# МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы

**ДЖАФЕР МЕДЖАХЕД**, менеджер по продукции STMicroelectronics, ЗАО «Компэл»

***Большая популярность МЭМС-акселерометров и гироскопов обусловлена их широким потенциалом для использования как в бытовой, так и в промышленной технике. МЭМС-датчики широко применяются и в автомобильной промышленности для управления подушками безопасности, и в охранной сигнализации, в навигационных системах для исчисления пройденного пути или определения маршрута следования. С 2008 г. компания STMicroelectronics занимает лидирующие позиции в производстве МЭМС-датчиков движения для портативной и бытовой электроники, охранных, автомобильных и навигационных систем.***

В настоящее время STMicroelectronics — мировой лидер в производстве МЭМС-акселерометров (см. табл. 1). Компания выпускает датчики на базе 200-мм кремниевых пластин, что обеспечивает более низкую себестоимость, по сравнению с конкурентами.

## ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА ТЕХНОЛОГИИ МЭМС-ДАТЧИКОВ КОМПАНИИ ST

**Малый разброс параметров в пределах изделия**. Изготовление компонентов в едином технологическом цикле позволяет получать практически неотличимые параметры у одинаковых компонентов.

**Высокая технологичность и повторяемость**. При изготовлении МЭМС-устройств в основном применяются хорошо отработанные и управляемые технологические процессы, что позволяет получать изделия с желаемыми характеристиками.

**Микроминиатюрность**. Применение технологии микросхем позволяет получить микромеханические и оптические узлы значительно меньших размеров, чем это возможно по традиционным технологиям.

**Высокая функциональность**. Миниатюрность изделия и возможность изготовления датчиков, обрабатывающих схем и исполнительных механизмов в одном устройстве позволяет создавать законченные системы достаточно большой сложности в миниатюрном корпусе.

**Улучшенные характеристики функционирования**. Электронная часть, а также электрические каналы связи с датчиками и механизмами, выполненные по интегральной технологии и имеющие малые размеры, позволяют улучшить такие характеристики как рабочие частоты, ЭМС, соотношение сигнал/шум и т.д. Высокая точность и повторяемость чувствительных элементов и их интегральное исполнение совместно с обрабатывающей схемой позволяют значительно повысить точность измерений. Кроме того, повторяемость и точность исполнения механических компонентов улучшает их характеристики.

**Высокая надежность и стойкость к внешним воздействиям**. Факторов, приводящих к повышению надежности и стойкости к внешним воздействиям изделий при применении МЭМС, достаточно много, и они зависят от конкретного типа изделия и его применения. Механические узлы МЭМС в условиях вибраций и ударов, как правило, работают лучше благодаря малым размерам и массе, а также тому факту, что механические узлы расположены в корпусе МЭМС, амортизированном выводами и конструкцией ПП.

**Низкая стоимость**. Применение МЭМС уменьшает стоимость как механической, так и электронной частей устройства, поскольку обрабатывающая электроника интегрирована в МЭМС-компонент, что позволяет избежать дополнительных соединений и, в некоторых случаях, согласующих схем.

## ОСНОВНЫЕ СЕКТОРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ГИРОСКОПОВ

– Игровые консоли.
– Стабилизация изображения в фото- и видеокамерах.
– Курсорные указатели для интеллектуальных интерфейсов пользователя.
– Расширение GPS-решений (системы счисления пройденного пути).
– Системы управления движением в робототехнике.
– Стабилизация платформ промышленного оборудования.

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУКЦИЯ МЭМС-ДАТЧИКОВ ДВИЖЕНИЯ ST

Датчики, выполненные по технологии МЭМС, изготавливаются с помощью тех же технологических приемов, что

*Таблица 1.* ***Динамика доходов основных производителей МЭМС продукции для сектора бытовой электроники и мобильных устройств***

| Производитель | Доход с продаж в 2006 г., млн долл. | Доход с продаж в 2007 г., млн долл. | Доход с продаж в 2008 г., млн долл. | Прирост в 2007–2008 гг., % | Доминирующий тип МЭМС-продукции |
|---|---|---|---|---|---|
| **STMicroelectronics** | **30,6** | **96,8** | **221,2** | **128** | **Акселерометры, гироскопы** |
| Analog Devices | 43,6 | 74,7 | 68,9 | –8 | Акселерометры, гироскопы |
| Epson Toyocom | 13,2 | 35,9 | 62,2 | 73 | Гироскопы и МЭМС-генераторы |
| Panasonic | 39,3 | 46,4 | 49,2 | 6 | МЭМС-гироскопы |
| Avago Technologies | 103,9 | 143,5 | 210,9 | 47 | Пьезоакустические МЭМС-фильтры |
| Texas Instruments | 457,4 | 305,0 | 174,9 | –43 | Микрозеркальные DLP-модуляторы для проекционных телевизоров задней проекции |
| Knoles | 82,8 | 93,7 | 119,8 | 28 | МЭМС-микрофоны |

и интегральные микросхемы. Акселерометр и гироскоп ST состоит из двух ключевых элементов:

– МЭМС-кремниевого микромеханического емкостного сенсора, чувствительного к ускорению или повороту;

– схемы обработки сигнала, преобразующей выходные сигналы этого сенсора в аналоговые или цифровые сигналы.

Для снижения стоимости, повышения надежности, помехозащищенности и плотности монтажа компания ST совмещает оба этих устройства в едином корпусе (см. рис. 1).

### ПРИНЦИП РАБОТЫ МЭМС-СЕНСОРА ДВИЖЕНИЯ

Принцип работы сенсоров движения (акселерометров и гироскопов) основан на измерении смещения инерционной массы относительно корпуса и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Емкостной метод преобразования измеренного перемещения является наиболее точным и надежным, поэтому емкостные акселерометры получили широкое распространение. Структура емкостного акселерометра состоит из различных пластин, одни из которых являются стационарными, а другие свободно перемещаются внутри корпуса. Емкости включены в контур резонансного генератора. Под действием приложенных управляющих электрических сигналов подвешенная масса совершает колебания. Между пластинами образуется конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния между ними. Под влиянием силы ускорения емкость конденсатора меняется. На рисунке 2 показана топология МЭМС-сенсора ST.

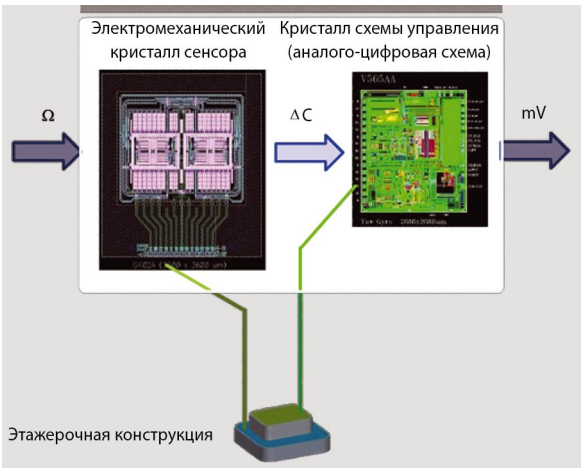



*Рис. 1.* ***Использование вертикальной конструкции для стыковки двух кристаллов***

В конструкции МЭМС-сенсоров для акселерометров и гироскопов используется камертонная система электродов. Две подвешенные массы совершают колебания по противоположным осям.

С появлением угловой скорости сила Кориолиса прикладывается в противоположных направлениях. Измеряемая дифференциальная емкостная составляющая пропорциональна углу перемещения. При линейном ускорении векторы приложения сил для обеих масс действуют в одном направлении. При этом дифференциальная разность равна нулю. В МЭМС-сенсорах физическое перемещение массы подвижных электродов преобразуется в электрический сигнал за счет емкостного преобразования.

### СЕМЕЙСТВО МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ST

Акселерометры ST, в зависимости от модели, способны измерять ускорение или вибрацию в одном или одновременно двух и трех направлениях. Значение смещения измеряется и в зависимости от типа выходного интерфейса преобразуется в аналоговый или цифровой выходной сигнал. На рисунках 3 и 4 приведены функциональные схемы и ключевые характеристики двух групп датчиков с аналоговым и цифровым выходом.

В сводной таблице 2 приведены основные характеристики датчиков акселерометров

Первая цифра в наименовании указывает число осей датчика (2 или 3). Далее следуют две цифры номера разработки. Первая буква в суффиксе означает тип выходного интерфейса (D — digital или A — analog).

STAIS226DS, AIS326DQ — двух- и трехосевые акселерометры, предназначенные для автомобильной промышленности и имеющие рабочий диапазон температур –40…105°C. Полоса пропускания: 640 Гц. Имеется функция самотестирования.

LIS202DL — ультракомпактный двухосевой акселерометр с низким потреблением энергии. У него имеются встроенные интеллектуальные функции, в т.ч. распознавание одинарного и двойного щелчка. Акселерометр можно запрограммировать на обнаружение простых пользовательских действий, например, связать функцию двойного щелчка с аппаратным прерыванием, благодаря чему звонок мобильного телефона приглушается в кармане одним движением. Пользователь может выбрать один

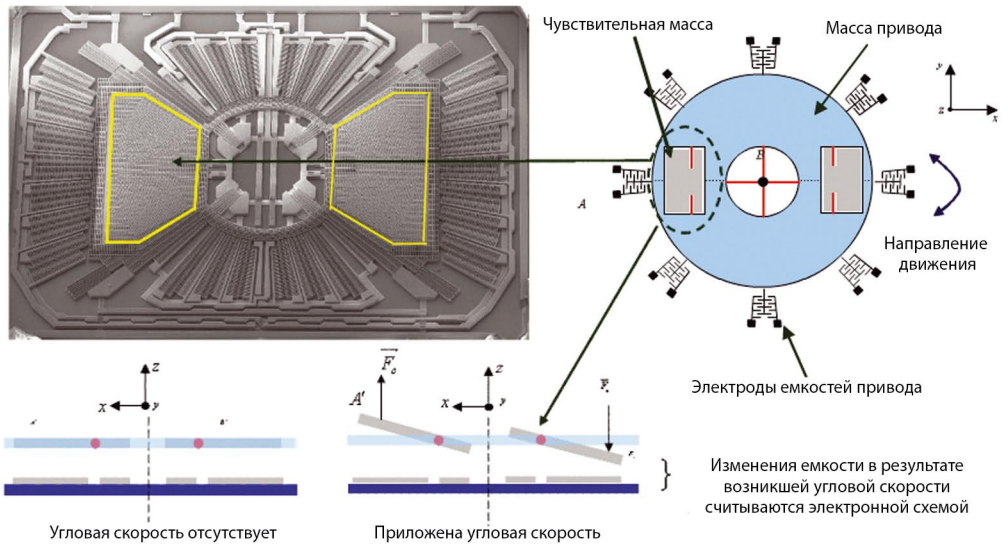



*Рис. 2.* ***Топология МЭМС-сенсора ST***

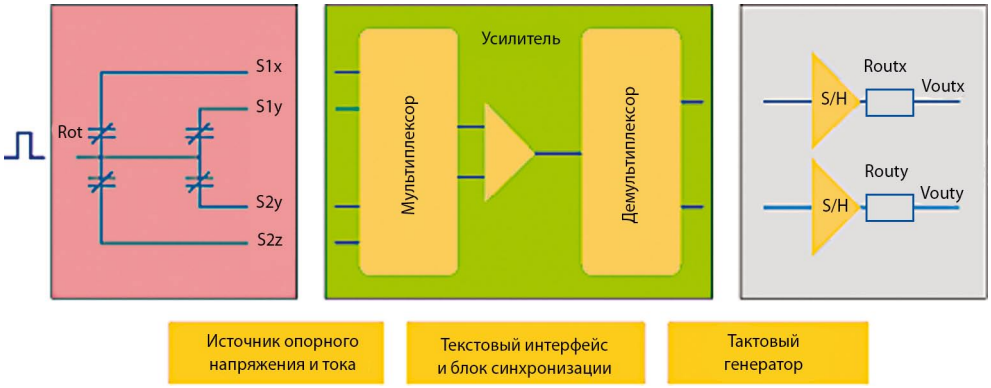



*Рис. 3.* ***Функциональная схема аналогового акселерометра ST***

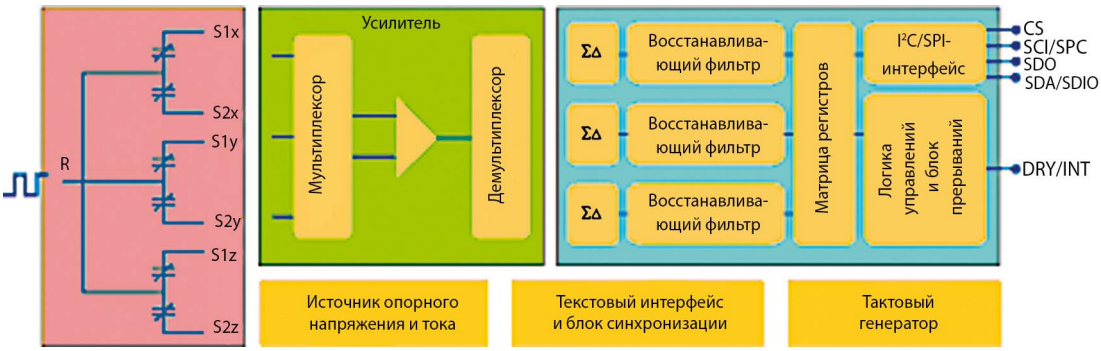



*Рис. 4.* ***Функциональная схема цифрового акселерометра ST***

*Таблица 2.* ***Семейство МЭМС-акселерометров STMicroelectronics***

| Тип | Число осей чувств. | $U_{пит}$, В | Интерфейс | Чувствительность, В/g | Диапазон измерения, g | Тип корпуса, его размеры, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| AIS326DQ | 3 | 3…3,6 | SPI | — | ±2/±6 | QFPN-28 7×7×1,9 мм |
| AIS226DS | 2 | | | | | SO-16L |
| **LIS202DL** | | 2,16...3,60 | I²C/SPI | | ±2/±8 | LGA 3,0×5,0×1,0 |
| **LIS244AL** | | 2,40...3,60 | Аналоговый | 0,42 | ±2 | LLGA 4,0×4,0×1,5 |
| **LIS302DL** | 3 | 2,16...3,60 | I²C/SPI | — | ±2/±8 | LGA 3,0×5,0×1,0 |
| **LIS331AL** | | 3,00...3,60 | Аналоговый | 0,478 | ±2 | LLGA 3,0×3,0×1,0 |
| **LIS3LV02DL** | | 2,16...3,60 | I²C/SPI | — | ±2/±6 | LGA 4,0×7,5×1,0 |
| **LIS3LV02DQ** | | | | | | QFPN 7,0×7,0×1,9 |
| **LIS3L02AL** | | 2,40...3,60 | Аналоговый | 0,66 | ±2 | LGA 5,0×5,0×1,6 |
| **LIS331DL** | | 2,16...3,60 | I²C/SPI | — | ±2/±8 | LLGA 3,0×3,0×1,0 |

из двух стандартных цифровых интерфейсов: SPI или I²C. Встроенные функции самотестирования позволяют проверять функционирование датчика после подачи напряжения на плату.

LIS244AL, LIS344AL — очень компактные двух- и трехосевые акселерометры для измерения небольших величин ускорения. Они объединяют в одном корпусе двухосевой МЭМС-датчик и интерфейсную микросхему, которая вырабатывает в реальном времени два независимых выходных аналоговых напряжения: одно для поперечного, другое — для продольного направлений. Акселерометры обладают очень низким уровнем шумов при минимальном потреблении энергии, что особенно важно для систем с батарейным питанием. Встроенные элементы самотестирования позволяют контролировать механическую и электрическую части устройства. Сенсоры предназначены для широкого спектра аппаратуры, критичной к размерам корпуса и потреблению энергии: пользовательские интерфейсы; охранные системы; дистанционное управление объектами; управление потреблением энергии с учетом движения, спортивные и медицинские приборы. Акселерометры LIS244ALH, LIS344ALH аналогичны сериям LIS244AL и LIS344AL, но имеют два диапазона измерений: ±2 или ±6g.

LIS302DL — многофункциональный датчик ускорения для систем защиты жестких дисков, создания бесконтактных интерфейсов в современных мобильных телефонах и ноутбуках. Акселерометры выпускаются в пластмассовом корпусе с габаритами 3×5×0,9 мм, что значительно экономит место и минимизирует вес мобильных аппаратов. Отличительные черты этих приборов — низкое потребление энергии (1 мВт) и высокая устойчивость к вибрации и ударам с ускорением до 10000g. Для считывания данных выбирается один из двух доступных стандартных интерфейсов — SPI или I²C. Кроме того, имеются два независимых порта для вывода программируемых сигналов прерывания. Два отдельных сигнала прерывания могут формироваться при превышении величины свободного падения или порога, устанавливаемого пользователем. Оба сигнала используются для контроля превышения установленных пользователем порогов для любых значений в диапазоне измеряемых ускорений.

На сегодняшний день трехосный цифровой МЭМС-акселерометр LIS302DLH, обеспечивающий высокую

точность и стабильность с 16-разрядным преобразованием, является самым тонким в мире среди подобных устройств — толщина его корпуса составляет всего 0,75 мм, а площадь основания — 3×5 мм.

Низкое напряжение питания и малое потребление делают его идеальным для использования в приборах с батарейным питанием. Микросхема в состоянии покоя и отсутствия изменений сигнала находится в режиме пониженного энергопотребления с автоматической активацией при обнаружении движения. Диапазон измерения входных сигналов: ±8 г. Измеряемый сигнал передается через последовательные интерфейсы $I^2C$/SPI в формате, обеспечивающем непосредственное подключение к системному процессору без использования дополнительных компонентов. Датчик LIS302DLH полностью совместим с другими ранее разработанными трехосевыми акселераторами семейства Piccolo, включая LIS302DL и LIS35DE, обеспечивая тем самым высокий уровень масштабирования продукции (сохранение совместимости при расширении функциональных возможностей). Приложения на базе цифрового акселерометра LIS302DLH включают в себя функции обнаружения движения; тревожной сигнализации о смене ориентации в пространстве; обнаружения состояния свободного падения; мониторинга уровня вибрации.

LIS3LV02DL — трехосевой цифровой линейный акселерометр с программируемым 12- или 16-разрядным представлением данных. Датчик поддерживает два цифровых интерфейса (SPI/$I^2C$), имеет низкую мощность потребления и высокую разрешающую способность. При подаче напряжения питания сенсор производит процедуру самотестирования, что позволяет пользователю быть уверенным в исправности устройства. Датчик можно сконфигурировать на генерацию прерывания при обнаружении ускорения свободного падения. Имеется возможность программной установки порога значения ускорения, при превышении которого, по крайней мере в одной из трех осей, устройство выдаст сигнал прерывания. LIS3LV02DL доступен в пластмассовом корпусе LGA16. Рабочий диапазон температур составляет –40…85°C.

LIS3LV02DQ — трехосевой акселерометр для измерения небольших значений ускорения со стандартными цифровыми интерфейсами SPI/$I^2C$. В LIS3LV02DQ полосу пропускания можно гибко задать командой программного обеспечения, позволяя разработчикам эффективно менять условия измерения. Как и в предыдущем устройстве, в данном случае реализована возможность программной установки порога, при превышении которого устройство формирует прерывание. Эта информация помогает быстро понять, в каком направлении перемещается датчик, прежде чем будут произведены какие-либо вычисления.

LIS331AL, LIS331DL — трехосевые, линейные, универсальные, экономичные МЭМС- акселерометры класса «нано». Высокофункциональные датчики с низким потреблением энергии обеспечивают очень высокую устойчивость к вибрациям и ударам с ускорениями до 10000g. Нанодатчики движения компании ST предназначены для приложений с небольшими ускорениями для бытовых и промышленных устройств, включая интерфейсы движения пользователя в мобильных и игровых устройствах, обнаружения свободного падения для защиты данных на жестком диске, обнаружения и компенсации вибрации в бытовой технике. Конструкция датчика включает в себя два стандартных цифровых интерфейса SPI и $I^2C$. Пользователь может выбрать любой из них. Кроме того, имеются встроенные интеллектуальные функции, включающие распознавание одинарного и двойного щелчка, обнаружение выхода из состояния покоя и движения, фильтры верхних частот и две выделенных гибко программируемых линии прерывания. Датчик обеспечивает полную шкалу выходного сигнала ±2,0g, высокую температурную стабильность и большую устойчивость к смещению. Встроенные функции самотестирования позволяют проверять датчик после установки на плату. LIS331DLF, LIS331DLM, LIS331DLH — 6-, 8- или 12-разрядные приборы с цифровым выходом, которые являются pin-to-pin- и программно-совместимыми.

Основным назначением инерциальных датчиков является измерение ускорения, однако на их основе можно измерять наклон, движение объекта, определение положения в пространстве, силу ударов и вибрацию.

### СЕМЕЙСТВО МЭМС-ГИРОСКОПОВ ST

Семейство гироскопов содержит трехосевые датчики (Yaw, Pitch и Roll). На рисунке 5 показаны направления и названия чувствительных осей датчика по отношению к плоскости корпуса.

Базовым параметром гироскопов является чувствительность — отношение изменения выходного сигнала к изменению угла поворота.

Параметр Zero-rate характеризует начальное смещение выходного сигнала при нулевом повороте датчика. Смещение связано с технологией изготовления и может измениться после монтажа микросхемы. Оно имеет слабую зависимость от температуры и должно учитываться при обработке и выделении полезного сигнала.

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИРОСКОПА LYPR540AH

- Напряжение питания: 2,7…3,6 В.
- Расширенный температурный диапазон (–40…85°C).
- 3 независимых аналоговых канала.
- Диапазон полной шкалы: опции ±400 и ±1600 dps.
- Высокая ударопрочность.
- Встроенное самотестирование.

Объединение акселерометра и гироскопа позволяет создавать интегрированные инерционные системы (Inertial Movement Units, IMU).

### ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАКОНЧЕННЫЕ ДАТЧИКИ

ST производит также функционально ориентированный датчик FC30, который представляет собой датчик 3D-ориентации прибора в пространстве и предназначен для мобильных и портативных устройств, в частности, для использования в электронных фоторамках. Встроенный в портативный прибор датчик обеспечивает слежение за ориентацией плоскости экрана дисплея прибора по отношению к пользователю. При обнаружении поворота плоскости экрана вокруг оси производится и поворот

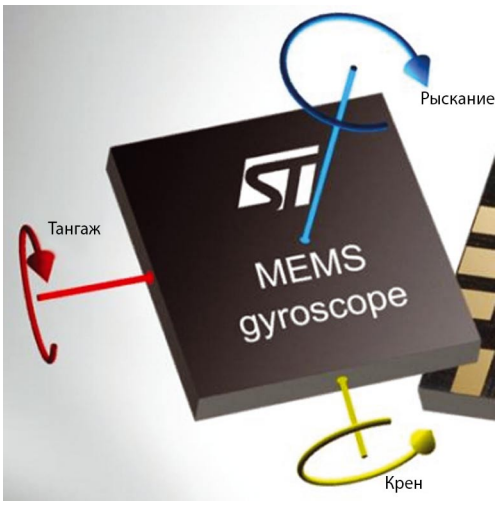
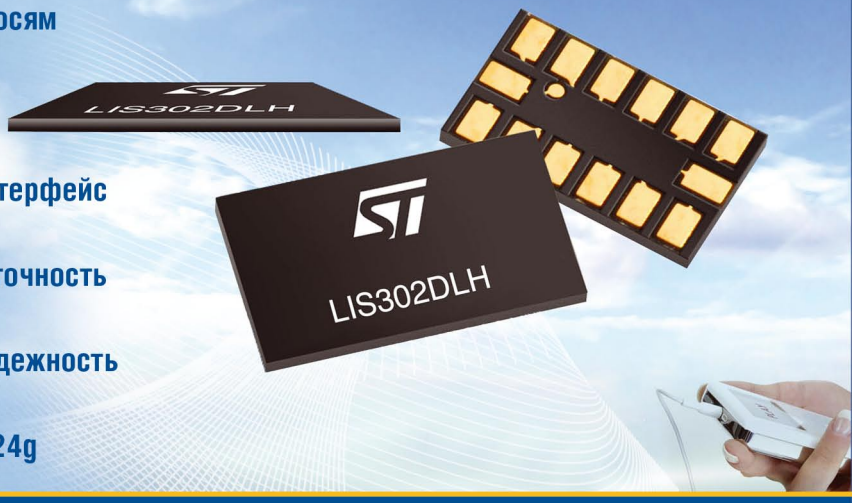



*Рис. 5.* ***Расположение базовых осей чувствительности МЭМС-гироскопа по отношению к корпусу***

STMicroelectronics

Измерь параметры полета с МЭМС-акселерометрами

- Измерение по двум или трём осям
- Низкое потребление энергии
- Аналоговый или цифровой интерфейс
- Высокая чувствительность и точность
- Высокая ударостойкость и надежность
- Диапазоны измерения ±2g...±24g




Москва
Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902
E-mail: msk@compel.ru

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403
E-mail: spb@compel.ru

Компэл
www.compel.ru

изображения, для того чтобы обеспечить его нормальное положение по отношению к пользователю.

Датчик также позволяет обнаруживать одиночные и двойные щелчки по экрану в процессе навигации в пользовательском графическом интерфейсе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное развитие мобильных устройств возвело акселерометры (датчики ускорения, перемещения и ориентации) в разряд базовых массовых компонентов современной продукции. К 2010 г. рост рынка МЭМС-акселерометров составит 14,1%, а с 2011 по 2012 гг. ожидается удвоение этого сегмента. Массовому использованию датчиков акселерометров способствовало их существенное удешевление — в 2008 г. цена МЭМС-чипа снизилась до 1 долл. и менее. В настоящее время 40% выпускаемых акселерометров находит свое применение в автомобильной промышленности, а в мобильных телефонах и другой потребительской электронике пока используется лишь 22% всего объема этих чипов. При этом доля такого применения будет увеличиваться. К 2013 г. рынок акселерометров вырастет до 1,7 млрд долл. Успех Apple iPhone способствовал росту продаж микроэлектромеханических систем. К концу текущего года 10% из всех поставленных мобильных устройств, а таких насчитывается 1,29 млрд, включали МЭМС-акселерометры. Выручка от продаж всех типов МЭМС для мобильных устройств к концу 2012 г. достигнет 1,3 млрд долл. Востребованы МЭМС-акселерометры и гироскопы у производителей игровых консолей. В ближайшие годы ожидается рост спроса на МЭМС-устройства для ПК.

### *ЛИТЕРАТУРА*

*1. Александр Райхман. STMicroelectronics — мировой лидер в производстве датчиков движения//Новости электроники № 2, 2009.*

*2. Андрей Еманов. Инерциальные датчики STMicroelectronics.*

*3. Веб-семинар "MEMS Gyroscopes: Their main applications, internal structure, working principles".*

*4. Datasheet. LYPR540AH МЭМС motion sensor: 3 axis analog output gyroscope.*

*5. AN2041 Application note LIS3LV02DQ: 3-axis — ±2g/±6g Digital Output Low Voltage Linear Accelerometer.*



## СОБЫТИЯ РЫНКА

**| AGILENT TECHNOLOGIES ОБЪЯВИЛА О ЗАВЕРШЕНИИ СДЕЛКИ ПО ПРИОБРЕТЕНИЮ ЛИНЕЙКИ РЧ-ПРИБОРОВ KEITHLEY INSTRUMENTS |** 30-го ноября компании Agilent Technologies и Keithley Instruments объявили о том, что сделка по приобретению компанией Agilent Technologies существенной части линейки радиочастотных приборов Keithley завершена. Как ранее объявила компания Keithley, стороны подписали окончательное соглашение о продаже 19-го ноября 2009 г.

«Это приобретение — удачная сделка для Agilent, — заявил Рон Нерсесян, президент департамента электронных измерений компании Agilent. — Мы уверены, что талантливая команда разработчиков и линейка РЧ-приборов, выпускаемая ранее Keithley, станут хорошим дополнением для Agilent, что еще в большей степени укрепит позиции нашей компании в сфере РЧ-измерений. Мы будем рады предложить клиентам еще более широкий ассортимент РЧ-приборов».

«Мы рады, что команда разработчиков продолжит работу в Agilent, — сказал Джозеф П. Кейтли, председатель совета директоров компании, президент и генеральный управляющий. — Мы уверены, что их опыт будет способствовать дальнейшему развитию РЧ-разработок в компании Agilent».

*www.agilent.ru*