

Датчики инерции за пределами автомобильных применений

В статье представлен обзор обновлений линеек продукции ведущих производителей датчиков инерции — акселерометров и гироскопов. Особое внимание уделено новым предложениям MEMS-компонентов и сенсорных технологий для актуальных в 2007 году автомобильных и неавтомобильных применений — в связи с экспансией компонентов автомобильного уровня исполнений на смежные рынки.

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Введение

Непрерывное увеличение роли автоэлектроники в повышении характеристик и комфорта автомобилей приводит к большому количеству датчиков в автомобиле. Так, новое исследование 2006 года Strategy Analytics “Automotive Sensor Demand Forecast 2004 to 2013” предсказывает, что уже в 2007 году объем рынка автомобильных датчиков достигнет \$11,2 млрд, с ежегодным приростом в 10,7%. Исследовательская компания считает, что ввиду планируемого законодательного повышения автомобильной безопасности, характеристик и уровня элементов/атрибутов новых автомобилей увеличится и спрос на автомобильные датчики, объемы продаж которых уже в 2013 году достигнут более чем 3,4 млрд единиц и \$17,1 млрд в денежном выражении.

Strategy Analytics ожидает, что с 2005-го по 2010 год средний годовой прирост CAGR производства легковых автомобилей составит 3,6%, но в этот же самый временной период рынок автомобильных датчиков будет увеличиваться с приростом CAGR в 9,8% — в связи с реакцией автомобилестроителей на законодательные требования повышения экологии, безопасности, топливной эффективности и рыночные ожидания потребителя.

Объем журнальной статьи не позволяет рассказать обо всех изменениях на рынке автомобильных датчиков, отмеченных автором. Но можно выделить основную тенденцию — объемы продаж и предложения компонентов зависят именно от применений, а не от новых технологий. Хотя в автоэлектронике всегда происходит развитие новых технологий, и сейчас появляются новые компании и укрепляются рыночные позиции известных производителей.

Согласно недавним отчетам IC Insights “Optoelectronics, Sensors and Discretes (O-S-D)” рост автомобильной автоэлектроники помогает управлять рынком полупроводниковых датчиков и актуаторов, что приблизительно

удваивает скорость продаж ИС. Прогнозируется 19%-ный рост продаж этих устройств в 2007 году — до \$6,3 млрд, вслед за увеличением приблизительно на 18% до \$5,3 млрд, достигнутым в прошлом году. Ожидается, что этот рынок достигнет приблизительно \$12,7 млрд в 2011 году, что отражает приблизительно 30%-ный совокупный средний темп роста между 2001-ым и 2011 годами.

Также, согласно исследованиям IC Insights, автомобильные применения будут составлять примерно до 37% всех продаж датчиков/актуаторов к 2011 году. Эта доля весьма значительна, но несколько лет назад в данном сегменте рынка был достигнут уровень в 60%.

Важнейшими автомобильными применениями, для которых многие фирмы-производители датчиков предлагают сегодня наиболее широкий ассортимент новых компонентов, являются приборы для инерциальных измерений: акселерометры, гироскопы, кластеры (блоки инерциальных измерений). Но увеличение числа предложений связано с тем, что эти компоненты востребованы промышленной и потребительской электроникой.

Мировой рынок акселерометров и гироскопов подразделяется на две большие сферы:

- рынки, требующие недорогих компонентов для мониторинга движения и событий в автомобильном бизнесе (подушки безопасности, Rollover) и в потребительской электронике (защита жестких дисков ноутбуков, считывание движения в игровых контроллерах, сотовых телефонах, стабилизация камер);
- рынки, требующие высоких рабочих характеристик и ориентированные на применение новых технологий, — это контрольно-измерительная аппаратура, военная и специальная техника, авиация и космонавтика, робототехника, контроль наклона и стабилизация платформ.

До недавнего времени большинство известных фирм, производителей датчиков движения, продвигали свои компоненты на массовый автомобильный рынок, совершенств-

вляя технологии производства с целью снижения цены, а рынки, требующие датчиков с высокими рабочими характеристиками и допускающие высокую цену устройств, создавали потребность в новых технологиях, но не могли дать толчок для их бурного развития.

Цель статьи — представить обзор новых предложений датчиков для автомобильных применений. Но в связи с тем, что автомобильные применения датчиков движения явно потеснены промышленными и потребительскими, и многие фирмы-производители пытаются завоевать рынки контрольно-измерительной и другой специальной техники, совершенствуя технологии производства акселерометров и гироскопов и добиваясь повышения их рабочих характеристик, получился обзор, выходящий за пределы автомобильной тематики.

Подробнее об актуальных автомобильных применениях акселерометров и гироскопов

Наиболее массовым и широко известным является применение MEMS-акселерометров для определения значительных ускорений и замедлений и развертывания подушек безопасности [1].

Например, компания **Robert Bosch GmbH** поставляет на автомобильный рынок широкую линейку high-g акселерометров (с диапазоном 35–200 g) для систем подушек безопасности (SMB05x, SMB06x, SMB200, SMB190, SMB180, SMB120_170). SMB48x_49x — датчики ускорений до ± 480 g — представляют собой MEMS-акселерометры уже третьего поколения с цифровым двухпроводным токовым интерфейсом PSI5, допускающим синхронную и асинхронную передачу данных (PAS4). Для устройств третьего поколения характерно наличие ASIC с преобразователем «емкость/цифровой код» и полностью цифровая обработка сигнала.

MEMS-устройства сегодня используются и в автомобиле, и за его пределами [1–9].

Можно выделить и такие важнейшие применения акселерометров, как:

- АБС;
- система динамической стабилизации (ESC — Electronic Stability Control);
- контроль крена и боковых опрокидываний (Rollover sensor);
- контроль боковой устойчивости (RSC — Roll Stability Control/ARC — Anti Roll Control);
- контроль вибрации и детонации двигателя и коробки передач;
- электронно-управляемая подвеска (ECS — Electrically Controlled Suspension);
- электронная парковка тормозов (EPB — Electronic Parking Brake);
- противоугонные системы с контролем наклона, подъема и даже проверкой сердцебиения нарушителя;
- помощь при старте на холмах (HSA — Hill Start Assistance);
- системы контроля давления накачки шин (TPMS — Tire Pressure Monitoring System);
- защита пешеходов;
- IMU.

Например, до недавнего времени в АБС практически не использовались акселерометры, работа АБС была основана только на анализе информации от датчиков скорости при проскальзывании колеса. Так как все колеса могут скользить одновременно, и датчики скорости не дают в этом случае читаемую системой информацию, новые полноприводные автомобили и новые АБС с высокими рабочими характеристиками анализируют продольное ускорение — для определения движения каждого колеса.

ESC/VSC/VDC — это активная система, которая определяет нестабильные условия управления и применяет корректирующие действия автоматически, помогая водителю усилить управление именно в начале обнаружения ускорения. ESC работает, осуществляя сенсорный мониторинг фактического движения автомобиля, и сравнивает получаемые данные с информацией о намерениях водителя. В новых автомобилях гироскоп, low-g акселерометр, датчик скорости колеса и датчик угла поворота руля помогают системе предсказывать курс автомобиля и сравнивать его с фактическим по показаниям гироскопа и датчика угла поворота руля. Акселерометр low-g как часть ESC необходим для обнаружения и измерения бокового ускорения, интегрирование которого дает информацию об угловой скорости. Для тех же целей может использоваться двухосевой акселерометр или гироскоп.

В кризисных ситуациях система ESC с помощью электроники двигателя и тормозной системы стабилизирует автомобиль. Если параметры курса изменяются или обнаруживается боковое ускорение, прикладывается торможение на одно колесо или применяется снижение крутящего момента.

В современных автомобилях и системах также измеряется продольное ускорение

и наклон, если автомобиль является полноприводным или характеризуется такими дополнительными функциями, как автоматический холм-старт (Hill Start Assistant) или EPB (Electronic Parking Brake). Вертикальное ускорение измеряется в системах контроля подвески и детектирования крена/опрокидываний (Rollover). Так, ECS адаптирует подвеску автомобиля к условиям управления, принимая в расчет скорость, дорожную поверхность, требования останова или ускорения.

Относительно новым применением является контроль вибрации двигателя или коробки передач. Например, выключение нескольких цилиндров для экономии топлива или регулярное переключение двигателей гибридных автомобилей создает вибрацию корпуса автомобиля. Новым решением является демпфирование вибрации, обнаруживаемой акселерометром.

Для многих названных применений широкий ассортимент акселерометров предлагают, например, компании Analog Devices или VTI ([1–6], о текущих предложениях акселерометров VTI и ADI подробно рассказывается далее.

Ключевые автомобильные применения, для которых разрабатываются новые гироскопы, это:

- обнаружение крена машины и боковых опрокидываний (Rollover);
- навигационные системы (GPS и другие);
- ESC, а также АБС;
- IMU.

Например, гироскопы для детектирования крена и систем навигации — датчики угловой скорости в диапазонах $\pm 240^\circ/\text{с}$ и $\pm 80^\circ/\text{с}$ выпускает компания Robert Bosch (SMG040, SMG060/1). Для ESC необходимы датчики диапазонов до $\pm 300^\circ/\text{с}$ с низким шумом (менее $0,5^\circ/\text{с}$) и низкой чувствительностью к вибрации. Для этих применений можно порекомендовать, например, гироскопы ADXRS300 Analog Devices.

В автомобильных системах безопасности и комфорта автомобилей класса high-end также востребованы гироскопы, мигрирующие, например, от потребительских применений — таких как контроль многих входных данных и стабилизация видеокamera. Гироскопы могут применяться и для корректировки высоты и стабильности подвески в зависимости от угловой скорости крена (roll) автомобиля. При этом MEMS-гироскопы генерируют вибрацию, используя вибрационную массу, поэтому нежелательно размещать акселерометр на той же самой плате, что и гироскоп.

В апреле 2007 года Национальная администрация шоссейного движения США (National Highway Traffic Safety Administration — NHTSA) приняла федеральный стандарт безопасности FMVSS № 126, требующий с 1 сентября 2011 года наличия ESC на пассажирских автомобилях, транспортных средствах много-

целевого назначения, грузовиках и автобусах и транспортных средствах с оценкой веса в 4536 кг или меньше [9–10].

Согласно исследованиям института дорожной безопасности (Insurance Institute for Highway Safety — IIHS), ESC снижает риск серьезных аварий. При использовании системы ESC аварии с участием только одного транспортного средства будут снижены на 40%, фатальные аварии на 56%, фатальные исходы событий опрокидываний автомобилей и SUV — на 80%.

Специалисты ABI Research считают, что принятие стандарта безопасности FMVSS № 126 увеличит скорость распространения ESC: около 29% легковых автомобилей в США были оснащены ESC в прошлом году, а сейчас этой системой оснащено уже около 40% моделей 2007 года. NHTSA оценивает продажи ESC дополнительно в \$111 для автомобилей с АБС. Добавляются гидравлические клапаны, датчик курса yaw rate sensor, акселерометры, датчик угла поворота руля. Давление тормоза автоматически контролируется для всех четырех колес.

Roll stability control (RSC) изменяет динамику крена, используя гироскоп roll rate sensor (датчик с осью чувствительности к крену) и боковой акселерометр. Система может выполнять регулировку крутящего момента, выборочное торможение, регулировку подвески и изменять характеристики крена. RSC часто интегрируется с ESC или ECS и может использовать дополнительный продольный акселерометр.

О многих применениях датчиков инерциального движения более подробно можно прочитать, например, в [1–2, 7–9].

Новые предложения акселерометров и гироскопов

SMB380 — цифровой акселерометр нового поколения, выпущенный **Bosch Sensortec** — дочерней компанией Robert Bosch GmbH, образованной в 2005 году и предлагающей MEMS-датчики, сервисы применений и фаундри-сервис для рынка клиентской электроники, систем безопасности и логистики. Основным направлением деятельности компании Bosch Sensortec сейчас является именно перенос успешных автомобильных технологий Robert Bosch GmbH на смежные рынки.

Новинка — SMB380 — представляет собой трехосевой датчик ускорения low-g диапазона именно для рынка клиентских применений. Измерения ускорения в переключаемых для трех взаимно перпендикулярных осей диапазонов ± 2 , ± 4 , ± 8 g производятся дифференциальным емкостным методом. Оценочная схема преобразует трехканальный выход микромеханической структуры и переводит его в интерфейсы — SPI/I²C.

Корпус SMB380 и интерфейс адаптированы для согласования множества требований аппаратного уровня. Функции и характеристики датчика SMB380 подгоняются к требо-

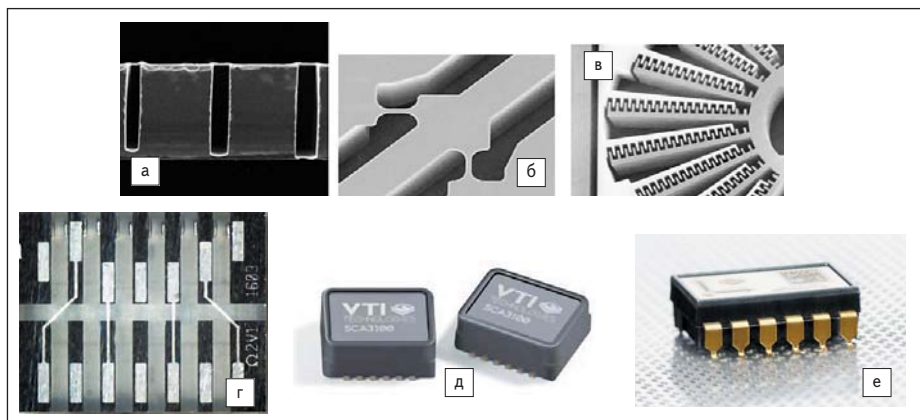


Рис. 1. Технология 3D-MEMS и новая платформа акселерометров VTI:
 а) реактивное ионное травление на высокой скорости через подложку;
 б) комбинированное глубокое/мелкое травление;
 в) травление с высоким характеристическим соотношением;
 г) вид сверху уплотненной MEMS-структуры с контактами и проводами на ее поверхности;
 д) трехосевые акселерометры серии SCA3100-D01;
 е) инклинометры SCA 103T

ваниям клиентских применений посредством настроек параметров и контроля.

В стандартном рабочем режиме SMB380 предоставляет 10-битный цифровой выходной сигнал в формате SPI/I²C; полный измерительный диапазон по командам последовательного интерфейса переключением через SPI/I²C-выход может быть выбран как ± 2 , ± 4 или ± 8 g. Для предварительной обработки измеренного сигнала ускорения в датчик включен фильтр второго порядка с верхней частотой среза 1500 Гц. Максимальная скорость преобразования данных — 3 кГц.

Дополнительная цифровая фильтрация позволяет улучшить SNR (вниз до 25 Гц). Типичный уровень шума в $0,5 \text{ mg}/\sqrt{\text{Гц}}$ и квантизация приводят к разрешению в 4 мг или точности в $0,3^\circ$ в применении измерения наклона.

Преобразователь входит в ультрамалый корпус SMD QFN размерами $3 \times 3 \times 0,9$ мм и отличается экстремально малым энергопотреблением в 200 мкА. Кроме того, в датчике реализовано несколько признаков, позволяющих поддерживать сокращение энергопотребления данным устройством и хост-системой. Так, датчик отличается гибко настраиваемой логикой, которая программируется для того, чтобы автономно оценивать профили движения. SMB380 позволяет определять наклон, движение, вибрацию и удар в сотовых телефонах, карманных компьютерах, компьютерной периферии, устройствах человеко-машинного интерфейса, элементах виртуальной реальности, игровых контроллерах.

Параллельно нормальной работе, когда значения ускорения обеспечиваются для выходных регистров, SMB380 способен выполнять внутренние вычисления результатов. Пользователь может определять пороги high-g или low-g или критерии для обнаружения профилей сглаженного движения, затем датчик информирует хост-систему об осуществлении одного из этих критериев через вывод

прерываний. Данный признак может быть полезен для многих применений, примерами которых является пробуждение хост-системы из глобального спящего режима, сигнализация удара или свободного падения.

Еще одна особенность датчика SMB380 — способность к самотестированию, которое активируется через команды последовательного интерфейса, являющиеся результатом отклонения сейсмической массы в сенсорном элементе под действием искусственно приложенной электростатической силы. Таким образом обеспечивается полное тестирование пути получения и оценки сигнала, включая микромеханическую сенсорную структуру и ASIC.

Рабочий температурный диапазон устройства $-40 \dots 85^\circ\text{C}$, с расчетом на типичные клиентские применения.

Новые предложения MEMS-устройств от Bosch Sensortec ожидаются именно для неавтомобильного рынка.

Компания **VTI Technologies**, напротив, значительно расширила линейку low-g акселерометров, предлагаемых для автомобильной индустрии. VTI Technologies известна прежде всего как глобальный лидер в производстве автомобильных датчиков ускорения low-g уровня, инклинометров и датчиков давления. Сегодня VTI разрабатывает и производит на основе оригинальной 3D MEMS-технологии кремниевые емкостные датчики, которые могут измерять ускорение, наклон, удары, вибрацию, угловую скорость, давление.

Линейка новых акселерометров и инклинометров предназначена для ESC и других автомобильных систем. Новые автомобильные акселерометры VTI — это цифровые датчики для одно- и многоосевых измерений ускорения и наклона, причем они создавались именно для новых систем, ориентированных на цифровую обработку сигнала и введение дополнительных признаков безопасности, таких как непрерывное самотестирование.

Новая сенсорная платформа включает: серия SCA8X0 — одноосевые датчики, SCA21X0 — двухосевые датчики, SCA3100 — трехосевые датчики. Признаки, общие для всех устройств, — это работа от источника питания 3,3 В и детектируемый диапазон ± 2 g, рабочая температура $-40 \dots 125^\circ\text{C}$, стабильность смещения порядка $\pm 70 \dots \pm 100$ мг, чувствительность к статическому и динамическому ускорению в частотной полосе до 30–55 Гц, устойчивость к ударам до 20 000 g, соответствие стандарту AEC-Q100.

В новом поколении сенсорных элементов используется технология 3D-MEMS, допускающая многоосевое детектирование и малые размеры ячейки ($2,6 \times 2,0 \times 1,6$ мм). Данный элемент предназначен для поверхностного монтажа на плату корпуса датчика размерами порядка $7 \times 8,6 \times 3,3$ мм, причем такие размеры предполагаются для всех видов — как одноосевых, так и многоосевых, что поддерживает высокую интегрируемость и расширенную функциональность устройства (включая самотестирование и другие функции).

Основные идеи технологии 3D-MEMS VTI состоят в следующем. Как известно, выделяются две технологии производства емкостных датчиков — объемные, представляющие собой комбинирование кремниевых, стеклянных и других подложек, и поверхностные — на основе микрообработки поверхности кремниевой подложки для создания подвешенных структур.

Классические объемные методы позволяют получать только одноосевые конденсаторные датчики, поверхностные — тонкие (до 2 мкм) и поэтому чувствительные к шумам одноосевые или двухосевые конденсаторные устройства. Интегрирование поверхностной структуры MEMS и ASIC на одном кристалле уже является предпосылкой комбинирования технологий — поверхностная MEMS-структура обычно защищается объемной подложкой.

В дальнейшем требование трехосевых измерений, интегрирование датчиков и актюаторов также станет предпосылкой для объединения технологий. Толщину поверхностной микроструктуры необходимо увеличивать, что может быть достигнуто за счет добавления к мембранной структурам подложек и создания мультиподложечных структур. Все эти идеи и осуществляются в технологии VTI, названной 3D-MEMS. Для повышения характеристического соотношения структуры (отношения высоты к ширине) реактивное ионное травление (травление агрессивным газом и распыление ионов) в 3D-MEMS замещает глубокое жидкостное химическое травление кремния.

VTI ввела три базовых процесса травления (рис. 1а–в): быстрое травление грубых паттернов через подложку, мелкое травление прецизионных паттернов и травление глубокой до 100 мкм с получением характеристического соотношения 1:25 и контролем размеров боковых стенок. Первые два процесса

часто выполняются на одной основе SOI (кремний на изоляторе).

Сенсорный элемент герметично уплотняется. VTI создала технологию, в которой покрывающая подложка на основе стекла с большим числом вертикальных кремниевых включений анодно присоединяется к одной или двум сторонам MEMS-подложки. Покрывающая подложка может быть металлизирована на стороне MEMS — для того чтобы образовывать планарные электроды и электрические выводы на ее поверхности (рис. 1г). Толщина покрывающей подложки может изменяться от 150 до 700 мкм. Обеспечиваются следующие условия: низкая паразитная емкость, высокое сопротивление изоляции и низкое контактное сопротивление.

Двойная симметричная конденсаторная структура улучшает нулевую стабильность, линейность и поперечную чувствительность (менее 3%) 3D-MEMS акселерометра. Температурная зависимость — менее 0,05 полной шкалы/°C. В зависимости от применения акселерометры VTI могут подгоняться к требуемой чувствительности и частотному диапазону. Коммерчески доступны как устройства, чувствительные в плане ИС, так и в Z оси, а также трехосевые устройства (рис. 1д), двух- или трехкристальные исполнения.

VTI Technologies сегодня поставляет на автомобильный рынок приблизительно 25 млн датчиков.

Как уже упоминалось, главной областью применения новых акселерометров являются сенсорные кластеры для ESC. Датчики ускорения low-g уровня VTI используются, например, как часть ESC для обнаружения малых заносов. Требования к такому датчику, устанавливаемому VTI, включают устойчивость к ударам, вибрации и загрязнениям, работу в диапазоне температур $-40...+125$ °C, срок службы 15–20 лет.

Применения датчиков, помимо ESC, включают помощь при старте Hill Start Assistant (HSA), электронную парковку тормозов Electronic Parking Brake (EPB), поддержание устойчивости в условиях крена и детектирование крена или боковых опрокидываний (Rollover), электронно-управляемую подвеску или контроль вибрации двигателя. Опции для конкретного автомобиля реализуются через ECU или дизайн сенсорных кластеров.

Согласно концепции VTI, за пределами автомобильной промышленности также привлекательна надежность датчиков автомобильного уровня исполнения. С высокоточной калибровкой и температурной компенсацией могут быть построены датчики уровня исполнений измерительной техники instrumentation-grade, в которых автомобильные датчики VTI используются как встроенные блоки.

Инклинометры VTI T-серии разрабатывались для особенно жестких рабочих сред. SCA61T, SCA100T и SCA103T — датчики с высокими рабочими характеристиками, но от-

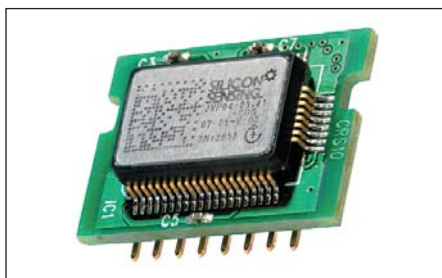


Рис. 2. Датчик угловой скорости CRS10 компании Silicon Sensing

личающиеся доступным ценовым уровнем. Серия SCA103T (рис. 1е) на основе дифференциального измерительного принципа предназначена для компенсации всех ошибок обычных режимов и шумовых эффектов. Использование инклинометра SCA103T позволяет достичь разрешения в 0,001° и долговременной стабильности менее чем 0,004°. Датчики T-серии коммерчески доступны по цене 24 евро за штуку при условии заказа партии в 1000 штук.

Не столь радикально, как VTI, но обновили или дополнили свои линейки и другие компании, работающие в сфере проектирования и производства датчиков инерции для автомобильных применений.

Silicon Sensing — совместное предприятие компаний BAE Systems и Sumitomo Precision Products, являющееся глобальным лидером на рынке кремниевых гироскопов MEMS для автомобильных и клиентских применений. Гироскопы Silicon Sensing отличаются высокой надежностью, устойчивостью к ударам и вибрации и высокими рабочими характеристиками [7].

CRS10 (рис. 2) — самый последний цифровой MEMS-гироскоп автомобильного уровня исполнения, разработанный компанией для массового производства. Одноосевой гироскоп предназначен для измерения угловых скоростей с цифровым выходом SPI (фиксированный диапазон ± 300 °/с) или программируемым пропорциональным аналоговым выходом для стандартного диапазона ± 75 °/с (выходной интерфейс конфигурируется пользователем). Питание датчика осуществляется от униполярного постоянного напряжения питания 5 В. Устройство позволяет получать информацию об угловой скорости в частотном диапазоне до 1 кГц.

Рабочий температурный диапазон $-40...+125$ °C.

Точность гироскопа $<\pm 4\%$ для аналогового выхода и $<\pm 1\%$ для цифрового, температурная чувствительность $<\pm 2,25\%$ и $<\pm 2\%$ соответственно, нелинейность для обоих типов выходов специфицируется менее чем в 0,15%.

Технология silicon ring обеспечивает характеристики, стабильные по времени и температуре, с одновременным устранением проблем чувствительности к креплению монтажа simple beam или tuning fork датчиков.

Датчик CRS10 представляет собой незакорпусированный модуль гироскопа, размещенного на плате, со штыревым электрическим интерфейсом и массой менее 10 г. Такое исполнение обеспечивает высокую интегрируемость CRS10, который на основе испытаний сконструирован как датчик с крышкой, защищающей его от повреждений. Для облегчения монтажа доступны также скобы поверхностного монтажа.

Systron Donner Automotive — мировой лидер в дизайне и производстве изделий для инерциальных измерений с высокими рабочими характеристиками для систем автомобильной безопасности (рис. 3). Согласно недавним данным, более чем в 40 млн автомобилей использованы надежные кварцевые MEMS-гироскопы Systron Donner Automotive, которые теперь компания намерена применять для морских и внедорожных транспортных средств.

Сенсорная система MicroGyro (рис. 3б) исполнения inertial-rate с высокими рабочими характеристиками в одном блоке поверхностного монтажа малого размера включает кварцевый tuning fork MEMS-датчик и ASIC. Кварц MicroGyro может противостоять нагреву до 125 °C без ухудшения его рабочих характеристик, что исключает необходимость монтажа в пассажирской кабине и расширенных в таком случае кабельных проводках. Другие отличительные признаки MicroGyro включают цифровой интерфейс SPI и применение технологии СВИТ, непрерывно контролирующей состояние датчика (не в определенных интервалах).

Следующие примеры показывают, что в этом году многие компании ориентируются на захват не столько автомобильного, сколько смежных целевых рынков промышленной и потребительской электроники.

Так, компания **Memsic**, которая является ведущим поставщиком интегральных low-g акселерометров для низкочастотных применений, постоянно расширяет линейку своих датчиков и сейчас выпускает трехосевые датчики MXR9150M/ MXR9500M с аналоговым выходом в SMT-корпусе ($7 \times 7 \times 1,8$ мм) — для GPS и потребительской электроники. Особенно этой технологией является использование вместо твердотельной инерционной массы нагретого воздушного шарика, перемеща-

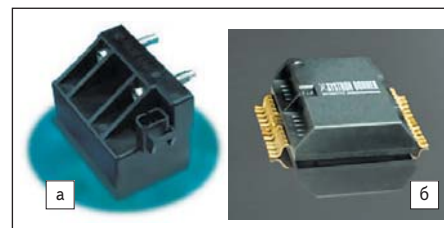


Рис. 3. Примеры новых автомобильных гироскопов Systron Donner Automotive: а) автомобильный датчик AQRS; б) новый гироскоп MicroGyro

ющегося под действием ускорения внутри ИС вследствие тепловой конвекции, что обеспечивает устойчивость к ударным воздействиям до 50 000 g [6].

Для автомобильных систем (охранной безопасности, активной подвески, АБС, контроля положения фар, различных применений контроля наклона) и других применений компанией предлагается, например, low-g ($\pm 1,7$ g) акселерометр MXR6500G/M. Максимальный шумовой порог этого устройства составляет на частоте 1 Гц 1 мг/√Гц.

MMA73x0L **Freemove** — новое семейство трехосевых XYZ-датчиков ускорения low-g диапазона с аналоговым выходом — для определения падения, наклона, движения, положения, вибрации и удара вследствие воздействий ускорений low-g уровня. Датчики ускорения предназначены для multifunctional применений и встроенных систем, причем по всем трем осям диапазоны детектирования ускорения можно выбирать между 1,5/6 g, 3/12 g или 4/16 g. Целевые рынки включают потребительский, промышленный, медицинский и компьютерный, датчики могут применяться и в сейсмологии. Автомобильные применения включают навигационные системы и детектирование крена.

Компания **Kionix** разрабатывает и производит кремниевые MEMS-датчики инерции с высокими рабочими характеристиками, преимущественно для автомобильных задач. Здесь используется плазменная технология глубокого реактивного травления кремния, основанная на исследованиях Корнеллского университета [5]. По мнению представителей компании, в потребительских применениях востребована надежность автомобильных датчиков, а автомобильные применения должны заимствовать от потребительских комбинирование большей функциональности с меньшим размером сенсорного устройства. В этом году представлен первый трехосевой акселерометр Kionix для рынка потребительской электроники, который предназначен для таких применений, как защита жесткого диска, считывание признаков движения в сотовых телефонах и игровых контроллерах.

Акселерометр серии KXR94 компании Kionix представляет собой датчик с высокими рабочими характеристиками для клиентских и автомобильных систем электроники. Диапазон полной шкалы ускорения, который составляет ± 2 g, измеряется по всем трем осям датчиком в корпусе DFN с размерами 5×5×1,2 мм. Четыре программируемых при производстве режима работы включают цифровой SPI и мультиплексированный аналоговый интерфейс. Устройство может также программироваться на диапазоны в ± 1 g по всем трем осям, допуская лучшее разрешение в применениях коррекции наклона компаса. Очень низкая шумовая плотность (50 мкг/√Гц) на всех трех осях позволяет применять устройство в точных системах навигации. Потреб-

ление тока составляет приблизительно 1 мА на 3,3 В напряжения питания.

Компания **ST Microelectronics** также предлагает на рынки автомобильной и потребительской электроники портфолио MEMS-датчиков движения — линейных акселерометров в одно-, двух- и трехосевом исполнении [5].

К существенным обновлениям 2006 года ассортимента low-g линейных акселерометров можно отнести два трехосевых устройства LIS302 (рис. 4а). Они отличаются малым формфактором и низким энергопотреблением (1 мВт). Функциональность этих устройств предназначена именно для потребительских применений — защиты жестких дисков, игровых устройств и других. Эти датчики представляют собой устройства с ультрамалыми размерами корпуса LGA (3×5×0,9 мм), устойчивые к ударам и вибрациям до 10 000 g.



Рис. 4. Новые акселерометры STMicroelectronics: а) внешний вид трехосевых датчиков LIS302; б) двухосевые датчики LIS244AL

LIS302DL — датчик со стандартным SPI/I²C цифровым интерфейсом и двумя независимыми программируемыми сигналами прерываний. Два раздельных сигнала могут осуществлять мониторинг событий free fall или high-g motion одновременно, используя различные пороги — к примеру, для различения свободного падения и скатывания. Аналоговый датчик LIS302ALB обеспечивает раздельные выходы по всем трем осям (X, Y, Z) и мультиплексированный сигнал.

Помимо защиты жестких дисков, применения трехосевых датчиков включают анализ вибрации, противоударные и навигационные системы, пользовательские интерфейсы в мобильных и игровых устройствах.

В 2007 году портфолио линейных акселерометров пополнилось двумя ультракомпакт-

ными двухосевыми low-g датчиками — аналоговым LIS244AL (± 2 g) и LIS202DL ($\pm 2/\pm 8$ g) с цифровым I²C/SPI интерфейсом.

В одном корпусе нового акселерометра LIS244AL (рис. 4б) — MEMS-датчик и CMOS-чип, который, в свою очередь, предоставляет два аналоговых выхода продольного и бокового ускорения. LIS244AL обеспечивает низкий шумовой уровень и сниженное энергопотребление, что важно для батарейных систем. Размеры корпуса составляют 4×4×1,5 мм, устойчивость к ударам — до 10 000 g, реализована встроенная функциональность самотестирования.

LIS244AL предназначен для диапазона применений, чувствительных именно к размерам корпуса и потреблению мощности, а также для противоударных систем, систем удаленного контроля, интеллектуального управления при детектировании движения, спортивных и медицинских устройств. LIS244AL в объемах массового производства стоит всего \$2,3 для партий от 10 000 штук.

И другие компании в этом году представили свои новые разработки акселерометров.

Компания **Endevco Corporation** (<http://www.endevco.com>) группы Meggitt, являющаяся лидирующим разработчиком и производителем динамической контрольно-измерительной аппаратуры для анализа вибрации, удара и давления, предлагает линейку пьезоэлектрических, пьезорезистивных, ISOTRON® и емкостных акселерометров для решения проблем измерений в различных промышленных сферах, включая аэрокосмические, автомобильные, оборонные, медицинские, промышленные и морские [4].

На прошедшем в этом году в Детройте мероприятии Sensors Expo & Conference компания Endevco удостоилась бронзовой награды “Best of Sensors Expo” в категории «Датчики» за разработку акселерометра модели 71, который представляет собой тонкий прочный микромеханический пьезорезистивный акселерометр с высокой ударопрочностью на основе одной кремниевой подложки, объединяющей инерционную массу и схему моста Уитстона. Его размер и низкая масса позволяют сенсору сохранять работоспособность после высокочастотных импульсных ударов, которые могут разрушить сейсмические массы низкочастотных (резонирующих в области низких частот) акселерометров.

Компания **Silicon Designs, Inc.** (SDI), известный производитель емкостных MEMS-акселерометров, поставляет на автомобильный и смежные рынки (OEM-, контрольно-измерительной аппаратуры) высокоточные и недорогие цифровые и аналоговые одно- и трехосевые модули для измерения ускорения.

Датчики ускорения, которые производятся на основе оригинальной технологии компании SDI, используют емкостной сенсорный элемент из никеля или его сплавов и ASIC [6]. Модули, которые детектируют и статическое, и динамическое ускорения, доступны

в g-диапазонах $\pm 2 \dots \pm 1000$ g; по требованию OEM-заказчика возможны клиентские диапазоны. Температурный диапазон устройств — $-55 \dots +125$ °C, в линейке продукции — и малошумящие датчики, и те, что характеризуются малым энергопотреблением. Предлагаются различные исполнения устройств, различающиеся по формфактору или типам выходного интерфейса, с разным экранированием, возможно корпусирование по специальному заказу.

С технологией производства и линейкой продукции SDI предшествующего периода можно ознакомиться в работе [6].

Обновления линейки включают одноосевые модули 2260/2264/2265 на основе ультракомпактной ячейки P-Cap и модуль 2240 — герметичную версию акселерометра 2220 (рис. 5).

Одноосевой аналоговый модуль акселерометра модели 2264, который компания представила в этом году на выставке Sensors Expo & Conference, показан на рис. 5а.

Акселерометр 2264 — это устройство с высокими рабочими характеристиками, одной из рекомендованных областей применения которого является краш-тестирование автомобилей. Датчики на основе ячейки P-Cap™ компания ввела с целью замещения пьезорезистивных датчиков в таких типичных применениях, как анализ вибрации или модальный анализ.

Датчик, построенный на основе оригинальной технологии Silicon Designs, также включает емкостной сенсорный элемент из никеля или его сплавов и ASIC. Но устройство подгоняется для работы в применениях измерительной аппаратуры в частотных вибрационных диапазонах от нулевой до средней частоты (Low-to-Medium Frequency) — от нуля (статического ускорения) до 2 кГц. Требования к таким устройствам, помимо стандартных требований монтажа и рабочих температурных пределов, включают устойчивость к электрическим шумам, типичным для окружающих рабочих условий, и совместимость с существующими системами сбора данных.

Акселерометры 2220/2240 позволяют обеспечивать чувствительность к ускорению DC (статическому). Входное напряжение — 9–32 В, выход — с низким импедансом, +2,5 В при нулевом ускорении или ± 4 В в дифференциальном режиме (рис. 5г). Частотное срабатывание — в диапазоне 0–2 кГц, предлагается включение блоков фазового согласования для диапазонов 50 г и выше.

Три версии новых датчиков 2260/2264/2265 ускорений в диапазонах $\pm 5 \dots \pm 200$ g (возможны и другие диапазоны по требованию) изготавливаются в корпусах с уменьшенными размерами — $25,4 \times 16$ мм (для сравнения, габариты 2220 составляют $25,4 \times 25,4$ мм). Их отличия — двойное экранирование, дифференциальный выход, температурный диапазон до $-55 \dots +125$ °C. Время настройки и калибровки сокращается, смещение является ма-

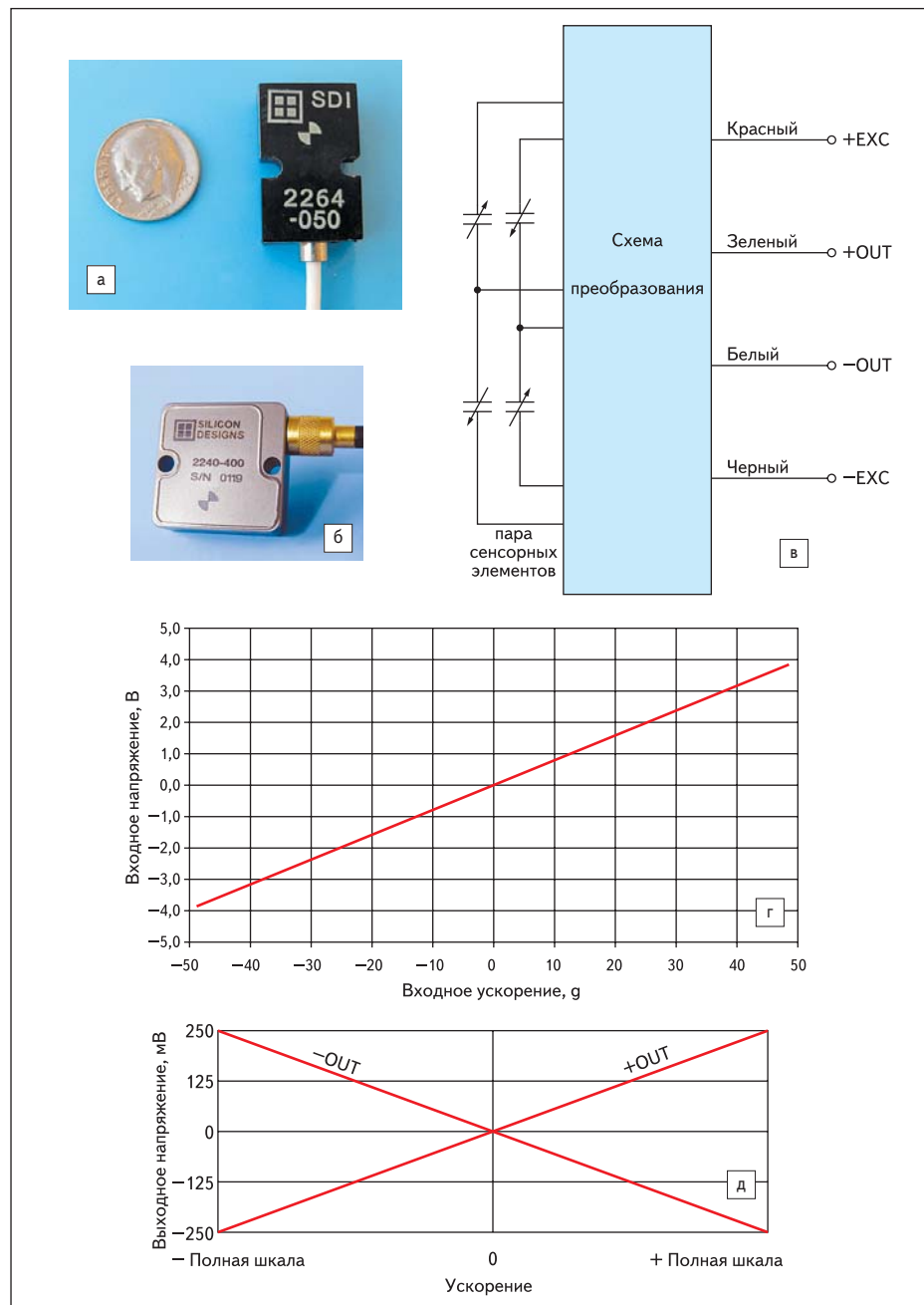


Рис. 5. Новые акселерометры Silicon Designs:

а) аналоговый модуль акселерометра P-Cap™ Model 2264;

б) герметичный аналоговый модуль акселерометра 2240; в) схема (цоколевка) модулей акселерометров 2264/2265;

г) дифференциальные передаточные характеристики новых акселерометров SDI (2240/2220/2260) в диапазоне 3–50 г;

д) дифференциальные передаточные характеристики акселерометров 2264

лым, что допускает расширенное масштабирование характеристики.

Для пьезорезистивных акселерометров в общем характерна меньшая чувствительность, смещение, различное для изделий партии, вариации чувствительности, температурная чувствительность, зависимость выхода от приложенного напряжения, а также хрупкость.

Внутренняя регулировка акселерометров 2264 позволяет исключить эффекты перепадов возбуждающего напряжения. В отличие от пьезорезистивных элементов, чувствительность,

смещение и частотное срабатывание акселерометров SDI меньше зависят от температурных изменений и градиентов. На чувствительность также не влияют перепады напряжения. Для единиц в партии характерен малый разброс смещения ($\pm 5\%$ полной шкалы) и чувствительности ($\pm 2-5\%$). Температурная чувствительность — менее чем 250 ppm/°C.

Акселерометры SDI отличаются высокой нелинейностью ($\pm 0,3-0,5\%$, 1% максимум), технология позволяет противостоять ударам порядка 10 000 g/c и работать при температурах выше 200 °C.

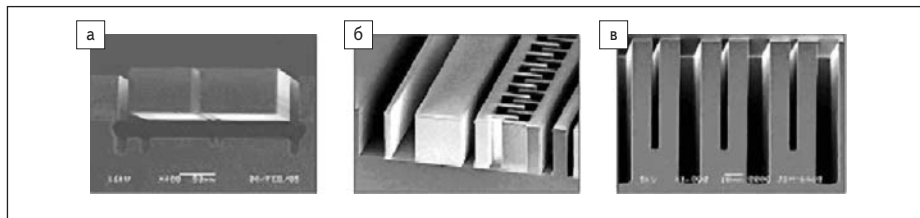


Рис. 6. SOI-технологии, применяемые компанией Tronics: а) «толстый» процесс SOI High Aspect Ratio Micromachining (SOI HARM) с высоким характеристическим соотношением 1:30; б) поверхностная микрообработка эпитаксиальных SOI-подложек; в) объемная микрообработка SOI

Новые акселерометры устойчивы к ударам порядка 5000 g, компания специфицирует типичную нелинейность в 0,15–0,4% (1–1,5% максимум при диапазонах выше 50 g), датчики обеспечивают узкие допуски монтажа. Анодированный алюминиевый корпус 2264, к примеру, уплотняется эпоксидной смолой и монтируется посредством двух или четырех винтов M3. Кабельный экран электрически подсоединен к корпусу, питающие и сигнальные провода от корпуса изолируются. Стандартная длина кабеля 1 м. Также прилагаются дополнительный лист начальной калибровки (2264-CAL) и данные периодической калибровки.

Акселерометр 2264 работает в диапазоне постоянного напряжения питания от ± 3 до ± 11 В, при этом образует два аналоговых выхода напряжения, пропорциональных приложенному в направлении Z оси ускорению (рис. 5а, в, д). Чувствительная ось перпендикулярна дну корпуса, положительным считается ускорение от силы, направленной к дну корпуса. Шумовая устойчивость оценивается в 9–200 $\text{мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$, в зависимости от детектируемого диапазона ускорения до 200 g. Выходные сигналы полностью дифференциальны и являются средними в режиме общего напряжения, которое равняется 0 В при полностью равных положительных и отрицательных значениях напряжения питания, выходы также являются нулевыми. При нулевом ускорении выходное дифференциальное напряжение составляет 0 В; при ускорении на границах диапазона полной шкалы — $\pm 0,5$ В. Работа при одиночном питании также возможна, если присоединить –ЕХС к «земле», +ЕХС к плюсу источника постоянного напряжения 6–22 В, средним значением сигналов +OUT и –OUT будет половина напряжения питания, и каждый выход будет изменяться от $\pm 0,25$ В вокруг уровня половины напряжения питания.

Рабочая температура устройства 2264 –40...+85 °С, но технология, как упоминалось, допускает большие предельные значения.

В итоге преимущества Р-Сар акселерометров складываются из малого размера, повторяемости от устройства к устройству, высокой устойчивости к электромагнитным помехам, высокоуровневого выходного сигнала с низким импедансом (1 Ом), доступности различных клиентских версий.

Но наиболее высокий уровень исполнений акселерометров и гироскопов был достигнут к настоящему времени не в автомобильных версиях датчиков, а в сенсорных устройствах для контрольно-измерительной аппаратуры. Причем и производители, занимающие данную рыночную нишу, также пополняют портфолио своих коммерческих доступных устройств, в качестве одной из потенциальных рыночных ниш рассматривая автоэлектронику.

Так, компания **Tronics Microsystems** производит и поставляет уникальные MEMS-компоненты для широкого диапазона применений. OEM-применения включают датчики (емкостные акселерометры и гироскопы, датчики давления), радиочастотные MEMS-компоненты (RF-ключи и варакторы, микромеханические резонаторы, фазовые переключатели и настраиваемые фильтры), микрожидкостные и биоMEMS (устройства с жидкой обработкой, лаборатории на чипе Lab-on-Chips, консольные детекторы), оптические MEMS (статические электростатические зеркала, сканирующие микрзеркала, электростатическая адаптивная оптика).

Геофоны или сейсмологические датчики ускорения Tronics используются для создания 3D-карт подземелий и определения залежей нефти. Tronics является партнером Sercel — мирового лидера в производстве специального оборудования на основе MEMS-акселерометров. Эти компоненты имеют следующие признаки: разрешение в 0,1 мкг, работа в режиме замкнутого цикла в частотном диапазоне от статического ускорения до динамического с частотой 800 Гц, шумовая плотность 0,01 $\text{мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Ультрамалые емкостные преобразователи движения используются также для систем управления сердечными ритмами Cardiac Rhythm Management (CRM). В этом применении востребованы высокая чувствительность, разрешение в 1 мкг, малый размер (0,8×2,7×3,1 мм), линейность 1% компонентов Tronics.

Еще один из мировых лидеров в области разработки и производства датчиков CRM — компания VTI.

Датчики угловой скорости Tronics основываются на разработанной компанией специализированной технологии с вакуумным корпусированием для OEM-применений. Отличия

данных гироскопов включают: клиентский диапазон (100°/с и 900°/с), стабильность смещения $60^\circ/\text{ч}$ для диапазона 100°/с, шумовую плотность 0,01°/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на 40 Гц для диапазона 100°/с.

Tronics — мировой лидер в применении для разработки клиентских устройств SOI MEMS-технологии. Технологии основываются на SOI-процессе с высоким характеристическим соотношением до 1:30, поверхностной микрообработке эпитаксиальных SOI-подложек и объемной микрообработке SOI (DRIE) (рис. 6).

Colibrys — следующий лидирующий поставщик MEMS, а также MOEMS (Micro Optical Electro-Mechanical) компонентов не автомобильного направления. Компания обеспечивает уникальные решения для применений, требующих высокой надежности в таких областях, как аэрокосмонавтика и военная авиация, обнаружение газа и нефти в применениях промышленной энергетики, контрольно-измерительной аппаратуры, телекоммуникационных систем. Так, компания Colibrys является партнером компании Input/Output, Inc, работающей на географическом рынке.

MEMS-акселерометры Colibrys представляют собой емкостные датчики (рис. 7а), детектирующие диапазоны ускорений порядка $\pm 1... \pm 100$ g.

Емкостной датчик (рис. 7а) в корпусе с тремя терминалами на выходе изготавливается с использованием четырех однокристалльных кремниевых подложек. Две центральные подложки анодно соединяются для образования инерционной массы, опорного фрейма и центрального электрода. Внешние подложки являются внешними электродами и присоединяются к опорному фрейму. Травление эпитаксиального слоя на внешних участках подложки массы формирует кремниевые пружины. Размеры законченного сенсорного устройства составляют приблизительно 6,5×5,5×2 мм.

Законченный датчик помещается в керамический корпус и уплотняется в вакууме. Это устройства сервотипа с функцией самотестирования.

Для достижения высоких рабочих характеристик разработана CMOS ASIC, использующая технологию переключаемого конденсатора, предназначенная и для цифровых, и для аналоговых датчиков.

Серия Si-Flex™ (рис. 7б–г) акселерометров Colibrys представляет собой решение для применений, требующих ультрамалых шумов и низкого искажения без компромисса с частотной полосой, динамическим диапазоном, стабильностью и прочностью. Применения акселерометров серии Si-Flex включают сейсмический мониторинг, стабилизацию платформ, обнаружение вторжения, контроль вибрации, модальный анализ, не исключаются и автомобильные.

Диапазон полной шкалы этих аналоговых датчиков ранжирован от $\pm 3,5$ до ± 5 g, шумо-

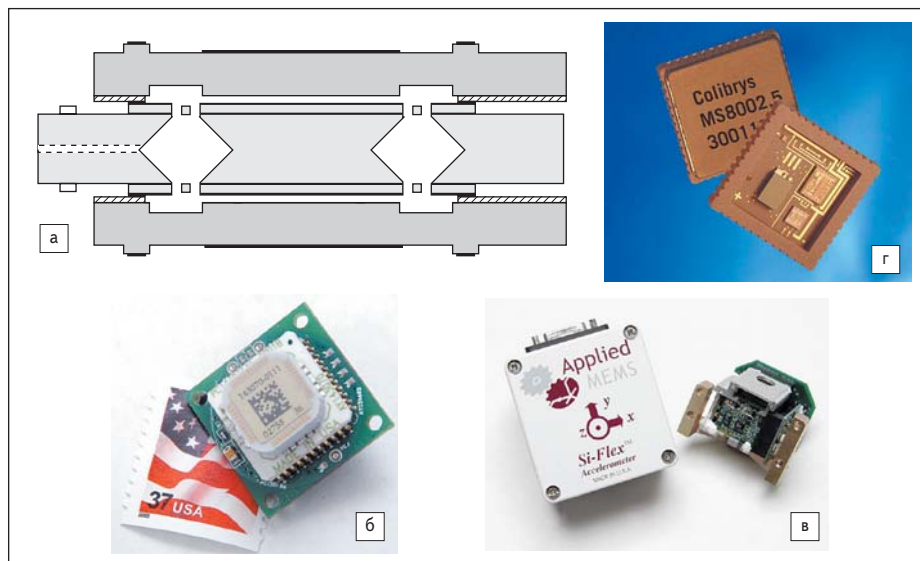


Рис. 7. Технологии акселерометров Colibrys: а) объемный микромеханический сенсорный элемент; б) одноосевые акселерометры серии Si-Flex SF1500S; в) трехосевые аналоговые модули акселерометров серии Si-Flex SF3000L; г) новые акселерометры серии MS8000

вой порог менее $250 \text{ ng}/\sqrt{\text{Гц}}$, динамическое срабатывание в пределах от 0 до 2 кГц, ударная прочность — к ускорению до 1500 g, THD <0,1%, рабочая температура $-40...+85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Серии MS7000 и MS8000 предназначены для инерциальных измерений, а также измерений наклона и вибрации. Емкостные MEMS-акселерометры серии MS8000 Capacitive Accelerometer были недавно улучшены для повышения надежности. Акселерометры в новой версии MS8000.C в отношении подгонки, формы и функций Fit, Form, Function (FFF) совместимы и доступны как стандартные изделия, являясь замещением MS8000.5, что не влияет на цену устройств (рис. 7г). Эти устройства рекомендуются для применений в GPS, инерциальной навигации и других.

За пределами стандартных акселерометров Colibrys работает по клиентским заказам.

Но самым интересным предложением среди инерциальных MEMS-компонентов считается трехосевый сенсорный кластер ADIS16350 Analog Devices (рис. 8), являющийся первой реализацией идеи по объединению акселерометров и гироскопов в одном интегральном автомобильном IMU.

ADIS16350 — первый интегрированный датчик ADI на основе технологии iSensor™, обеспечивающий законченное трехосевое сканирование угловой скорости (в диапазоне $\pm 320^\circ/\text{с}$) и линейного движения — ускорения до $\pm 10 \text{ g}$ в частотной полосе до 350 Гц посредством одного ультракомпактного модуля в корпусе, чьи размеры $22,7 \times 23,2 \times 22,9 \text{ мм}$, включающего встроенную обработку сигнала для калибровки и настройки датчика. SPI-порт, рассчитанный на передачу цифровых данных и программирования, обеспечивает доступ ко всем встроенным датчикам: гироскопам в X, Y, и Z оси; датчикам линей-

ного ускорения в X, Y и Z оси, датчику температуры, мощности, а также имеет вспомогательный аналоговый вход. Датчики инерции представляют собой прецизионно выровненные и откалиброванные по смещению и чувствительности устройства.

Системные интерфейсы упрощаются за счет дополнительных программируемых признаков: к ним относятся встроенная автокалибровка смещения, цифровая фильтрация и контролируемая скорость дискретизации, самотестирование, управление питанием, программируемый мониторинг условий с функцией alarm (предупреждение об опасности) и вспомогательный цифровой ввод/вывод.

За эту разработку — блок инерциальных измерений ADIS16350 iSensor, который включает три MEMS-гироскопа, три MEMS-аксе-

лерометра, датчик температуры в корпусе $23 \times 23 \times 23 \text{ мм}$ — компания Analog Devices Inc удостоилась серебряной награды в категории «Датчики» на выставке Sensors Expo & Conference.

В связи с активной разработкой новых устройств о датчиках инерции компании Analog Devices необходимо сказать еще несколько слов.

По последним данным, на автомобильный, потребительский и промышленный рынки продано уже свыше 250 млн датчиков на основе технологии iMEMS Analog Devices.

Ассортимент гироскопов ADXRS, которые применяются в системах автомобильной безопасности, навигации, стабилизации изображений, блоках IMU, согласно заявлениям компании, будет непрерывно расширяться, пополняясь датчиками с более высокими рабочими характеристиками и большей функциональностью, а также приемлемыми по цене.

Линейка семейства включает 6 гироскопов ADXRS150 ($\pm 150^\circ/\text{с}$), ADXRS300 ($\pm 300^\circ/\text{с}$), ADXRS401 ($\pm 75^\circ/\text{с}$), ADXRS610 ($\pm 300^\circ/\text{с}$), ADXRS612 ($\pm 250^\circ/\text{с}$), ADXRS614 ($\pm 75^\circ/\text{с}$).

ADIS Gyros — это интеллектуальные датчики iSensor, по сравнению с ADXRS iMEMS гироскопами обладающие более высокими рабочими характеристиками и дополнительной функциональностью. В линейке компании уже 8 устройств: гироскопы ADIS16100 ($\pm 300^\circ/\text{с}$), ADIS16080 ($\pm 80^\circ/\text{с}$), ADIS16120 ($\pm 300^\circ/\text{с}$), программируемые гироскопы ADIS16250 ($\pm 80... \pm 320^\circ/\text{с}$), ADIS16251 ($\pm 20... \pm 80^\circ/\text{с}$), программируемый гироскоп с температурной компенсацией ADIS16255 ($\pm 80... \pm 320^\circ/\text{с}$), датчики инерции ADIS16350 и ADIS16355 ($\pm 75... \pm 300^\circ/\text{с}$).

Ультрамалощущий ADIS16120 ($0,015 \text{ }^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$) представляет собой аналоговый гироскоп, все остальные гироскопы и датчики инерции ADIS — цифровые датчики с SPI-интерфейсом. Рабочая температура устройств ADIS — $-40...+85 \text{ }^\circ\text{C}$.

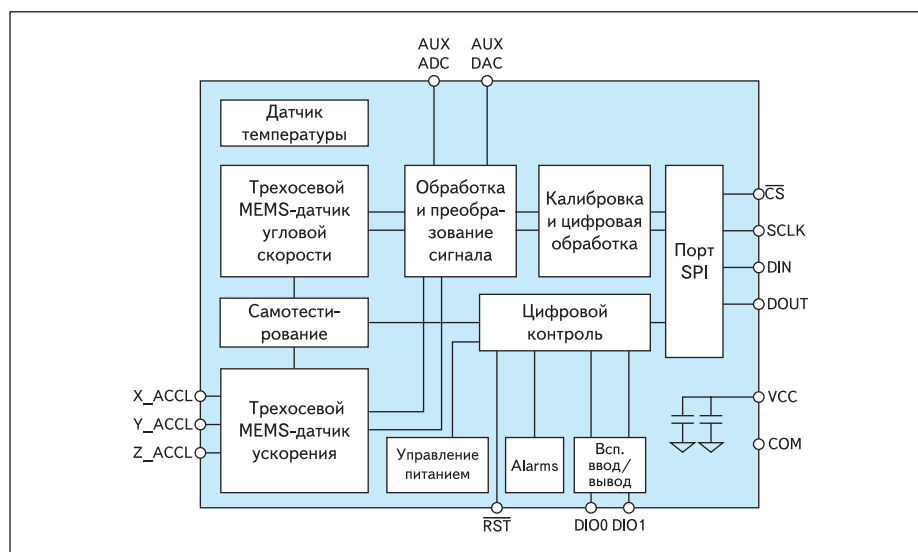


Рис. 8. Структурная схема трехосевого сенсорного кластера ADIS16350

Гироскопы ADXRS614 и ADXRS610 — это новые устройства, выпущенные в этом году, как и ADIS16250/ADIS16255, которые представляют собой полностью программируемые цифровые сенсорные системы в корпусе LGA (11,1×11,1 мм).

Analog Devices также является лидирующим поставщиком акселерометров ADXL low-g и high-g диапазонов. Полный перечень устройств low-g диапазона включает 13 наименований, в том числе трехосевой датчик ADXL330, выпущенный еще в прошлом году, с расчетом на автомобильные, промышленные, потребительские применения и рабочей температурой до $-40 \dots 125$ °C. Ассортимент high-g-датчиков автомобильного назначения, долгое время состоявший из трех устройств — ADXL78, ADXL193 и ADXL278, детектирующих диапазоны ускорений от ± 35 до ± 250 g в температурном диапазоне $-40 \dots 105$ °C, совсем недавно пополнился еще одним устройством из программируемого семейства ADIS интеллектуальных акселерометров/инклинометров. ADIS16204 представляет собой программируемый цифровой 14-битный high-g двухосевой датчик удара до ± 70 g (± 37 g по второй оси) и рекордер в корпусе 9×9 мм, также функционирующий в температурном диапазоне $-40 \dots 105$ °C.

Семейство интеллектуальных акселерометров ADIS в настоящее время включает, таким образом, уже 5 устройств: двухосевые low-g датчики в LGA корпусе размером 7×7 мм с SPI интерфейсом ADIS16003 ($\pm 1,7$ g) и ADIS16006 (± 5 g), различающиеся чувствительностью; устройства в LGA корпусе размером 9×9 мм: программируемый двухосевой акселерометр/инклинометр ADIS16201, программируемый одноосевой инклинометр

диапазона до 360° ADIS16203 и новый программируемый high-g датчик ADIS16204. Все устройства семейства функционируют в диапазоне рабочих температур $-40 \dots 125$ °C.

Компания Analog Devices — самый известный сегодня поставщик акселерометров, гироскопов и датчиков инерции на различные рынки, предлагающий максимально широкий и непрерывно обновляемый спектр устройств для самых различных применений.

Необходимо отметить, что компания сейчас предлагает не один трехосевой датчик инерции, а два. Новейшим дополнением к ассортименту сенсорных кластеров является прецизионное устройство ADIS16355 (\$359).

Заключение

Как видно из обзора, недавно обновлены и пополнены линейки акселерометров и гироскопов практически всех компаний, занимающихся разработкой и производством автомобильных датчиков инерционного движения — с целью максимального охвата применений; представлены новые сенсорные технологии, которые позволяют получать высокие рабочие характеристики и малый размер компонентов, и могут быть конкурентоспособными на автомобильном рынке. Расширение сферы применения MEMS-датчиков инерции в автомобиле является стимулом к объединению этих сенсорных технологий в сенсорные кластеры, поставляющие информацию для всех систем одновременно и позволяющие добиваться снижения цены и сокращения избыточных устройств.

Развитие технологий и снижение цены автомобильных датчиков инерции, их высокая надежность сейчас востребованы и промышленной, и потребительской электроникой,

а также контрольно-измерительной и другой специальной техникой. ■

Литература

1. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 1. Автомобильные акселерометры — важнейший сегмент в конъюнктуре современного рынка автомобильных датчиков // Компоненты и технологии. 2005. № 8.
2. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 2. Автомобильные акселерометры — ключевые фигуры систем безопасности и комфорта // Компоненты и технологии. 2005. № 9.
3. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов // Компоненты и технологии. 2006. № 2.
4. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
5. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых емкостных акселерометров // Компоненты и технологии. 2006. № 4.
6. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 6. Некоторые уникальные технологии. Итоговый сравнительный анализ и оценка перспектив // Компоненты и технологии. 2006. № 5.
7. Сысоева С. Автомобильные гироскопы // Компоненты и технологии. 2007. № 1.
8. Weinberg H. Analog Devices. MEMS Inertial Sensors Move Beyond Airbags. Auto Electronics, Oct/2004.
9. Frank R. NHTSA Tips the Scale for Electronic Stability. Auto Electronics, May/June 2007.
10. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) Federal motor vehicle safety standard (FMVSS) No. 126, final ruling: <http://www.safercar.gov/esc/Rule.pdf>