных силовых применений:

а) технология trench FieldStop IGBT [8]; б) силовые инверторные модули HybridPack2 на 80 кВт (иллюстрация усовершенствования технологий корпусирования); в) спектр решений Infineon для гибридов: силовые модули, микроконтроллеры, автомобильные дискретные компоненты, датчики магнитного поля

Модуль Infineon HybridPack разработан с расчетом на работу в диапазоне мощности до 20 кВт, с рабочими токами/напряжениями 400 А (по два 200-А IGBT и 200-А диода на переключатель), 600 В, при температуре до 150 °С.

HybridPack1 разработан для инверторов с системами воздушного или низкотемпературного жидкостного охлаждения. Плоская медная плата-основание скомбинирована с керамической подложкой. В компактном инверторе драйверная плата может легко пасться наверху модуля. Соединения — резьбовые. В качестве технологии корпусирования Infineon применяет улучшенный процесс проводного соединения, обеспечивающий надежность при термоциклировании и циклировании мощности.

В качестве метода корпусирования промышленных модулей Infineon применяет пайку. Плотность мощности HybridPack1 была увеличена на 25% в сравнении с промышленным модулем — посредством модификации схемы и использования проводных соединений терминалов.

Хотя паразитная индуктивность увеличилась на 50%, это не является важным аспектом конструирования для 600-вольтных устройств, поскольку в среднегибридных применениях напряжение ниже 200 В.

Силовой модуль Infineon HybridPack2 для полногибридных применений характеризуется мощностью 80 кВт, током в 800 А (по четыре 200-амперных IGBT и диода) и рабочим напряжением в 650 В, рассчитан на работу при температурах до 150 °С. Модуль HybridPack2 сконструирован для инверторных систем с прямым водяным охлаждением (температура охладителя 75 °С), включает медную плату-основание с оригинальным названием PinFin пластинчатого типа с выводами и керамическую подложку-субстрат. Применен тот же процесс проводного соединения, модуль рассчитан на те же условия крепления и монтажа, что и HybridPack1.

Но ключевой технологией корпусирования для соединений в модуле HybridPack2 является ультразвуковая сварка. Посредством использования инновационного сварочного процесса и модификации схемы плотность мощности модуля HybridPack2 была увеличена более чем на 120%.

Проводные соединения терминалов занимают значительное пространство в корпусе ввиду необходимости осуществления множественных соединений и размещения подвижного соединительного средства, при ультразвуковой сварке данное пространство уменьшается. Процесс ультразвуковой сварки является также более быстрым. Токонесущая емкость проводных соединений ограничена, а токонесущая способность толстых медных терминалов, добавленных к субстрату-подложке в процессе ультразвукового сваривания, не ограничивается. Более толстые медные терминалы снижают отвод

тепла, сгенерированного в подложке, что позволяет избежать прикрепления большого числа алюминиевых проводов к основной плате. Более плотное корпусирование значительно снижает паразитную индуктивность. Для полногибридных применений низкая паразитная индуктивность важна, поскольку системное напряжение больше чем 400 В, и высокий ток будет соответствовать и большей скорости его изменения. Таким образом, ультразвуковой метод улучшает возможности производства.

Тепловое сопротивление модуля принципиально зависит от области кристалла, отведенной на переключатель, стека материала модуля и схемы основания-субстрата. Характеристики стека материала влияют на тепловое сопротивление модуля, а схема привносит поперечную проводимость. Тепловое сопротивление модуля HybridPack2 значительно снижается посредством удаления слоя смазки и прямой пайки подложек-субстратов к плате-основанию PinFin.

Различное тепловое расширение граничащих материалов модуля вызывает стресс (механическое напряжение) интерфейса и в конечном итоге сбоя. Наиболее подвержены стрессам места пайки субстрата и соединений медных плат-оснований.

Для повышения надежности производители модулей применяют модули с алюминиево-нитридным субстратом и алюминиевые кремний-карбидные платы-основания, что значительно увеличивает цену. Но дорогие алюминий-кремний-карбидные платы имеют значительно более высокую надежность при температурном циклировании, чем более дешевые медные платы-основания. Цена кремний-нитридного субстрата-основания значительно выше, чем цена алюминий-оксидного, но и тепловые характеристики его лучше.

Вместо этого Infineon применяет в HybridPack1 и HybridPack2 медные платы и алюминий-оксидный субстрат, которые отличаются улучшенными свойствами. Данная комбинация материалов позволяет значительно снизить цену модуля и достичь целевой автомобильной надежности в 1000 температурных циклов от -40 до +125 °С.

Технологии powertrain Infineon

Компания Infineon широко известна многими своими разработками для систем powertrain, включая специализированные датчики Холла, ГМР и IGBT. Новые разработки ориентируются также на передовые тенденции в автомобилестроении, где электронные компоненты служат ключом к улучшению энергетической эффективности и снижению эмиссии. На фоне других производителей Infineon выделяется своими разработками для гибридных автомобилей (HEV), которые включают силовые полупроводники, модули, микроконтроллеры и датчики (рис. 13в), что позволяет компании занимать первое место среди мировых про-

изводителей силовой электроники и второе место среди производителей автомобильной электроники.

Infineon придерживается принципа интегрированного подхода к организации параллельного и сетевого взаимодействия OEM, поставщиков первого порядка (tier one) и фабрик, выпускающих полупроводники, и стремится укрепить свои позиции в занятой нише.

Высоковольтные полупроводниковые дискретные компоненты и высокоомощные модули для инверторов и преобразователей гибридных (а также электрических и автомобилей на топливных ячейках FC) Infineon разработаны на основе IGBT, диодов и технологии полевых транзисторов COOLMOS. Для них предлагаются также ИС драйвера, которые в силовом применении помогают увеличить плотность мощности и эффективность. Кроме микросхем драйверов, портфолио силовых продуктов включает MOSFET, HITFET, ключи, регуляторы напряжения, Boost и Buck DC/DC-преобразователи — компоненты, специально разработанные для гибридных автомобилей.

Цифровые и аналоговые датчики магнитного поля оптимизированы для измерения тока, положения, расстояния, направления или скорости. Датчики Холла отличаются высокой функциональностью, а ГМР датчики скорости и угла дают больший рабочий воздушный зазор, меньший джиттер, что в целом допускает более точные и надежные измерения [2, 9]. Infineon известна также разработками автомобильных датчиков давления и температуры.

Ассортимент микроконтроллеров предоставляет возможность выбора от 8- до 32-битных устройств семейства TriCore для управления батареями, контроля DC/DC-преобразователей, электрических приводов и главной системы powertrain. МК Infineon обеспечивают масштабируемые характеристики, работу в реальном времени и специализированные признаки безопасности. Для достижения максимальной производительности ресурсов созданы низкоуровневый драйвер AUTOSAR и другие средства.

SiC и GaN — ключевые технологии будущего силовых HEV/EV-устройств

В настоящее время автопроизводители, поставщики первого порядка (tier one) и компании, выпускающие полупроводники, активно занимаются улучшением IGBT-технологии.

Согласно данным Yole Development, силовые модули составляют примерно 50% цены инвертора и преобразователей в HEV и EV автомобилях, а поэтому главной целью многих производителей является снижение цены силовых модулей. В последующие годы ожидается снижение цены на 25% [4].

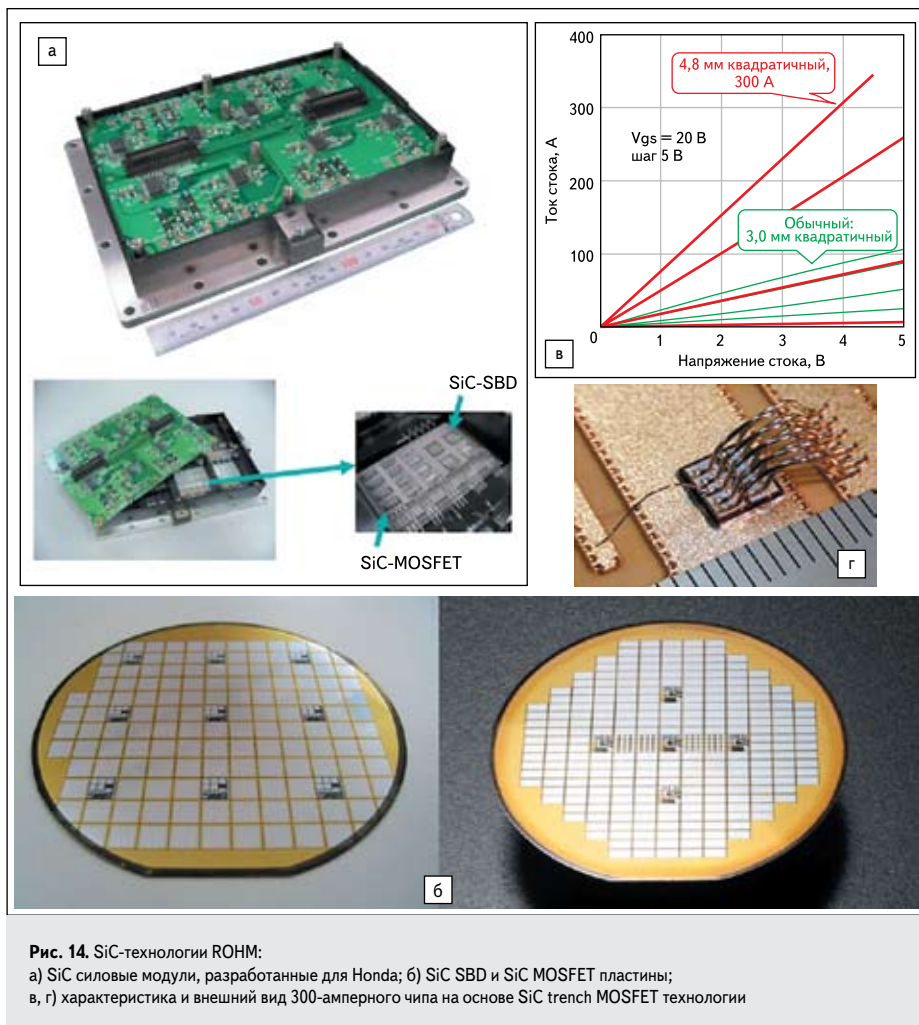


Рис. 14. SiC-технологии ROHM:

а) SiC силовые модули, разработанные для Honda; б) SiC SBD и SiC MOSFET пластины; в, г) характеристика и внешний вид 300-амперного чипа на основе SiC trench MOSFET технологии

University Graduate School of Engineering) достигнуто значительное увеличение тока до 300 А для однокристалльного MOSFET-устройства на основе технологии SiC trench с низким сопротивлением (рис. 14в).

До настоящего времени токовая емкость SiC ограничивалась. Для того чтобы увеличивать ток, необходимо снижать сопротивление ON-resistance при одновременном увеличении поверхностной области чипа. Хотя одним из признаков SiC-технологии являются хорошие характеристики ON-resistance, увеличение площади приводило к дефектам кристалла и сбоям. ROHM адаптировала для этих целей эпитаксиальную технологию, что позволило расширить площадь чипа в 2,5 раза, с 3×3 до 4,8×4,8 мм. Параметр ON-resistance был понижен на 20%.

ROHM и далее будет работать над совершенствованием технологии SiC для применения ее в гибридах.

Различные компании — не только ROHM, но и Mitsubishi, Toyota — разработали прототипы инверторов, основанные на SiC диодах и переключателях, которые показывают значительное снижение размера: до 1/4 размера кремниевых устройств.

SiC характеризуется следующими преимуществами в HEV/EV-применениях (лучшая плотность мощности, меньшие потери, более высокие рабочие температуры), но ценовой фактор важен и здесь. Применимость SiC-переключателей первостепенна, поскольку она будет допускать снижение цены охлаждающих систем.

По данным Yole Development [11], рынок SiC-устройств составил в 2008 году \$2,6 млрд в \$12-миллиардном бизнесе силовых дискретных компонентов, основанных на кремнии. EV/HEV и PV инверторы (PhotoVoltaic — фотовольтаика) будут характеризоваться самым высоким CAGR (>15%/год). Но ввиду их цены Yole Development ожидает, что только ~4% кремниевых дискретов будет замещено SiC-аналогами в 2019 году. Низковольтные применения (<1,2 кВ) составляют подавляющее большинство продаж SiC-устройств, но в следующие два года возможно расширение диапазона до среднего (1,2–1,7 кВ), а с 2013–2014 годов ожидается возникновение высоковольтных применений — вместе с технологическими улучшениями и снижением цены. Для снижения цены, прежде всего, важны два аспекта: цена SiC-субстрата в \$/мм² и цена производства SiC-устройств, с акцентом на процесс эпитаксии.

Внедрение SiC-технологии в автомобильную промышленность EV/HEV намечен в 2014 году.

В 2008 году данный рынок достиг \$23 млн, в 2009 году ожидаются сходные показатели, а в 2014 году рынок будет приведен к объемам \$100 млн. В дальнейшем данный рынок будет оцениваться в сотни миллионов долларов, с доминированием применений в инверторах EV/HEV и PV.

Но в 2014 году в EV/HEV-область намечено внедрение кремний-карбидной (SiC) технологии для следующего поколения инверторов, альтернативой которой является GaN-технология.

Применение альтернативных полупроводниковых материалов типа карбида кремния обусловлено большими потерями при переключении, типичными для кремниевых материалов. Применение SiC позволяет значительно сократить эти потери, снизить размер и повысить эффективность силового модуля.

Большинство существующих и новых EV/HEV-производителей работает и над SiC-, и над GaN-технологиями. В диапазоне напряжений 600–1200 В технологии GaN являются серьезным конкурентом для SiC, во многом благодаря лучшему соотношению характеристики/цена в сравнении с SiC. Toyota и другие компании рассматривают данное решение.

Компания ROHM, поставщик полупроводников, осуществила разработку SiC trench MOSFET с низким сопротивлением ON-resistance (сопротивление в течение работы) со способностью работать на 100 А с площади 3×3 мм. Но ввиду существования потребности в силовых модулях для электрических автомобилей и других средств передвиже-

ния, требующих минимальную токовую емкость в 600 А, усовершенствования технологии продолжались. Токовая емкость, например, может быть повышена до 200–300 А при параллельном включении нескольких чипов с большой областью затвора (размеры кристаллов превышают 10×10 мм), с применением проводных соединений.

Работая с Honda, компания ROHM несколько ранее анонсировала о своем намерении усовершенствовать SiC-полупроводники в автомобильных гибридах. На основе технологии ROHM MOSFET, диодов Шоттки и опыта Honda в корпусировании высокомоощных устройств партнеры разработали модуль инвертора на 1200 В и 230 А (289 кВА) (рис. 14а, б, [5, 10]).

При использовании SiC вместо кремния устройства ROHM SiC DMOS и SiC SBD (Schottky-Barrier Diode) дают 1/4 потерь переключения. Одновременно допускается в 4 раза более высокая переключающая ШИМ частота, которая может быть увеличена с 20 кГц для кремниевой версии IGBT до 80 кГц для SiC MOSFET и диодов Шоттки. Более высокая частота может снижать размер и цену компонентов.

Летом 2009 года сообщалось, что совместно с университетом инжиниринга Киото (Kyoto

Принятие SiC-технологии будет связано с процессами квалификации для конкретной промышленности (особенно для автомобильного сектора). В следующем десятилетии при выполнении этих условий Yole Development допускает \$800-миллионный размер рынка SiC-устройств.

Автомобильные условия эксплуатации и безопасность

Автомобильные условия эксплуатации приводят к специфическим требованиям к полупроводниковым устройствам систем powertrain [2, 3, 5, 8, 12].

Тепловая среда, в которой находятся электронные устройства, может достигать 150 °С. Двигатель, трансмиссия достигают даже более высоких рабочих температур, до 200 °С. Температура в камерах сгорания достигает 500 °С, где работают датчики давления. Выхлопные системы работают с датчиками при температурах порядка 800 °С, колесные системы, системы электронного торможения и рулевого управления — при температурах до 300 °С. Автомобильные условия эксплуатации предполагают, в частности, холодный старт двигателя, работу автомобильных систем в условиях низких температур и их перепадов.

Поскольку ECU устанавливаются близко к системе, не только для датчиков, но и для силовых полупроводников критическим фактором является их переходная температура, превышение которой становится причиной многих сбоев.

Во многих автомобильных применениях силовое устройство должно работать в режимах получения мощности, что означает необходимость в соответствующих схемах теплового управления.

Автомобильное электрическое окружение также отлично от других силовых систем, поскольку характеризуется снижением напряжения или перенапряжением при старте, например, при запуске от аккумулятора другого автомобиля, переходными процессами, сгенерированными системами альтернатора или системой зажигания, реле, соленоидами или другими устройствами.

Ввиду того, что в гибридах используются высокие напряжения, особое значение приобретает автомобильная безопасность.

Важен непрерывный мониторинг гальванической изоляции батареи, что требует осуществления сенсорных функций батарейной системы и микропроцессорного управления, включения и отключения ее в любых сбойных ситуациях. Доступ пользователя к высоковольтным терминалам также должен быть блокирован.

Плагинные гибриды, помимо обычных мер безопасности, отличаются требованием обеспечения безопасности подзарядки.

Батарейная аккумуляторная система Mercedes-Benz S 400 BlueHybrid, которую производит Continental, состоит из блока литий-ионных ячеек с контроллером и системы мониторинга со схемой супервизора ячеек, которая обеспечивает функции батарейного управления, а также высокопрочного корпуса, охлаждающего геля, пластины радиатора, системы охладителя и высоковольтных соединителей. Интегрированная схема контролирует общее батарейное состояние, температурные и энергетические характеристики системы в процессе эксплуатации, своевременно выполняя ее блокировку.

В данном автомобиле реализована семилуровневая концепция безопасности гибридной технологии, согласно которой все компоненты надежно изолированы, литий-ионная батарея помещена в высокопрочный стальной корпус с дополнительным креплением. В случае сбоя высоковольтная система будет автоматически выключена, при аварии — за доли секунд.

Заключение

Обзор, выполненный в данной статье, проводился с целью показать общие стратегические направления в автомобильном бизнесе, существующие сегодня на мировом рынке, обозначить роль электронных систем и компонентов и дать информацию об актуальных технологиях, разработанных ведущими производителями для осуществления своих стратегических намерений.

Дополнительную информацию можно получить на сайтах компаний, перечисленных в статье: автопроизводителей, системных поставщиков и фирм, выпускающих полупроводники. ■

Литература

1. Сысоева С. Взгляд на современный рынок автомобильных датчиков. Основные тенденции и важнейшие рыночные фигуры // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
2. Сысоева С. Новые тенденции и перспективные технологии автомобильных датчиков систем powertrain и контроля эмиссии. Часть 1. Состояние и перспективы рынка датчиков положения, скорости, датчиков концентрации кислорода (газа), массового расхода воздуха и давления // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
3. Сысоева С. Новые тенденции и перспективные технологии автомобильных датчиков систем powertrain и контроля эмиссии. Часть 2. О датчиках температуры и обо всех остальных // Компоненты и технологии. 2006. № 8.
4. http://www.yole.fr/pagesAn/products/power_electronics_for_ev_and_hev.asp
5. Frank R. Power Electronics Challenges for Hybrids // Autoelectronics. Nov/Dec 2008.
6. Frank R. Regenerative Braking Free Energy // Autoelectronics. May 2009.
7. Hamada K. Evolution of Hybrid Vehicle Electric System and its Support Technologies. Toyota Motor Corporation. APEC 2007. System Design. Feb 2007.
8. Sayeed A. Putting the electrical power in hybrid powertrains. Infineon Technologies // Autoelectronics. May/June 2007.
9. Сысоева С. Магнитоуправляемые, MEMS и мультисенсорные датчики движения 2009 года — функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников // Компоненты и технологии. 2009. № 8.
10. <http://www.rohm.com/ei/pdf/embedded-ideas04-e.pdf>
11. <http://www.yole.fr/pagesAn/products/sic.asp>
12. Wagner G., Craig A. Functional power solutions for powertrain. Fairchild Semiconductor // Autoelectronics. May, 2006.