

# Цифровые МЭМС акселерометры в automotive-исполнении

Андрей Лебедев (Выборг)

Статья знакомит читателя с новой серией МЭМС-акселерометров финской фирмы VTI Technologies. В публикации приведены общие характеристики, сведения о функциональных особенностях и областях применения датчиков.

Акселерометры представляют собой интегральные компоненты, без которых невозможно представить современный автомобиль. По уровням измеряемых диапазонов ускорения автомобильные акселерометры делятся на:

- акселерометры high-g-ускорения для фронтальных подушек безопасности – измеряют ускорения в десятки и сотни g;
- акселерометры low-g-ускорения для остальных автомобильных систем измерения ускорения (low-g акселерометры) и углов наклона (инклинометры) – измеряют ускорения порядка нескольких g.

Например, акселерометры low-g и инклинометры применяются для детектирования крена в системах курсовой устойчивости ESC/ESP, в ABS, системах мониторинга давления накачки шин, контроля вибрации двигателя и в охранных сигнализациях.

Сегодня на рынке присутствует достаточно много фирм, занимающихся разработкой и производством low-g-акселерометров и инклинометров для автомобильной промышленности. Эта область применения характеризуется большими

объёмами потребляемых комплектующих, что позволяет производителям акселерометров окупать инвестиции в разработку новых технологий и гарантировать низкую цену компонентов [1–2]. Потребителю крайне важно правильно сориентироваться в множестве предложений на рынке и выбрать для себя наиболее оптимальный вариант.

Нелишним будет напомнить, что акселерометр – это датчик для измерения ускорения, которое может быть линейным или угловым, статическим (гравитационным) или динамическим (вибрационным). Выходной сигнал акселерометра пропорционален измеряемому ускорению (в автомобиле обычно линейному динамическому), выход инклинометра пропорционален углу, обычно измеряемому в квазистатическом частотном диапазоне.

В подавляющем большинстве автомобильных систем сегодня используются двухосевые low-g-датчики, причём в новых разработках требуются датчики с цифровым выходным сигналом. Для автомобильной области применения также важна высокая надёжность устройств.

Новые акселерометры VTI Technologies разработаны именно для задач измерения линейных ускорений и углов наклона, где важна «законченность» датчика, его готовность к использованию, оцифрованный выходной сигнал, надёжность и малое энергопотребление.

VTI разрабатывает и производит кремниевые емкостные датчики ускорения около 20 лет. Особое внимание компания уделяет дизайну сенсорного элемента и разработ-

кам ASIC для автомобильных применений, в том числе, в клиентском варианте, включая схемотехнику и корпусирование.

Не так давно фирма VTI Technologies заявила о разработке технологии 3D-MEMS (поверхностная и объёмная обработка кремния) как собственного комбинированного метода производителя и о применении этой технологии для создания чувствительных элементов интегральных акселерометров, инклинометров, а также датчиков давления.

В 2007 г. VTI Technologies представила на рынок новую линейку акселерометров SCA8X0/21X0/3100 (см. рис. 1), которые компания относит к новому поколению автомобильных акселерометров, разработанных специально для автомобильных систем. На сегодня в автомобильной промышленности требуются мультиосевые измерения, цифровая передача данных, высокая надёжность и оптимальное соотношение цены и рабочих характеристик, прежде всего, точности.

Эта разработка приобрела статус новой концепции, которая получила название автомобильной платформы VTI цифровых акселерометров – Automotive Digital Accelerometer Platform (ADP). Основной идеей концепции является «законченность» цифрового измерения ускорения или наклона в одном направлении, при любых комбинациях двух направлений либо во всех трёх направлениях. Платформа основана на новой серии МЭМС-акселерометров для автомобильной электроники.

Надёжность и качество low-g-акселерометров и инклинометров является общей стратегией работы компании как для уже существующих, так и для потенциальных областей применения.

Характеристики надёжности платформы ADP достаточно высоки, что позволяет применять датчики в жёстких условиях эксплуатации, в



Рис. 1. Датчики Automotive Digital Accelerometer Platform ориентированы на автомобильно-промышленные задачи

том числе в автомобильной электронике. Рабочий температурный диапазон составляет  $-40...+125^{\circ}\text{C}$ , максимальное ускорение перегрузок (ударное ускорение) – 20 000 g. Продукция соответствует стандартам автомобильной электроники (АЕС, набор тестов Q100 для интегральных микросхем), стандарту TS16969 и сертифицирована ISO 14100.

Массовое производство и отгрузка датчиков запланированы на лето 2008 г. Инженерные образцы доступны сейчас.

## СХЕМА И ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ТИПИЧНОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ

Корпус Dual Flat Lead типового датчика SCA3100/SCA21x0/SCA8x0 имеет размеры  $7,6 \times 8,6 \times 3,3$  мм, 12 контактов и предназначен для поверхностного монтажа. Корпус DFL соответствует директивам RoHS и ELV.

Внутри корпуса располагается чувствительный элемент (ЧЭ) для одной, двух или трёх осей измере-

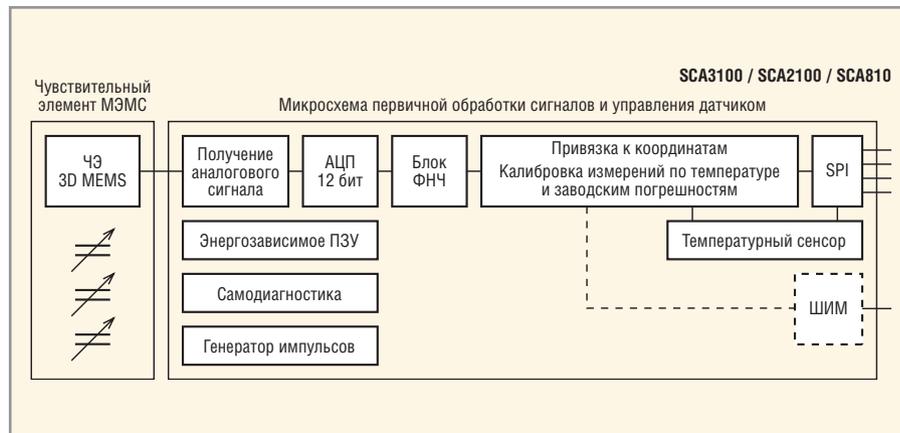


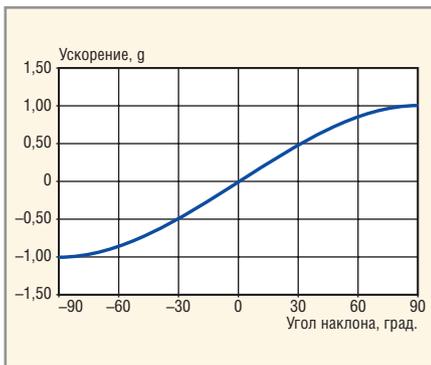
Рис. 2. Акселерометры VTI – компоненты высокой степени интеграции. Для измерений нужны источник питания и микроконтроллер

ния и микросхема управления и обработки сигнала ASIC с датчиком температуры. Считывание значений ускорения/температуры и управление датчиком осуществляется через набор регистров по интерфейсу SPI. Для одноосевых акселерометров предусмотрен дополнительный ШИМ-выход.

Общая платформа подразумевает взаимозаменяемость 3-, 2- и 1-осевых датчиков. То есть датчики име-

ют одинаковые габариты, напряжение питания, набор контактов и регистров. Точность чувствительных элементов в датчиках также одинакова.

На рис. 2 показана блок-схема акселерометра SCA3100/SCA21x0/SCA8x0. Сигнал с чувствительного элемента (ЧЭ) первоначально усиливается, фильтруется и преобразуется в аналоговый. Далее он оцифровывается 12-разрядным АЦП. Встроенные



**Рис. 3.** При измерении одноосевым инклинометром углов более 30° точность значительно снижается

фильтры низких частот пропускают полезную составляющую сигнала (частота среза фильтра составляет 30...55 Гц). После того как получен цифровой сигнал и удалены собственные шумы, происходит привязка к координатным осям и калибровка.

Компенсация систематической погрешности и температурного дрейфа осуществляется автоматически в микросхеме акселерометра. Для этого используются заводские значения, «защитые» в энергонезависимом ПЗУ, и измерения температурного сенсора, расположенного «на борту» микросхемы.

В результате максимальный дрейф нуля (смещение) в полном рабочем температурном диапазоне оценивается, например, для трёхосевого датчика SCA3100 в 70 мг (измерительный диапазон  $\pm 2$  g для каждой оси), а с учётом отрицательного влияния температуры, срока службы и возможных ошибок калибровки – в 100 мг. Другие технические характеристики акселерометров (линейность, шумы) рассматриваются ниже. Забегая вперёд, можно сказать, что для многих автомобильных применений типовые характеристики датчиков вполне приемлемы.

Важно подчеркнуть, что характеристики датчика определяются возможностями технологии 3D-MEMS и ASIC. 3D-MEMS позволяет формировать трёхмерные, чувствительные к ускорению, защищённые (инкапсулированные) структуры. Вследствие применения демпфирования эти структуры характеризуются надёжностью работы в условиях вибраций, а также малыми размерами, малым энергопотреб-

лением, простотой интеграции с ASIC.

Для инклинометров точность технологии 3D-MEMS VTI заявлена как лучше одной угловой минуты, что перекрывает показатели многих других МЭМС-технологий.

Кроме того, при включении датчик автоматически проверяет состояние ПЗУ, корректность измерений ЧЭ и работу микросхемы. Эти этапы диагностики можно инициировать и программно через регистр CTRL. Самодиагностика повышает надёжность датчика как компонента системы в жёстких условиях эксплуатации.

Акселерометры новой автомобильной платформы ADP отличаются малым энергопотреблением. Входное напряжение – 3,3 В, рабочий ток – до 5 мА, ток в спящем режиме – 120 мкА. В качестве источника возможно использование батареек, что востребовано, например, в навигационных или противоугонных системах.

Чувствительность акселерометров серии ADP – 900 счётных единиц Count на 1 g, где Count – десятичное значение в паре регистров соответствующей оси. Следовательно, теоретическое цифровое разрешение схемы – 1,1 мг, но окончательно порог чувствительности будет определяться шумовой составляющей. На выходе датчика в отсутствие ускорения – нуль. Линейное ненулевое ускорение рассчитывается отношением  $\text{Count}/900$  [g].

В акселерометрах SCA3100/SCA21x0/SCA8x0 находятся 64 регистра. Из них три пары регистров содержат значения ускорения по осям X, Y, Z (если используются), одна пара – значение температуры. Регистры STATUS и INT\_STATUS отображают статус самодиагностики, ошибки контрольной суммы, превышение диапазона измерения ( $\pm 2$  g), ошибки SPI. Режимы сна, выдача SPI-кадра и варианты самодиагностики задаются через регистр CTRL. Частота SPI-интерфейса составляет 8 МГц. Если частота хост-контроллера выше, результаты замеров будут повторяться, пока на датчик не поступит новое значение параметра.

Чувствительный элемент делает замеры 2000 раз в секунду (скорость передачи данных). Программно можно задать необходимое количество от-

счётов, чтобы хост-контроллер использовал усреднённое значение измеряемой величины ускорения, например, 10, 50, 100 отсчётов.

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА АКСЕЛЕРОМЕТРАМИ ADP

Полоса пропускания датчиков VTI не превышает 50 Гц, что может оказаться недопустимым в некоторых динамических измерениях, но отлично подходит для измерения наклона. Значение угла рассчитывается внешним контроллером с помощью тригонометрических функций.

В некоторых применениях требуется измерять отклонение какого-либо объекта обычно в двух взаимно перпендикулярных направлениях – т.е. отклонение от вертикального или горизонтального положения в гравитационном поле Земли. Часто это делается для компенсации измерений собственно ускорения или уровня.

Пусть угол наклона измеряется одноосевым датчиком относительно оси земного притяжения (Z). При вращении объекта сигнал на выходе акселерометра будет меняться по синусоиде. Нулевому углу наклона соответствует нулевое ускорение, ненулевому – значение  $x = \sin\theta$  [g]. Угол  $\theta$ , следовательно, равен  $\arcsin x$  [град]. Наиболее значительный вклад в погрешность измерений будет вносить смещение нуля. В связи с синусоидальностью передаточной функции измерение угла одноосевым датчиком сопровождается и ростом погрешности с увеличением угла (см. рис. 3). Другие факторы, такие как температурные дрейфы, поперечная чувствительность, шумы, также будут оказывать влияние на точность измерений.

При стандартном планарном монтаже рекомендуется использовать как минимум двухосевой датчик (X–Z, Y–Z) или трёхосевой. В этом случае можно достичь линейной зависимости сигнала от угла наклона (см. рис. 4). Расчётный угол равен  $\arctg(x/z)$  [град], где  $x$  и  $z$  – значения ускорения по осям X(Y) и Z [g]. При вращении объекта вокруг горизонтальной оси точки  $0^\circ$  и  $180^\circ$  соответствуют ускорению 1 g и –1 g.

Для измерения углов ориентации (крен, тангаж) объекта нет необходимости задавать точку отсчёта, так

как датчик выдаёт абсолютное отклонение от оси земного притяжения. Инклинометры – это, как правило, высокоточные устройства, но точность измерения угла наклона датчиками ADP не указана производителем, так как зависит от монтажа и метода формирования сигнала в конечном изделии. Точность – результат влияния многих факторов, о которых стоит упомянуть дополнительно.

## Погрешности

В акселерометры новой automotive-платформы встроены серьёзные средства повышения точности измерений – коррекция по заводским значениям, температурная компенсация, самодиагностика. Однако технология датчиков VTI не позволяет использовать их в задачах, где требуется особая точность измерений, например в регистраторах сейсмической активности.

Средние точностные характеристики у SCA3100/SCA21x0/SCA8x0 следующие: нелинейность – до  $\pm 20$  mg (в пределах диапазона  $\pm 1$  g), максимальная ошибка масштабного коэффициента –  $\pm 4\%$  от полного диапазона ( $\pm 2$  g).

Температурный дрейф смещения до  $\pm 70$  mg компенсируется самим датчиком, но можно дополнительно откалибровать и использовать разницу значений ускорения в реальных условиях и при комнатной температуре. Максимально возможный сдвиг нуля при совокупности неблагоприятных факторов достигает  $\pm 100$  mg. Собственный шум в SCA3100/SCA21x0/SCA8x0 не превышает 5 mg.

Поперечная чувствительность акселерометров, привязываемая к основному сигналу, – не более 5%. Максимальное поперечное ускорение при измерении угла наклона, зависящее от неточности монтажа ЧЭ, может быть и меньше. Влияние наклонов в «посторонних» плоскостях можно учитывать, откалибровав датчик в «идеальных» условиях. Например, нужная ось берётся вдоль оси Z, измерения ускорения – в точках 1 и  $-1$  g.

## Области применения

Датчики VTI Technologies могут использоваться как в автомобильных применениях (системы актив-

ной безопасности автомобилей и помощи водителю), так и в ряде «узких» промышленных областей.

Рекомендуемые автомобильные применения включают:

- контроль курсовой устойчивости (ESC, ESP);
- детектирование крена (Rollover);
- помощь при старте на холмах – Hill Start Assistant (HSA);
- электронная парковка тормозов – Electronic Parking Brake (EPB);
- контроль электро-управляемой подвески (ECS);
- навигационные системы;
- противоугонные системы (Antitheft System);
- сенсорные кластеры.

В промышленности потенциальные области применения – это приборы безопасности дорожно-строительной техники, подъёмно-транспортное оборудование (краны, укладчики, спецтехника), инклинометрия скважин и наклонное бурение. Возможно применение в гаражном оборудовании (стенды балансировки, развала-схождения, измерители люфта, проверка тормозной системы оборудования автомобилей).

Кроме того, применение акселерометров новой платформы возможно в любых областях, где необходимо цифровое многоосевое измерение ускорения и наклона, вибрации, ударов движения, и положения. При этом со стороны разработчика требуются минимальные усилия. Дополнительную информацию можно получить на сайте VTI Technologies.

## О других датчиках VTI

Акселерометры автомобильной платформы VTI являются продолжением линейки трёхосевых МЭМС-акселерометров с цифровым выходным сигналом. Датчики серии SCA3000 доступны с рабочим диапазоном 2, 3, 6 или 18 g для каждой оси. Ощутимыми преимуществами являются высокая точность чувствительного элемента (для датчика  $\pm 2$  g разрешение достигает  $0,75 \times 10^{-3}$  g или 0,04 угловых градуса) и малый рабочий ток (480 мкА для датчика с температурным сенсором и 120 мкА для датчиков без термокомпенсации). Аналогично новому семейству, электроника SCA3000 компенсирует погрешности смещения, масштабного коэффициента и

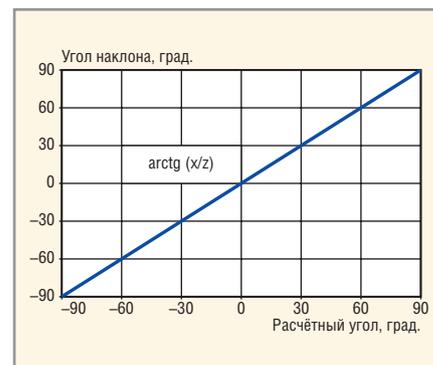


Рис. 4. Точное измерение углов наклона двухосевым инклинометром

линейности выходной характеристики. Дополнительные функциональные возможности – встроенные прерывания свободного падения и фиксации движения с возможностью конфигурирования порогов срабатывания, а также кольцевой FIFO-буфер на 64 отсчёта для каждой оси.

Наиболее точные «неавтомобильные» инклинометры VTI – двухосевые SCA100T и одноосевые SCA103T – имеют возможность аналогового и цифрового SPI-выхода. Для этих двух продуктов производитель указал в спецификациях максимальное угловое разрешение и другие дополнительные параметры, которые необходимо знать или рассчитать при измерении углов.

Старшие представители VTI – аналоговые двух- или одноосевые акселерометры. Возможен выбор по диапазону измерений и полосе пропускания.

## Литература

1. Сысоева С. Датчики инерции за пределами автомобильных применений. Компоненты и технологии. 2007. № 7. С. 58–66.
2. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров. Компоненты и технологии. 2006. № 3. С. 10–17.
3. www.vti.fi.
4. Спецификация серии SCA8x0\_21x0\_3100 Product Family Specification.pdf.
5. VTI Application Note AN14 Offset Calibration.pdf.
6. VTI Application Note AN21 Rotational Angle of Vertical Plane.pdf.
7. VTI Application Note AN32 Cross-axis Compensation.pdf.
8. VTI Technical Note TN6 Internal Temperature Sensing.pdf.

