

# Магнитоуправляемые, MEMS и мультисенсорные датчики движения 2009 года — функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников

Светлана Сысоева  
S.Sysoeva@mail.ru

**В статье рассказывается о важных и заметных обновлениях на рынке датчиков движения 2009 года, где в числе новых предложений ведущих производителей выделяются две значительные группы: магнитоуправляемые и MEMS-компоненты — датчики положения, скорости, ускорения, гироскопы и мультисенсорные компоненты.**

## Введение

В последние годы активно разрабатывались бесконтактные технологии измерения различных параметров механического движения — приближения, положения и скорости, перемещения, расстояния, уровня, угла, наклона, ориентации, линейного и углового, а также многооборотного или даже нелинейного движения. Преимущество бесконтактных технологий — отсутствие износа механических частей, высокий, теоретически бесконечный срок службы, упрощение конструкций и методов монтажа. В большинстве случаев датчик является статором, а подвижная часть (ротор) связана механически с объектом, параметры движения которого детектируются.

Группа датчиков движения обширна и включает переключатели, аналоговые и цифровые датчики положения, скорости, энкодеры и разнообразные комбинированные варианты с измерительной функциональностью базового сенсорного устройства и добавленными или отключенными вспомогательными функциональными признаками. Ключевыми параметрами детектирования данного типа датчиков являются кинематические: положение и скорость, без учета ускорения или вибрации. Наибольшую популярность в последние годы получили бесконтактные магнитоуправляемые технологии, нечувствительные к загрязнению, температуре, влажности, обеспечивающие высокую точность и надежность, но, ввиду повышения современных требований к измерениям, требующие усовершенствования рабочих характеристик и снижения цены.

В обширную группу датчиков механического движения входят также акселеромет-

ры — датчики ускорения, вибрации, наклона (инклинометры), гироскопы — датчики угловой скорости, закрепленные непосредственно на объекте, положение которого измеряется. Большинство устройств этой группы составляют MEMS-компоненты, также относящиеся к бесконтактным измерительным устройствам, в которых искусственно моделируется микромеханический процесс, подобный детектируемому движению.

Инерциальная навигационная система (блок Inertial Measurement Unit, IMU) определяет координаты, скорость, ускорение и другие основные параметры движения объекта, используя принцип моделирования его поступательного движения, характеризуемого изменением во времени ускорения, скорости и координат, процессом движения чувствительного элемента (инерционной массы) пространственного трехкомпонентного акселерометра в некоторой неподвижной исходной системе отсчета, по отношению к которой производятся инерциальные измерения. Акселерометр детектирует ускорение по каждой оси, блок IMU интегрирует основное дифференциальное уравнение: одинарное интегрирование производится для вычисления скорости, двойное — для определения координат. Ориентирование измерительных осей акселерометров по заданным направлениям производится гироскопами — свободными или управляемыми по сигналам от акселерометров.

Не только координаты, но и линейное и угловое положение можно также методом двойного интегрирования измерять или корректировать, например, с акселерометрами и гироскопами, закрепленными на объекте (объектах) ротора и статора. Однократное интегрирование возвращает скорость объекта. Уже сейчас назначение многих акселеро-

метров и гироскопов — компенсация и стабилизация основных измерений (компенсация гравитации в навигации, компенсация измерений уровня, стабилизация видеокамер и т.д.), а корректировка посредством данных устройств измерений основных кинематических параметров, детектируемых датчиками положения и скорости, с учетом, например, вибрации — цель будущих разработок.

Датчики расхода — это, например, датчики частоты вращения, а датчики давления или уровня в некоторых случаях могут быть именованы калиброванными датчиками перемещения. Общность многих датчиков механических величин состоит в измерении каких-либо параметров механического движения, а важное отличие — в расположении подвижного элемента, перемещение которого регистрируется: вне интегрального датчика (магнитоуправляемые датчики) или в самом датчике (MEMS).

Общим для всех датчиков механического движения является и то, что обозначенная группа устройств характеризуется непрерывным развитием — пополнением элементной базы и добавлением рабочих режимов с расчетом на максимальное удовлетворение требований известных систем и вновь возникающих применений, что относится и к бесконтактным магнитоуправляемым датчикам, и к MEMS-компонентам.

Области применений датчиков движения включают автомобильную, промышленную, потребительскую, контрольно-измерительную, авиационную, военную, морскую и другие сферы. Массовые объемы производства недорогих современных устройств с высокими рабочими характеристиками — достижение, обусловленное непрекращающимся взаимовлиянием перечисленных рынков.

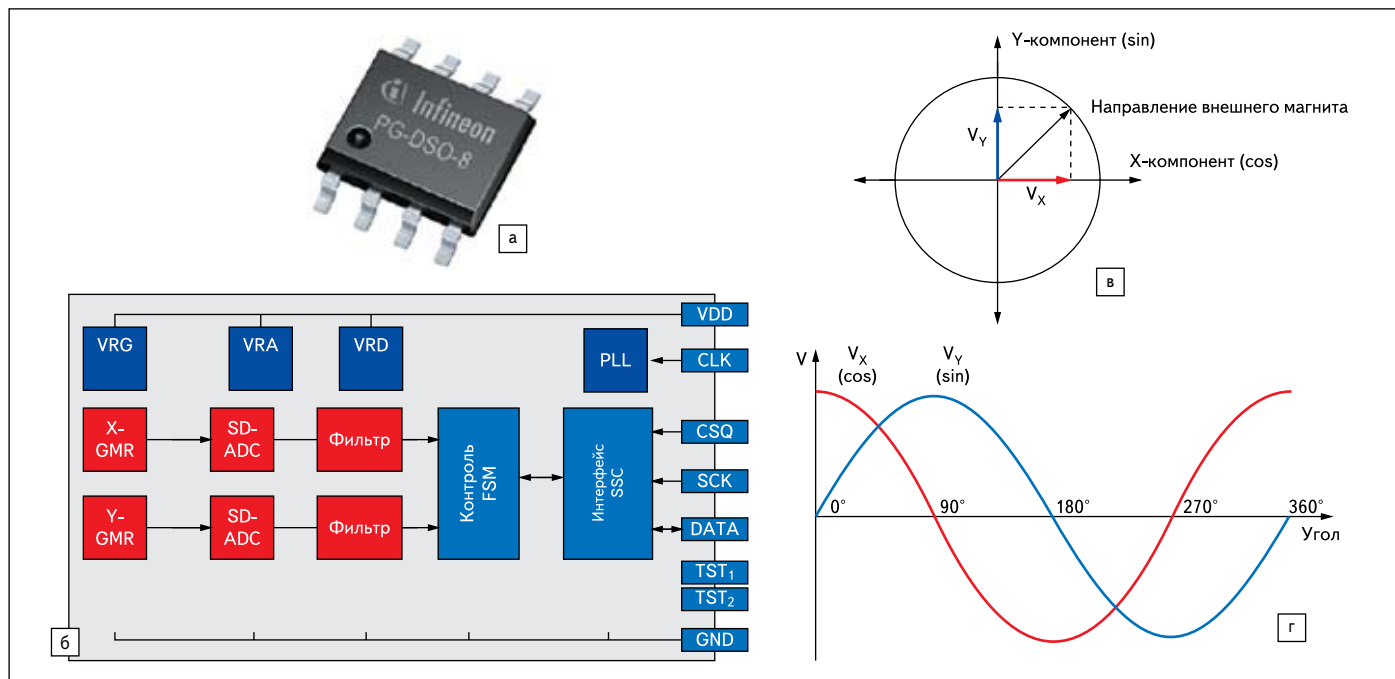


Рис. 1. Интегральные GMP-энкодеры Infineon TLE5011, TLE5012:

а) внешний вид ИС в корпусе PG-DSO-8; б) упрощенная функциональная диаграмма TLE5011; в) измерительный принцип; г) первичные выходные сигналы

Новые сенсорные компоненты, представленные в 2009 году, еще функциональнее, точнее, миниатюрнее, чем прежде, а низкая цена сохраняется на прежнем уровне.

## Новые магнитоуправляемые компоненты

Магнитоуправляемые измерительные технологии сегодня ассоциированы с автомобильными системами и энкодерами Холла — MLX90316 Melexis, обширной линейкой Austriamicrosystems и другими, благодаря которым стала реальной возможность надежного и точного детектирования углового диапазона 360° с обеспечением цифровых интерфейсов, а также высокоразрешающего детектирования значительных линейных перемещений — с появлением энкодера iC-ML iC-Naus. Разработанный энкодерный принцип отличает температурная стабильность и значительная нечувствительность к магнитным и механическим воздействиям.

Новые предложения датчиков Холла относятся к оптимизации требований применений, ключевые из которых — надежность, точность, специальные интерфейсы, низкая цена. Многие новые устройства представлены с расчетом на недорогие применения систем с ограниченным угловым диапазоном детектирования, где высокая точность не требуется, и энкодеры могут быть использованы, но не являются оптимальным решением с точки зрения цены устройства [1].

Первая половина 2009 года отмечена появлением на рынке нескольких предложений компонентов высокоинтегрированных магниторезистивных энкодеров, более чувстви-

тельных к магнитному полю, чем энкодеры Холла.

Хотя GMP-эффект, физика которого рассмотрена в [2], перспективен для многих типов измерений, длительное время полностью интегрированные коммерческие предложения элементной базы на основе GMP-эффекта отсутствовали.

В 2009 году компания Infineon анонсировала выпуск GMP-энкодеров TLE 5011/5012 (базовый компонент серии TLE5010 был представлен несколько раньше, но его коммерциализация не предполагалась). GMP-энкодеры Infineon (рис. 1) — первые полностью интегрированные угловые GMP-энкодеры в диапазоне 360° с цифровым интерфейсом, детектирующие ориентацию магнитного поля за счет синусо-косинусного оценивания монолитными интегрированными угловыми элементами — так называемыми integrated Giant Magneto Resistance elements (iGMR). Коммуникация данных выполняется посредством двунаправленного интерфейса Synchronous Serial Communication (SSC) — SPI-совместимого. Рабочая температура устройств  $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  — с расчетом на автомобильные применения. Дополнительную информацию об этих датчиках можно получить в [1].

На прошедшем в июне этого года в Детройте мероприятии Sensors Expo&Conference компания Hitachi Metals представила свои интегральные спин-клапанные GMP-компоненты (рис. 2), работающие при температуре  $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет рассматривать их использование в автомобильных системах, но для этих устройств необходим специальный интерфейс.

Впрочем, цель данной статьи — рассказать обо всех обновлениях линеек магнитоуп-



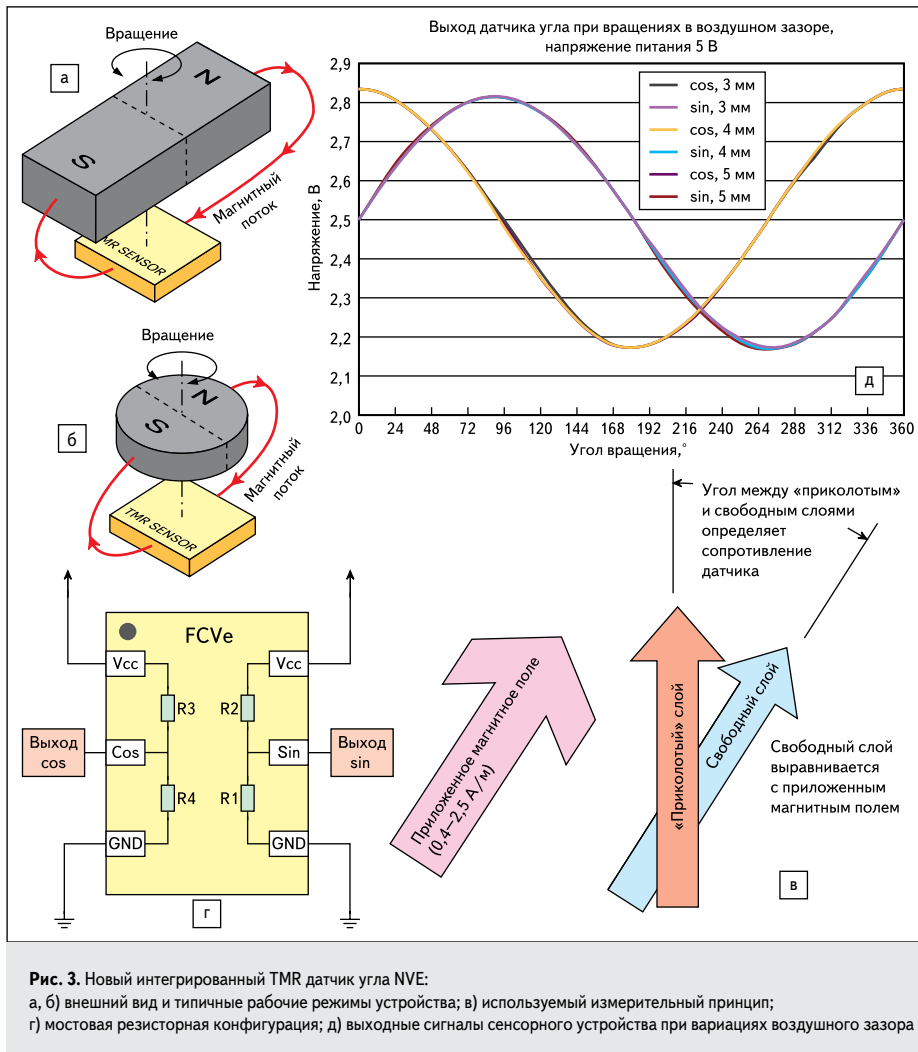
Рис. 2. Новые интегральные GMP-датчики Hitachi Metals

равляемых компонентов, а только о наиболее заметных из них. Поэтому следующим ключевым обновлением, о котором стоит рассказать подробнее, является новый интегральный датчик угла на основе туннельного магнитосопротивления (TMR) от NVE.

## Новый датчик угла NVE на основе эффекта TMR

В конце марта 2009 года NVE Corporation анонсировала введение AAT001-10E (рис. 3) — нового интегрированного TMR датчика угла с квадратурным инкрементальным выходом, причем данное устройство отличается от многих аналогов тем, что обеспечивает высокий уровень сигнала без усиления. AAT001-10E — это первый коммерческий датчик NVE и первое в мире решение на основе эффекта туннельного магнитосопротивления (Tunneling Magnetoresistance, TMR), превосходящего эффект гигантского магнитосопротивления (GMR).

Компания NVE — лидер в практической реализации технологий спинтроники или нанотехнологии, в основе которой лежит ис-



пользование свойств электронных спинов (а не электронных зарядов) для сбора, запасаения и передачи информации. Компания производит датчики и магнитные изоляторы для сбора и передачи данных. NVE также лицензировала свою спинтронную технологию памяти MRAM — Magnetoresistive Random Access Memory.

Для получения информации о физике эффекта ГМР и вариантах применения его в датчиках NVE и других рекомендуется обратиться к работе [4].

Эффект, известный также как спин-зависимое туннелирование (Spin-Dependent Tunneling, SDT; Magnetic Tunnel Junction, MTJ; Tunneling Magnetic Junction, TMJ) или эффект туннельного магнитосопротивления (Tunneling Magnetoresistance), представляет собой спинтронный квантовый эффект высокого изменения магнитосопротивления в изолирующем слое в зависимости от действующего на него магнитного поля и созданного таким образом доминантного электронного спина в свободном слое.

Датчик AAT001-10E разрабатывался с расчетом на следующие применения:

- угловые энкодеры;
- автомобильные датчики угла;

- датчики углового положения вала;
  - датчики положения ручек и кнопок.
- AAT001-10E уже коммерчески доступны и предлагаются покупателям по цене \$1,94 в количестве 1000 штук. Ферритовые магниты типа Split-pole (диаметрально намагниченные) для использования с датчиками также разработаны, их стоимость — \$1,15 каждый в количестве 1000 штук. Клиенты могут использовать и собственные магниты.

Датчики поставляются в ультраминиатюрном 6-выводном корпусе TDFN размерами 2,5×2,5×0,8 мм. В типичном применении внешний магнит обеспечивает насыщающее поле в 30–200 Э или 0,4–2,5 А/м ( $1 \text{ Э} = 10^3 / (4\pi) \text{ А/м} = 79,5775 \text{ А/м}$ ) в плоскости данного датчика (рис. 3а–в).

TMR-эффект образует очень большой сигнал без усиления (что важно для достижения высокой точности), широкие допуски воздушного зазора, малое энергопотребление вследствие высокого сопротивления элементов.

Новое устройство включает четыре TMR-элемента, сконфигурированные как датчик угла с квадратурными синусными и косинусными выходами (рис. 4в–д). Датчик угла AAT001-10E представляет собой массив из TMR-элементов, повернутых на 90° друг

относительно друга в корпусе датчика и соединенных в мостовую конфигурацию (рис. 3г).

Каждый из сенсорных элементов содержит два магнитных слоя: «приколотый», или слой с фиксированным направлением намагниченности, и «свободный» слой с направлением намагниченности, которое может изменяться пропорционально углу вращения (на рис. 3в представлена данная конфигурация). Внешний магнит обеспечивает насыщающее магнитное поле, как показано рис. 3а–б, для полосового и диаметрально намагниченного магнита.

Свободные сенсорные слои элементов будут выравниваться с внешним полем. Когда приложенное поле изменяет свое направление, угол между свободным слоем и приколотым слоем изменяется, что изменяет также сопротивление TMR-элементов и производит соответствующие изменения выходных напряжений.

Выход может быть конфигурирован таким образом, чтобы представлять синусные и косинусные функции магнитного поля, приложенного к датчику (рис. 3д). TMR-резисторы соединяются как два полумоста, один из которых обеспечивает синусный, а другой — косинусный выход. Каждый TMR-элемент характеризуется значительным сопротивлением в 1,25 МОм. Выходы пропорциональны напряжению питания и пиковому размаху выходных напряжений и много больше по уровню, чем достижимые с применением других сенсорных технологий.

Вариации в воздушном зазоре между магнитом и сенсорным элементом будут вызывать только небольшие изменения (девиации) в выходном сигнале в зависимости от размера и напряженности магнита. Диаграмма на рис. 3д показывает типичный сенсорный выход в зависимости от угла приложенного поля — с использованием диаметрально намагниченного магнита диаметром 12 мм и высотой 4 мм из ферритового материала при 5-В питании с тремя различными воздушными зазорами.

### Новое поколение MMT through shaft датчиков Холла: охват применений и повышение точности

Магнитоуправляемые бесконтактные датчики компании MMT, как правило, обеспечивают необходимый системный технический уровень, поэтому они представляют значительный интерес для заказчиков, многими из которых являются компании, работающие в автомобильной промышленности. Но разработки датчиков MMT, информация о которых была представлена, например, в публикациях [3, 4], интересны и с научнотехнической точки зрения.

В 2009 году специалисты MMT направили свои усилия на разработку дополнительных функциональных признаков созданных ими

ранее датчиков положения, одним из которых является многооборотный выход, а также на повышение точности устройств, в том числе снижение чувствительности к внешним магнитным полям.

Стандартные требования к автомобильному рулевому управлению, например, систем курсовой устойчивости ESP, для которой в скором времени в Европе ожидается легисляция (принятие законодательных актов), включают точность измерения посредством компактного многооборотного абсолютного датчика угла порядка  $1^\circ$  или еще менее.

Общие принципы многооборотных измерений основаны на концепции абсолютных измерений в диапазоне угла  $360^\circ$  для решения through shaft [3, 5] (рис. 4а–б). Согласно предложенному дизайну, ИС, измеряющая магнитное поле, размещается в близости диаметрально намагниченного магнитного кольца. Компоненты магнитного поля, измеряемые при этом, характеризуются синусной и косинусной формой, но различной амплитудой. Но с применением компенсирующего параметра может быть получен точный выход для датчиков разного размера, хотя теоретически точность может различаться.

Прототипы ММТ позволяли достичь в рабочем диапазоне температур  $-40...+150^\circ\text{C}$  нелинейности менее  $\pm 0,5\%$  от полного хода. Для дальнейшего улучшения точности важно улучшить данный параметр, и для этого, в свою очередь, важен поиск причин, ухудшающих линейность. Как показала 2D-симуляция, большую роль в достижении требуемых показателей играют погрешности диаметрального намагничивания магнита [5]. Магнитная проницаемость выше 1 (1,05–1,25), и этот параметр не точен. Поэтому линии поля, сгенерированные обмоткой, при пересечении магнита будут несколько отклоняться от прямой линии, намагничивание будет не строго диаметральным, а это, в свою очередь, будет наводить искажения синусной и косинусной формы компонентов поля. Хотя частично искажения могут быть учтены при программировании, полностью скомпенсировать их не удастся: возникает систематическая ошибка точности.

С целью достижения лучших характеристик ММТ предложила следующее решение: две ИС, механически смещенные на  $90^\circ$  друг относительно друга (рис. 4в), каждая измеряют два компонента магнитного поля (тангенциальные и радиальные компоненты) [5]. Обосновано математически, что комбинирование сигналов двух ИС также позволяет вычислять положение посредством вычисления арктангенса нормального и тангенциального сигналов  $\arctg(B_r/B_t)$  с хорошей аппроксимацией, причем фактор регулировки усиления для каждой ИС становится неважным.

С этим методом достижима нелинейность до  $\pm 0,2\%$  от полного хода.

Линии магнитного поля, сгенерированные посредством присутствия внешнего постоян-

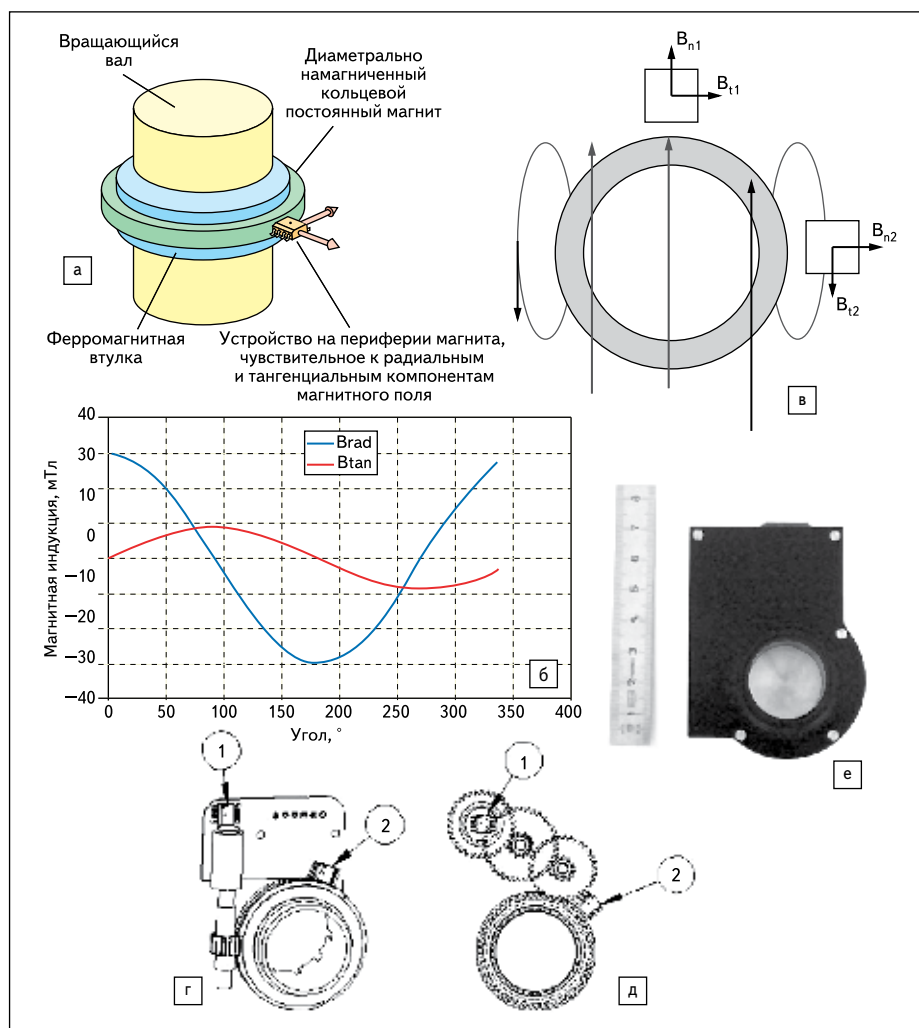


Рис. 4. Датчики ММТ 2009 года: работа по адаптации разработанной концепции для датчиков рулевого колеса и повышению точности:

- а, б) концепция измерения углов в диапазоне  $360^\circ$ ;  
 а) пространственная конфигурация; б) первичные синусно-косинусные сигналы;  
 в) новая концепция с двумя ИС;  
 г, д) два варианта конструкции многооборотных датчиков рулевого колеса;  
 е) прототип многооборотного датчика рулевого колеса с улучшенной точностью

ного магнита или источника тока (провода с высоким током, например, используются в кабеле стартера автомобиля) являются типичным источником ошибок для таких датчиков, в которых отсутствует экранирование магнитной схемы.

Ноу-хау ММТ включает схему локального экранирования, снижающую эффекты внешнего магнитного поля. Решения такого типа позволяют снизить, но не отменить эффекты воздействующего поля. Но специалистами ММТ предложен новый метод, позволяющий отменить данное воздействие, основанный на известном способе отмены воздействия поля — комбинации дифференциальных сигналов в датчиках.

Рассмотренный метод с двумя ИС также использует комбинацию сигналов, и специалисты компании математически обосновали, что с использованием данной комбинации сигналов одновременно могут быть скомпенсированы и ошибка намагничива-

ния вследствие влияния третьей гармоники, и эффект воздействия гомогенного внешнего магнитного поля, что подтверждается экспериментально. Прототип датчика помещался в поле, сгенерированное обмоткой. Даже при высоком поле в 12 мТл (созданном током 1000 А на расстоянии 2,5 см от чувствительных элементов), согласно данным ММТ, точность (точность — более комплексная характеристика, но специалисты ММТ в своем докладе [5], очевидно, отождествляют ее с линейностью) остается в диапазоне от  $\pm 1^\circ$ , что соответствует  $0,3\%$  от полного хода.

Результаты, достижимые при этом методе, зависят и от гомогенности поля. Размеры датчиков малы (диаметр — 10–50 мм), что соответствует малым расстояниям между измерительными точками (порядка нескольких мм).

Источники поля размещаются достаточно далеко от датчика: например, кабель стартера

находится в нескольких десятках мм от сенсорного корпуса или обмоток бесколлекторного двигателя постоянного тока, генерирующих поле, гомогенное в масштабе датчика.

Концепция абсолютного многооборотного датчика основывается на осуществлении тех же сенсорных функций с получением абсолютного выхода, но на множественных оборотах. Классический пример — датчик угла автомобильного рулевого управления, число оборотов которого, к примеру, составляет  $\pm 2$  оборота. Кроме того, данное специфическое применение является системой through shaft, в которой рулевая колонка проходит сквозь корпус датчика, то есть представляет собой одно из ключевых применений для разработанной ММТ концепции, адаптированной и улучшенной для детектирования углового диапазона  $360^\circ$ .

Одно из решений ММТ для рулевых систем основывается на применении эпициклического шестеренчатого привода с датчиком угла в диапазоне  $360^\circ$ . Но при увеличении диапазона угловых измерений влияние типичной нелинейности порядка  $\pm 0,5\%$  полного хода дает погрешность, несовместимую с требованиями точности применения ( $\pm 7,2^\circ$  для  $\pm 2$  оборотов). Поэтому следующее решение — применение концепции комбинации датчиков, позволяющее с линейностью  $\pm 0,2\%$  улучшить точность вычислений до  $\pm 2,9^\circ$ , но и этого оказывается не вполне достаточно.

Многие широко известные решения других компаний основываются на том, что вращающийся вал ведет две шестерни с различающимся числом зубцов (как минимум, на одну единицу). Каждая шестерня связывается с постоянным магнитом, вращение которого детектируется магниточувствительной ИС. Это дает два сигнальных пилообразных sawtooth выхода, фазовый сдвиг между которыми увеличивается вместе с числом зубцов. Для выведения значения абсолютного положения из разницы между двумя сигналами применяется специальный алгоритм, характеризующийся значительным недостатком вследствие факта высокой чувствительности метода математического вычитания к механическим ошибкам для каждого датчика. Для достижения высокой точности алгоритм значительно усложняется, что реализуется в схеме обработки сигнала датчика.

Поэтому ММТ возвращается еще к одному известному решению, но с применением своей концепции. Следующая идея ММТ состоит в обеспечении дуального выхода при комбинировании двух датчиков угла в диапазоне  $360^\circ$  с системой шестерен (рис. 4г–д). Один из датчиков представляет собой широко известное решение ММТ для диапазона  $360^\circ$  и обеспечивает точный выход в пределах одного оборота, другой применяется с шестеренчатым приводом за пределами вала (off-the-shaft) с передаточным отношением в диапазоне числа оборотов согласно характе-

ристикам рулевой системы. Выход датчика — также абсолютный, но с более грубой точностью. Роль этого сигнала — показывать фактические обороты, а точный сигнал указывает положение в пределах текущего оборота.

Второй датчик может быть различных типов, в том числе и в торцевом исполнении с магнитом, установленным на валу и с ИС угла поворота.

Дальнейшие шаги компании — применять разработанное решение (рис. 4е), адаптируя его для применений детектирования угла рулевого колеса для ESP или положения вала электрического двигателя. Следующий этап в реализации многооборотного решения — интеграция с датчиком крутящего момента для осуществления всех требуемых комбинированных функций в рулевых системах, создание более простого, надежного, бесконтактного многооборотного устройства.

После разработки оригинальная концепция стала актуальной и для линейных датчиков, поскольку магнитная полоса — это не что иное, как окружность с бесконечно большим радиусом, и для применений с ограниченным угловым диапазоном, и вследствие температурной зависимости (датчики Холла).

Линейный датчик можно использовать, например, для детектирования положения переключателя передач (PRNDL) в автомобиле с автоматизированной коробкой или для мониторинга положения сцепления, клапана EGR, положения педали. В этих применениях ход объекта — порядка 15–20 мм, но возможно детектирование больших линейных перемещений ( $>100$  мм).

Еще одна возможность — использование аксиальных и тангенциальных компонентов, но это уже не оригинальная разработка компании, а, скорее, классическая схема, для которой в исполнении не с дипольным, а с многополюсным магнитом, может рекомендоваться, например, следующее рассматриваемое в данной статье устройство 2009 года — энкодер AS5311 Austriamicrosystems.

В обоих случаях допуски на радиальные, тангенциальные, аксиальные смещения могут быть достаточно большими: в связи с тем, что датчик чувствителен не к амплитуде, а к направлению магнитного поля, но искажения направления, влияние шумов могут ухудшать точность, метод комбинирования сигналов применим для обоих случаев.

Если же только малая часть кольцевого магнита используется для измерения угла до  $360^\circ$  (порядка  $50$ – $90^\circ$ ), например, в датчиках gear shift lever sensor, Fuel sensor, EGR valve, то ММТ рассматривает два возможных решения для такого датчика:

- использование диаметрально намагниченного магнита;
- использование синусоидально намагниченного магнита.

Первое решение — проще, второе, согласно программной симуляции — точнее [5].

Таким образом, ММТ на основе своего патентованного решения создала целое поколение новых датчиков для through shaft систем.

### **Энкодер AS5311 Austriamicrosystems — ИС Холла для линейного и углового Off-Axis детектирования движения многополюсного магнита**

AS5311 (рис. 5) — это еще одна новая однокристалльная, полностью интегрированная ИС, представляющая собой, как и все предшественники в семействе датчиков Austriamicrosystems, магнитный угловой энкодер Холла, но адаптированный для работы не с дипольным, а с многополюсным магнитом.

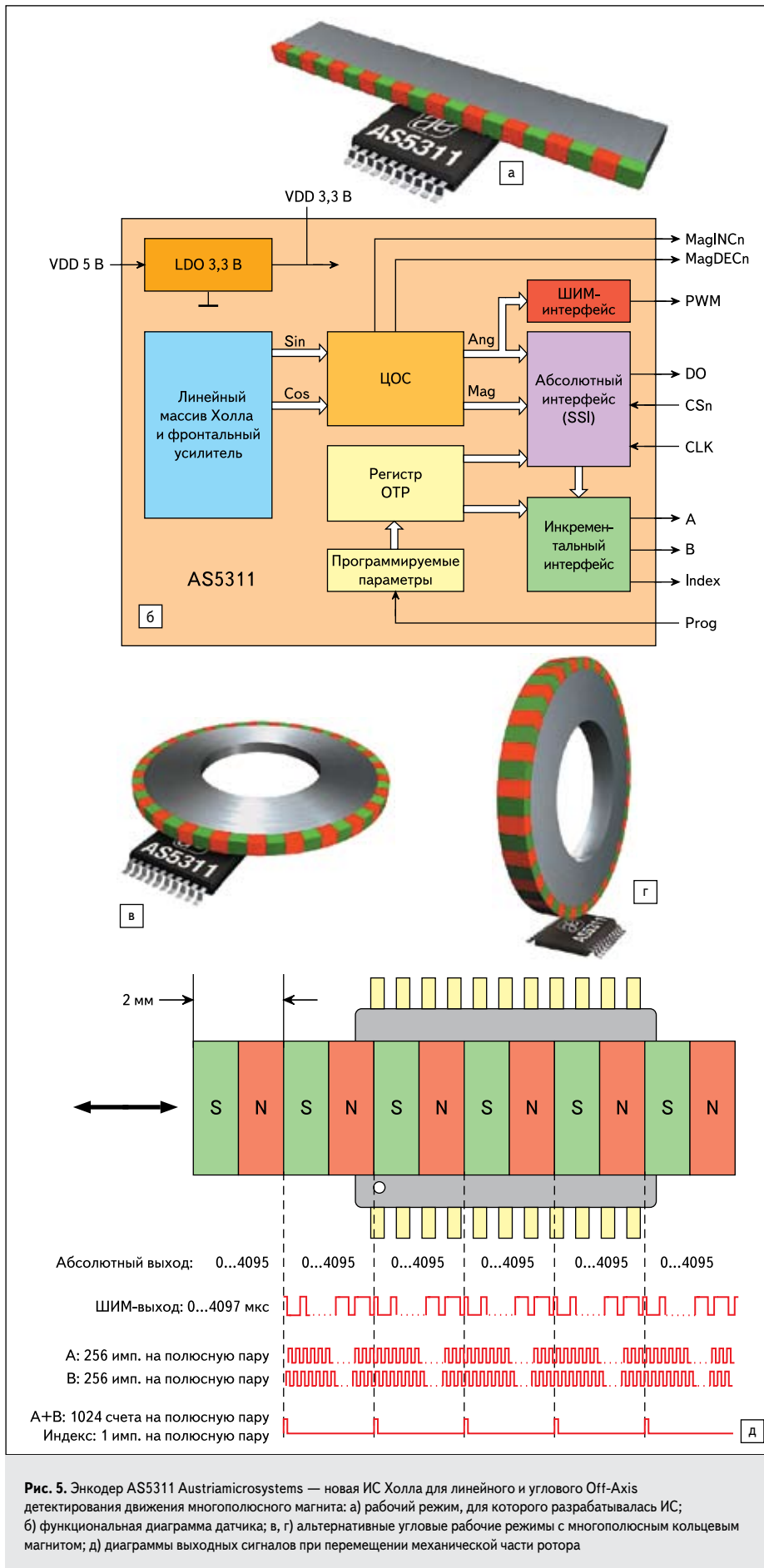
ИС включает интегрированные элементы Холла для измерения линейного или углового движения с использованием магнитных многополюсных полос или колец. ИС разрабатывалась как линейный детектор магнитной многополюсной полосы, но, в связи с тем, что линейка — это окружность с бесконечно большим радиусом, данный энкодер может быть рекомендован и для углового детектирования магнитной многополюсной полосы с достаточно большим радиусом (рис. 5а–г). ИС AS5311, как и датчики ММТ, предназначена также для применений в системах, где датчик не может быть закреплен напротив торца вала — в так называемых hollow shaft или through shaft системах. Вместо торцевого исполнения AS5311 может быть закреплена в так называемом Off-Axis исполнении, то есть не прямо напротив центра вращающегося магнита, одновременно являющегося центром вала, а напротив последовательности полюсов магнита, смещенной относительно геометрического центра к краю. Относительно центра и оси вращения вала допускается и радиальное, и аксиальное размещение полюсов по окружности периферии магнита.

Один их выходов ИС (рис. 5д) — квадратный инкрементальный с количеством импульсов 256 на полюсный период (северный и южный полюса) магнитного ротора, перемещающегося со скоростью 0,65 м/с. Разрешение инкрементального выхода — 1,95 мкм на шаг. Также для каждой полюсной пары на индексном выходе ИС генерируется одиночный индексный импульс.

Помимо данных стандартных типов выходов, доступен и цифровой выход посредством обеспечения 12-битной абсолютной информации о положении в пределах полюсной пары, что дает результат разрешения порядка 0,5 мкм на диапазон 0–2 мм.

Абсолютный выход доступен через последовательный или ШИМ-интерфейс.

Длина магнитной полюсной пары — 2,0 мм (по 1,0 мм на северный и южный полюс). Длина других полюсов будет наводить значительную нелинейность, возрастающую практически пропорционально девиации



**Рис. 5.** Эncoder AS5311 Austriamicrosystems — новая ИС Холла для линейного и углового Off-Axis детектирования движения многополюсного магнита: а) рабочий режим, для которого разрабатывалась ИС; б) функциональная диаграмма датчика; в, г) альтернативные угловые рабочие режимы с многополюсным кольцевым магнитом; д) диаграммы выходных сигналов при перемещении механической части ротора

длины. Магнитная полоса должна быть помещена над ИС на расстоянии примерно 0,3 мм, допустимые вариации — 0,3–0,6 мм, так как в ИС встроен АКУ. Точность будет зависеть от длины и напряженности каждого полюса и, следовательно, от точности средства намагничивания и гомогенности магнитного материала.

Для мониторинга положения магнита над ИС предназначены битовые индикаторы переменного «цвета» диапазона «red-yellow-green» (красный-желтый-зеленый).

Практически мониторинг осуществляется следующим образом. На аппаратных выводах ИС доступны сигнальные индикаторы возрастания и уменьшения напряженности магнитного поля MagINCn и MagDECn, в последовательном битовом потоке — биты статуса. Дополнительно, бит статуса LIN, равный единице, индицирует нерекомендуемый «красный» диапазон поля. Регистр MAGnitude обеспечивает дополнительную информацию о напряженности магнитного поля.

AS5311 предлагается в 20-выводном корпусе TSSOP и предназначен для работы при окружающей температуре  $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Внутренний регулятор напряжения допускает работу AS5311 от одного из двух напряжений питания согласно применению ИС — от 3,3 или от 5 В.

Типичные применения, для которых рекомендуется датчик, — промышленные:

- обратная связь с микроактюаторами;
- обратная связь с сервоприводами;
- робототехника;
- замещение оптических энкодеров в любых системах.

### Лучшие датчики движения 2009 года по мнению экспертов журнала “Sensors”

Награды “Best of Sensors Expo” на прошедшем в июне глобальном мероприятии Sensors Expo & Conference в категориях Sensors и Sensor Components получили следующие датчики движения и компоненты:

- Миниатюрный датчик с 6 степенями свободы 6DX DTS, который может измерять угловые диапазоны порядка  $50\ 000^{\circ}/\text{с}$  и ускорения до  $6000\text{ g}$  — «золото» в категории Sensors.
- Миниатюрная система определения расположения и курса относительно земных осей Attitude and Heading Reference System (AHRS) SBG Systems IG-500N, включающая GPS-ресивер и барометрический датчик — «золото» в категории Sensors.
- Миниатюрный AHRS-компонент 3DM-GX3-25 MicroStrain — «серебро» в категории Sensor Components.
- Бронзовые награды в категории Sensors: Kionix Inc. KXTF9 — трехосевой MEMS-акселерометр с функциональностью Directional Tap/Double-Tap, прочный MEMS-гироскоп Silicon Sensor Systems

CRS09, CMA 3000 VTI Technologies Inc. — маломощный MEMS-акселерометр, монтируемый на подложки заказчика и исключающий необходимость внешнего корпусирования.

В соответствии с логикой статьи прочие отмеченные наградами датчики, которые нельзя причислить к обособленной в заглавии группе, и измерительные системы и средства, награжденные в других категориях, в настоящий обзор и список не включены.

К сведению читателей, в категории систем сбора данных Data Acquisition Product золотыми наградами отмечены высокоскоростной беспроводной сенсорный узел компании MicroStrain HS-LINK и PowerCast Corp. P2100 Powerharvester — энергособирающий модуль, преобразующий доступную радиочастотную энергию (сотовых телефонов, ТВ и других приборов) в постоянное напряжение, запасаемое в конденсаторе.

Помимо 3DM-GX3-25 MicroStrain, серебряных наград были удостоены компании:

- Infinite Power Solutions Inc. — в категории Sensors за микромощностное энергозапасяющее устройство INFENERGY Micro Power Module, отличающееся наличием встроенной эффективной управляющей электроники и практически полным отсутствием потерь при запуске энергии;
- HBM-LDS Test and Measurement — в категории Data Acquisition Products за портативный высокоскоростной рекордер переходных процессов GEN5i;
- Moog Inc. — в категории Sensors за новый детектор воздушных пузырьков в жидкости LifeGuard IQ.

Бронзовой награды, помимо акселерометров Kionix, VTI и гироскопа SSS, была отмечена компания Symbet Corp. за модуль сбора энергии EnerChip EH (CBC500 и EVAL-08) на основе тонкопленочных батарей с управляющими функциями. Почетным упоминанием Honorable Mentions в категории Sensors были удостоены крэш-акселерометр 7264G Endevco Corp., цифровой датчик барометрического давления T5300 EPCOS Inc. и емкостной датчик уровня CLC Sensortech Inc, а также Wi-Fi устройство сбора данных National Instruments.

### «Лучшие» датчики движения 2009 года — мультисенсорные компоненты

#### 6DX Diversified Technical Systems

6DX Diversified Technical Systems, Inc. (DTS) (рис. 6) — новое дополнение к линейке датчиков e-SENSING, представляющее собой миниатюрный компонент, включающий 3 линейных акселерометра и 3 датчика угловой скорости в компактном и прочном корпусе, рассчитанном на измерения высоких ускорений и угловых скоростей по всем трем осям. Размеры корпуса датчика — 28×28×16,5 мм, масса 26г.



Рис. 6. Новый миниатюрный мультисенсорный компонент для инерциальных измерений с 6 степенями свободы и значительными диапазонами детектирования

6 входных каналов 6DX обеспечивают необходимые данные для вычисления вектора ускорения и отслеживания ориентации в 3D-пространстве. Соответствующая вычислительная пост-обработка позволяет построить график кинематического движения и во времени. Блок сконструирован с расчетом на высокие ударные воздействия — до 6000 g, причем это значение определяет не пиковое воздействие, превышение которого недопустимо, а именно максимальное детектируемое ускорение.

Встроенные линейные акселерометры представляют собой полномостовые пьезорезистивные устройства, чувствительные к постоянному (DC) воздействию. Для соответствия различным применениям возможны диапазоны детектирования от ±20 до 6000 g. Входное напряжение трехосевого акселерометра — 2–10 В. Типичная линейность выхода акселерометра <1% от полного выходного диапазона в ±200 мВ, поперечная чувствительность акселерометра ±3%.

Встроенные датчики угловой скорости доступны в диапазонах от ±300 до 50 000°/с и также характеризуются DC-срабатыванием. Входное напряжение трехосевого гироскопа 4,9–14 В. Типичная линейность выхода гироскопа также <1% от полного выходного диапазона, но составляющего ±2 В; производителем специфицирован дрейф гироскопа 0,1°/с.

Сенсорный выход может быть записан посредством любых стандартных систем сбора данных. Встроенные 16-выводные микросоединители для каждого из трехосевых датчиков допускают легкое замещение кабелей.

Применения устройства включают автомобильные и аэрокосмические, например, автомобильные испытания, крэш-тесты, измерения вибрации, а также применения общего назначения, относящиеся к измерениям углового движения, удара, вибрации.

#### SBG Systems SAS IG-500N

SBG Systems SAS IG-500N (рис. 7) — новая миниатюрная навигационная система оп-

ределения курса Attitude Heading Reference System (AHRS), включающая MEMS-блок инерциальных измерений IMU с дополнительным GPS-ресивером на 4 Гц и барометрическим датчиком, весом всего 8 г для OEM и 45 г в боксе. IG-500N представляет собой комбинацию 13 датчиков — акселерометров, гироскопов, магнитометров, трех датчиков температуры, датчика давления и GPS-ресивера.

Диапазоны измерений угловых скоростей — до 500°/с, ускорений — ±5 g (доступны версии на 2 и 18 g), магнитных полей ±0,12 мТл. Давление измеряется с разрешением 6 Па и точностью, определенной в ±50 Па (относительные измерения) и ±200 Па для абсолютных измерений, скорость обновления — 9 Гц.

Устройство также включает фильтр Калмана. Все это позволяет измерять 3D-ориентацию, скорость и положение даже в высокодинамичном окружении — с входным показателем скорости изменения каждого параметра до 100 Гц.

Выходные форматы включают углы Эйлера (определяющие положение тела/системы координат тела в отсчетной системе координат: углы прецессии, нутации, собственного вращения), кватернионы (система чисел в 4-мерном пространстве), матрицу, 3D-скорость, 3D-положение, калиброванные сенсорные данные, строковые сенсорные данные. Каждый выход может быть допущен или отключен пользователем.

Основные коммуникационные протоколы — RS-232 и USB, а также TTL.

Скорость передачи последовательных данных — 9600–921 600 бит/с, выбирается пользователем.

Для улучшения характеристик устройство индивидуально калибруется, что позволяет снизить ошибки смещения и усиления в полном температурном диапазоне. В схеме контролируются эффекты поперечной чувствительности акселерометров, влияния отсутствия выравнивания гироскопов. SBG Systems разработала и систему калибровки магнитного поля, что также повышает точность измерений.



Рис. 7. SAS IG-500N — новая миниатюрная высокointегрированная инерциальная навигационная AHRS система SBG Systems

IG-500N предназначен для замещения волоконно-оптических гироскопов Fiber Optic Gyroscopes (FOG). При измерениях положения относительно земных осей датчики IG-500N обеспечивают признак удаления переходных ускорений, что актуально при маневрах с высокими уровнями  $g$ , например при поворотах. Даже при высоких ускорениях, создающих проблемы для типичных AHRS, измерения расположения/ориентации с IG-500N могут быть выполнены с точностью, заявленной производителем как лучше 1°.

Допускается использование внешних GPS или радиосистемы Доплера, что позволяет задействовать устройство в инерциальных навигационных системах.

Рабочий температурный диапазон:  $-40...+85$  °C. Рабочее напряжение питания — 3,3–12 В. Устройство маломощное (475 мВт).

Время start-up <10 с, но оптимальное время для сбора данных — через 10 мин после включения.

Общий перечень применений устройства включает:

- транспортную навигацию;
- анализ движения автомобиля;
- замещение AHRS высокого уровня исполнения;
- стабилизация платформ;
- точечная настройка позиционирования антенн и камер;
- съемка без опор;
- слежение за положением персонала.

### 3DM-GX3-25 MicroStrain

3DM-GX3-25 MicroStrain (рис. 8) — следующая миниатюрная (массой 11, 5 г в OEM-исполнении) AHRS-система, в которой также использована MEMS-технология и скомбинированы 12 датчиков: трехосевой акселерометр, трехосевой гироскоп, трехосевой магнитометр, три датчика температуры и бортовой процессор, функционирующий на основе алгоритмов слияния сенсорных данных — для статической и динамической ориентации и инерциальных измерений.

Система обеспечивает калиброванные и температурно-скомпенсированные выходы в следующих форматах: данные об ускорении, угловой скорости, магнитном поле, векторы изменения углов и скорости

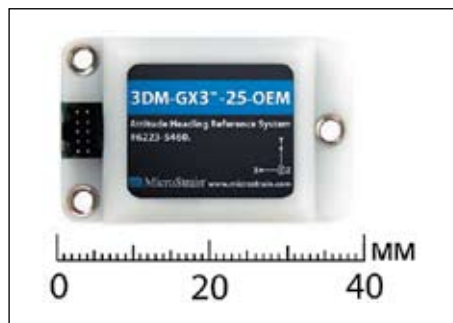


Рис. 8. OEM-версия миниатюрной AHRS-системы MicroStrain 3DM-GX3-25

deltaAngle и deltaVelocity, углы Эйлера, матрица вращения.

Все параметры температурно-скомпенсированы и привязаны к ортогональной (декартовой) системе координат.

Коммуникация 3DM-GX3-25 AHRS осуществляется по интерфейсам RS-232, USB 2.0 и TTL.

Выход может включать вычисления ориентации: продольного наклона (pitch), крена (roll), курса (heading, yaw) или матрицу вращения.

Угловые диапазоны детектирования ориентации — 360° по всем осям (матрица ориентации, кватернионы);  $\pm 70^\circ$  — для продольного наклона,  $\pm 180^\circ$  для крена и курса (углы Эйлера).

Стандартный диапазон ускорений —  $\pm 5 g$ , а также доступны диапазоны  $\pm 2 g$ ,  $\pm 18 g$ ,  $\pm 50 g$ . Стандартный диапазон угловых скоростей  $\pm 300^\circ/c$ ; возможны диапазоны  $\pm 1200^\circ/c$ ,  $\pm 600^\circ/c$ ,  $\pm 150^\circ/c$ ,  $\pm 75^\circ/c$ . Диапазон магнитометра —  $\pm 0,25$  мТл. Точность измерения ориентации определена производителем в  $\pm 0,5^\circ$  для статических условий и в  $\pm 2,0^\circ$  для динамических. Нелинейность выходов акселерометра и гироскопа определена в 0,2%, магнитометра — 0,4%.

Помимо полной температурной компенсации смещения и чувствительности всех 9 датчиков, каждое сенсорное устройство индивидуально калибруется с целью компенсации чувствительности гироскопа к ускорению, нелинейности гироскопа и невыравнивания датчика.

Улучшенные характеристики устройства в условиях вибрации достигаются посредством выборки на частоте 30 кГц, цифровой фильтрации и выполнения компенсационных coning/sculling алгоритмов интегрирования на частоте 1 кГц и вывода данных deltaAngle и deltaVelocity. AHRS 3DM-GX3-25 — быстро функционирующая система, в которой выходная скорость до 1 кГц выбирается пользователем.

3DM-GX3-25 AHRS поставляется с калибровочными программами для учета воздействия магнитных полей. Инженерам предлагается комплект разработчика.

Стандартный блок питается от напряжения 4,4–6,0 В DC и характеризуется потреблением мощности/тока 80 мА на 5 В. OEM требует регулируемое напряжение питания в диапазоне 3,2–5,5 В, также потребляя ток 80 мА при 5 В.

Рабочий температурный диапазон:  $-40...+75$  °C.

3DM-GX3-25 AHRS предназначен для следующих применений:

- транспортная навигация;
- стабилизация платформ;
- биомеханика;
- изнашиваемые (wearable) инерциальные следящие системы;
- съемка буровых скважин;
- определение расположения в пространстве.

## Лучшие MEMS-компоненты 2009 года датчиков движения (акселерометры и гироскопы)

### Kionix Inc. KXTF9

Kionix Inc. KXTF9 (рис. 9) — новый трехосевой акселерометр с уникальной функциональностью, предназначенный для сотовых телефонов и мобильных интернет-устройств, компьютерной периферии, спортивных тренажеров, персональной навигации.



Рис. 9. Новый трехосевой акселерометр KXTF9 с признаком Directional Tap/Double-Tap для создания интуитивного пользовательского интерфейса

Ранее, в 2008 году, Frost & Sullivan наградила акселерометр Kionix KXSC7, характеризующийся малым форм-фактором  $3 \times 3 \times 0,9$  мм и малым рабочим током в 230 мкА или менее. Тем же самым форм-фактором  $3 \times 3 \times 0,9$  мм отличается и новый Kionix Inc. KXTF9 — трехосевой MEMS-акселерометр с I<sup>2</sup>C интерфейсом, отмеченный бронзовой наградой на Sensors Expo 2009 года, совместимый pin-to-pin с трехосевыми акселерометрами серии KXTE9 (I<sup>2</sup>C), KXSD9 (IIC, SPI). В большом семействе акселерометров, предлагаемых Kionix, теперь практически все акселерометры — трехосевые, за исключением только аналоговых X-датчиков KXD94-7044 и KXD94-7138 в стандартных корпусах DFN с размерами  $5 \times 5 \times 1,2$  мм. Уменьшенные размеры корпусов  $3 \times 5 \times 0,9$  мм LGA — признак серий KXPS5 и KXRB5.

Сенсорный элемент датчика нового KXTF9 с высокими рабочими характеристиками производится из однокристального кремния с применением процесса глубокого реактивного ионного травления (Deep Reactive Ion Etching, DRIE) и защищается герметичным кремниевым колпачком. Датчик функционирует с использованием принципа разбаланса дифференциальной емкостной структуры и отмены смещений — для уменьшения ошибок вследствие процесса производства

и воздействия окружения. ASIC обнаруживает и переводит емкостные изменения в аналоговое напряжение, пропорциональное ускорению, а далее коммуникация осуществляется по стандартному интерфейсу I<sup>2</sup>C.

Но трехосевой акселерометр KXTF9 отличается от многих стандартных устройств еще и уникальным признаком Directional Tap/Double-Tap — это лидирующая инновация Kionix, позволяющая значительно усовершенствование пользовательского интерфейса детектирования движения. Признак детектирования KXTF9 Directional Tap/Double-Tap detection (tap — легкие удары, постукивание) обнаруживает одиночный tap-вход и двойной вход (double-tap), дает информацию об оси ускорения и направлении каждого tap-воздействия, допуская до 12 определенных пользователем функциональных команд.

KXTF9 Directional Tap/Double-Tap срабатывает при обнаружении как быстрого и легкого постукивания, так и двойного стука на любой из 6 поверхностей объекта ( $\pm X$ ,  $\pm Y$ ,  $\pm Z$ ). Встроенный алгоритм позволяет акселерометру выделять одиночный и двойной стук и его направление. Пользователи могут использовать эти 12 одиночных/двойных стуков как команды, создавая свой уникальный, инновационный, мощный и интуитивный пользовательский интерфейс. В ASIC KXTF9 встроен алгоритм, позволяющий создавать 12 tap-активируемых команд для осуществления любых пользовательских функций. Например, одиночный стук по поверхности телефона может вызвать голосовую почту, двойной стук по его задней поверхности — активацию интернет-доступа. Данный признак является полностью программируемым.

Встроенный алгоритм сообщает об изменениях в движении устройства, допуская обнаружение движения (активный алгоритм) или отсутствие движения (неактивный алгоритм). Датчик поддерживает обнаружение ориентации и алгоритмы прерывания. Признак обнаружения ориентации дает информацию, например, о ландшафтных и портретных условиях.

KXTF9 питается от постоянного напряжения 1,8–3,6 В DC и имеет выходной стандартный интерфейс I<sup>2</sup>C.

Схема KXTF9 характеризуется возможностями пользовательского программирования, достаточными для адаптации устройства к широкому кругу применений: пользовательским программированием параметра (Output Data Rate, ODR) с АЦП на определенных пользователем частотах выборки (сэмплов), выбираемым пользователем 8- или 12-битным разрешением, цифровым ФВЧ с выбираемой частотой среза. Диапазон ускорений выбирается пользователем из следующих стандартных значений диапазонов:  $\pm 2,0$ ,  $\pm 4,0$ ,  $\pm 8,0$  g. Рабочий диапазон температур:  $-40 \dots +85$  °C.

### Малошумящий гироскоп CRS09 Silicon Sensing Systems

Малошумящий гироскоп CRS09 Silicon Sensing Systems (рис. 10) обладает высокими в своем классе рабочими характеристиками, температурной стабильностью, возможностью выбора двух диапазонов детектирования с различными характеристиками:  $\pm 200$ °/с (CRS09-01 и CRS09-11) и  $\pm 100$ °/с (CRS09-02, CRS09-12). Дизайн кремниевого MEMS-гироскопа скомбинирован с дискретной электроникой, что и обеспечивает высокие рабочие характеристики. Малый шум (среднеквадратическое значение  $0,03$ °/с rms в частотной полосе 3–30 Гц) и высокая стабильность позволяют производителю рекомендовать данный компонент для замещения волоконно-оптических гироскопов (FOG). Нелинейность  $\leq \pm 0,1\%$  полной шкалы, поперечная чувствительность — менее 2%.



Рис. 10. Гироскоп CRS09 Silicon Sensing Systems

Температурные вариации специфицированы в  $\pm 1\%$  максимум и составляют для смещения  $< \pm 3$ °/с (CRS09-01 и CRS09-02) и  $< \pm 1$ °/с (CRS09-11 и CRS09-12). Рабочий температурный диапазон:  $-40 \dots +85$  °C.

Напряжение питания — 4,75–5,25 В. Выход — аналоговый (не ратиметричный). Время активации после включения (start-up) — менее 0,5 с.

Применения включают стабилизацию в замкнутом цикле, прецизионную контрольно-измерительную аппаратуру летательных ап-

паратов (АHRS) и другие, в которых малые шумы — одно из ключевых требований.

Данные о температуре и частоте вибрации кремниевого кольца обеспечиваются как дополнительные выходы, что допускает более точное определение характеристик датчика при его включении в клиентскую схему.

### СМА3000

СМА3000 (рис. 11) — новый трехосевой акселерометр VTI, предназначенный для детектирования движения и контроля в портативных потребительских электронных устройствах: мобильных телефонах, игровых устройствах, спортивной электронике и других. В начале 2009 года, в течение которого запланировано массовое производство устройств, компания представила данный акселерометр как самый малый и наименее энергопотребляющий трехосевой акселерометр среди известных в мире аналогов. Его размеры —  $2 \times 2 \times 0,95$  мм.

Потребление тока — до 10 мкА на частоте выборки 40 Гц, при напряжении питания 1,7–3,6 В.

Общие признаки акселерометров серии СМА3000 включают возможность пользовательского выбора диапазонов 2 г и 8 г, ударопрочность, RoHS-совместимость.

СМА3000-D01 с цифровыми интерфейсами SPI и I<sup>2</sup>C оптимизированы для систем с малым энергопотреблением (7–70 мкА). Акселерометры характеризуются также выбираемой пользователем частотой срабатывания. Сигналы прерывания могут включаться посредством информации о готовности данных, движения и свободного падения.

СМА3000-A01 обеспечивает три непрерывных ратиметрических аналоговых выходных сигнала для интеграции в системы с АЦП. Потребление тока этими датчиками составляет 180 мкА.

СМА3000 отличается реализованной для этого датчика новой концепцией корпуса, получившей название Chip-on-MEMS (CoM). MEMS и ASIC производятся на от-



Рис. 11. СМА 3000 — трехосевой акселерометр VTI на основе технологии Chip-on-MEMS (CoM)

дельных подложках, а затем, согласно концепции Chip-on-MEMS, ASIC-чипы (флип-чипы) размещаются поверх MEMS-подложки. К MEMS-подложке прикрепляются слои для перераспределения и изоляции, а также внешнего соединения, прежде чем ASIC добавляется к MEMS, и поэтому чипы ASIC изолированы пассивирующим слоем.

Вывод 1 маркируется обычным образом.

SoM-технология обеспечивает следующие признаки: сниженную индуктивность выводов, малый размер чипов и корпуса, с толщиной профиля менее 1 мм, малый вес, технологичность при автоматической пайке (устройства поверхностного монтажа).

Дополнительное корпусирование не требуется. Компоненты CMA3000 должны быть помещены на плату или другие пользовательские подложки (например, керамику) согласно их геометрии и запаяны. В данном случае рекомендуется автоматическое позиционирование компонентов.

Для прототипирования предлагаются образцы и платы с устройствами.

#### **Крэш-акселерометр 7264G Endevco**

Крэш-акселерометр 7264G Endevco представляет собой еще одно устройство следующего поколения, отражающее работу компании по усовершенствованию устройств на уровне сенсорной структуры. Датчик 7264G измеряет уровни g в течение высокого ударного воздействия порядка 2000 g с использованием новой MEMS-структуры, отличающейся повышенной прочностью (устойчивость к ударным воздействиям — до 10 000 g по каждой из трех осей), для ослабления резонанса демпфируемой без значительного фазового смещения. 7264G пред-

#### **Список компаний и сайтов:**

- Infineon Technologies AG — [www.infineon.com](http://www.infineon.com)
- Hitachi Metals America, Ltd. — [www.hitachimetals.com](http://www.hitachimetals.com)
- NVE Corporation — [www.nve.com](http://www.nve.com), [www.gmr-sensors.com](http://www.gmr-sensors.com)
- Moving Magnet Technologies SA (MMT) — [www.movingmagnet.com](http://www.movingmagnet.com)
- Austriamicrosystems AG — [www.austriamicrosystems.com](http://www.austriamicrosystems.com)
- Diversified Technical Systems, Inc. (DTS) — [www.e-sensing.com](http://www.e-sensing.com)
- SBG Systems SAS — [www.sbg-systems.com](http://www.sbg-systems.com)
- MicroStrain Inc. — [www.microstrain.com](http://www.microstrain.com)
- Kionix Inc. — [www.kionix.com](http://www.kionix.com)
- Silicon Sensing Systems Ltd. — [www.siliconsensing.com](http://www.siliconsensing.com)
- VTI Technologies — [www.vti.fi](http://www.vti.fi)
- Endevco Corporation — [www.endevco.com](http://www.endevco.com)

назначен для систем с частотным входом, для которых точность измерения с новым устройством может быть повышена.

#### **Заключение**

В рамках одной статьи, как обычно, невозможно рассказать обо всех новых предложениях компонентов, обновлениях линеек ведущих производителей датчиков движения, подтверждающих тенденции развития этого значительного и объемного рыночного сегмента.

Вероятно, это и не требуется — ввиду того, что данный рыночный сегмент непрерывно развивается, можно предположить, что следующее поколение датчиков — 2010 года — будет характеризоваться еще большей функциональностью, более высокими уровнями интеграции функциональных признаков — как датчиков/энкодеров положения, так и MEMS-компонентов, более высокими показателями точности, надежности, оптимальной ценой. ■

#### **Литература**

1. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Актуализация надежных и недорогих интегральных компонентов // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
2. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 4. Новые перспективы автомобильных датчиков — технологии магниторезисторов ГМР и КМР // Компоненты и технологии. 2005. № 5.
3. Сысоева С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ. Выводы и обновление // Компоненты и технологии. 2006. № 7.
4. Сысоева С. Новые концепции датчиков скорости/положения // Компоненты и технологии. 2008. № 1.
5. Masson G., Ronnat Y., Dorge T., Biwersi S. Multiturn and high precision through-shaft magnetic sensors. Moving Magnet Technologies SA. [www.movingmagnet.com](http://www.movingmagnet.com)