

---

# МЭМС-акселерометры

---

- 
- 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.
-

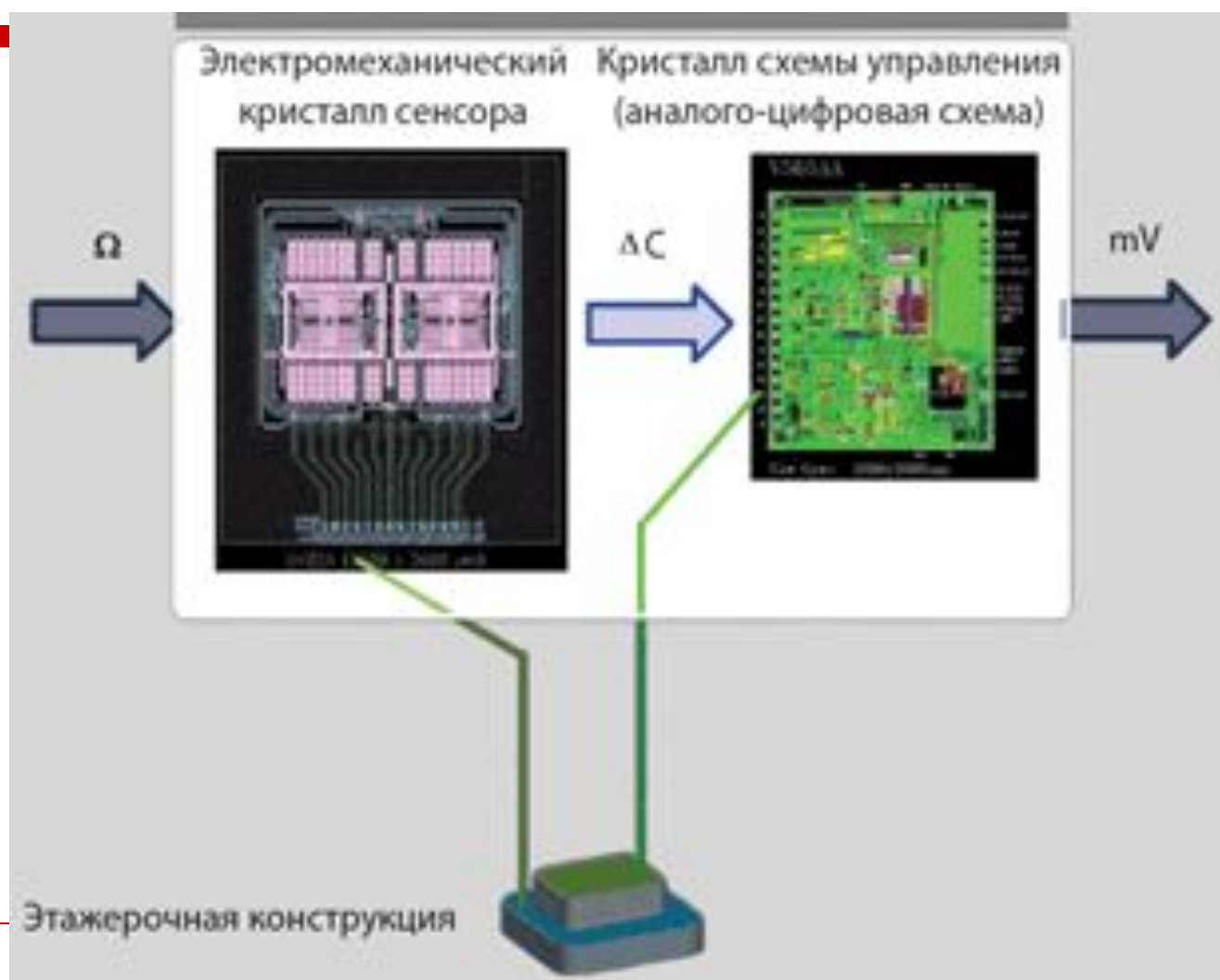
- 
- Основные достоинства технологии МЭМС-датчиков компании ST
  - **Малый разброс параметров в пределах изделия.** Изготовление компонентов в едином технологическом цикле позволяет получать практически неотличимые параметры у одинаковых компонентов.
  - **Высокая технологичность и повторяемость.** При 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.
-

- 
- **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.

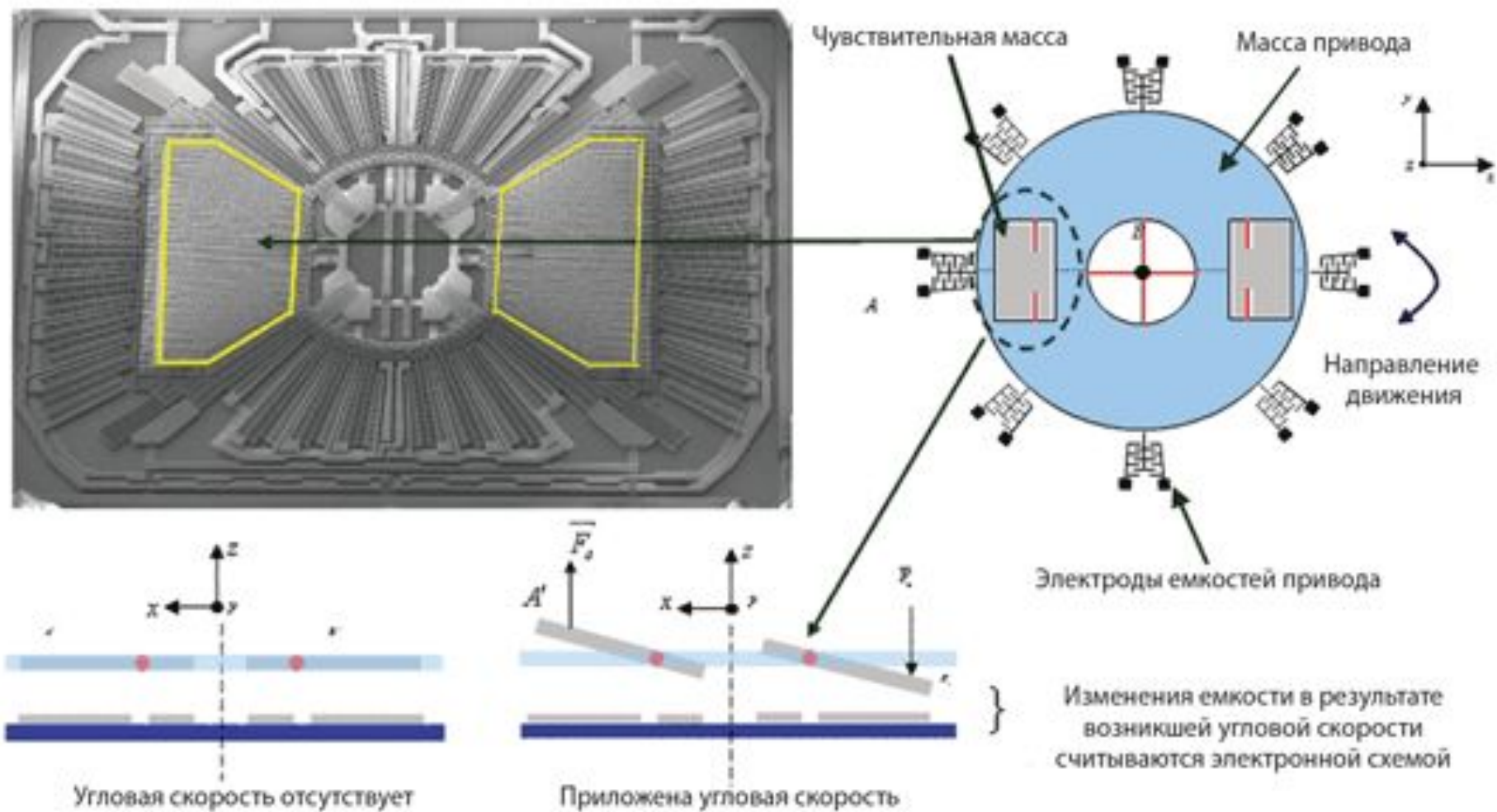
- 
- Основные секторы применения акселерометров и гироскопов
  - – Игровые консоли.
  - – Стабилизация изображения в фото- и видеокамерах.
  - – Курсорные указатели для интеллектуальных интерфейсов пользователя.
  - – Расширение GPS-решений (системы счисления пройденного пути).
  - – Системы управления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

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

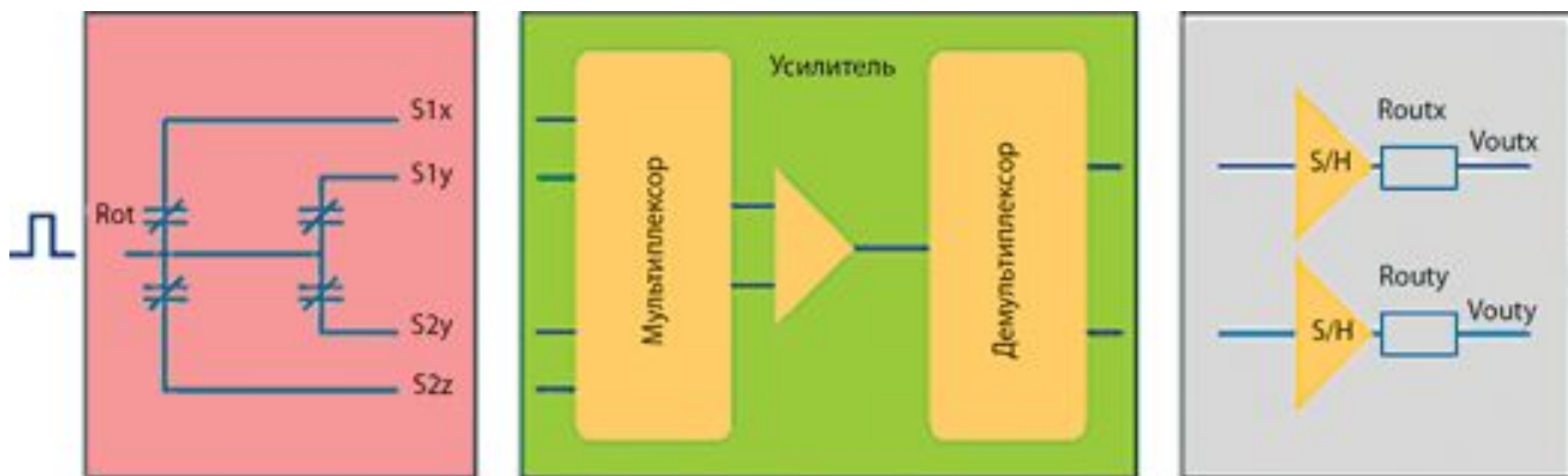




- 
- Принцип работы сенсоров движения (акселерометров и гироскопов) основан на измерении смещения инерционной массы относительно корпуса и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал.
  - Емкостной метод преобразования измеренного перемещения является наиболее точным и надежным, поэтому 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



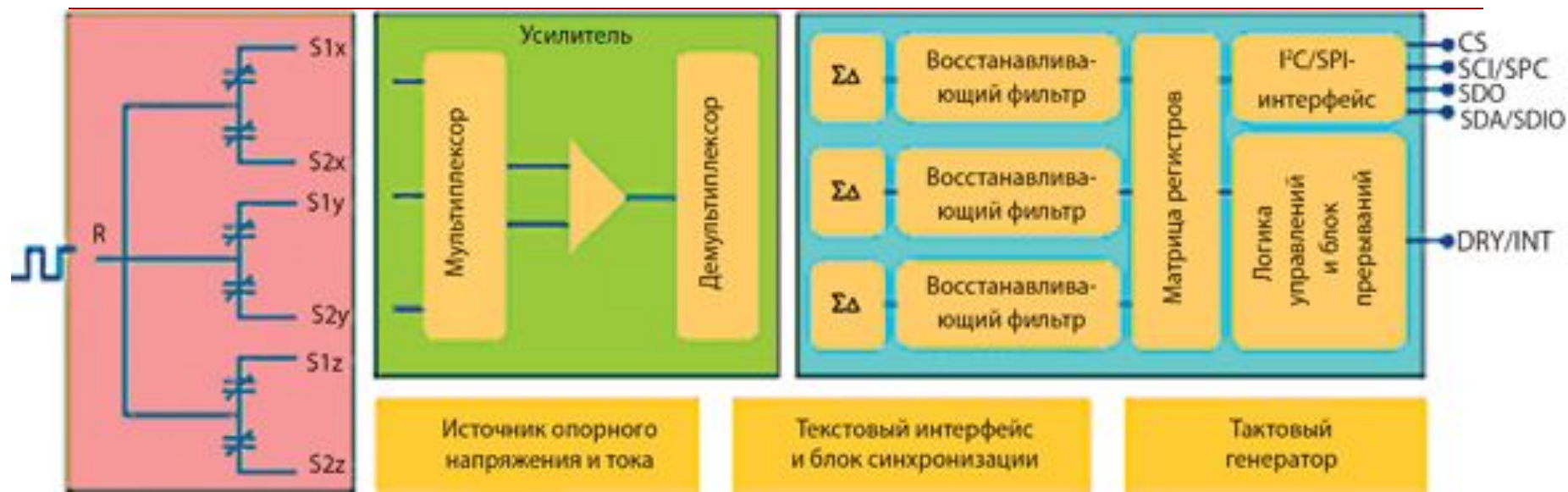
- 
- В конструкции МЭМС-сенсоров для акселерометров и гироскопов используется камертонная система электродов.
  - Две подвешенные массы совершают колебания по противоположным осям.
  - С появлением угловой скорости сила Кориолиса прикладывается в противоположных направлениях.
  - Измеряемая дифференциальная 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.
-



Источник опорного напряжения и тока

Текстовый интерфейс и блок синхронизации

Тактовый генератор



- 
- STAIS226DS, AIS326DQ — двух- и трехосевые акселерометры, предназначенные для автомобильной промышленности и имеющие рабочий диапазон температур  $-40...105^{\circ}\text{C}$ . 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 из двух стандартных цифровых интерфейсов: SPI или I<sup>2</sup>C.
  - 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:

- ~~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 I<sup>2</sup>C. 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:  $\pm 8$  г. Измеряемый сигнал передается через последовательные интерфейсы I<sup>2</sup>C/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.

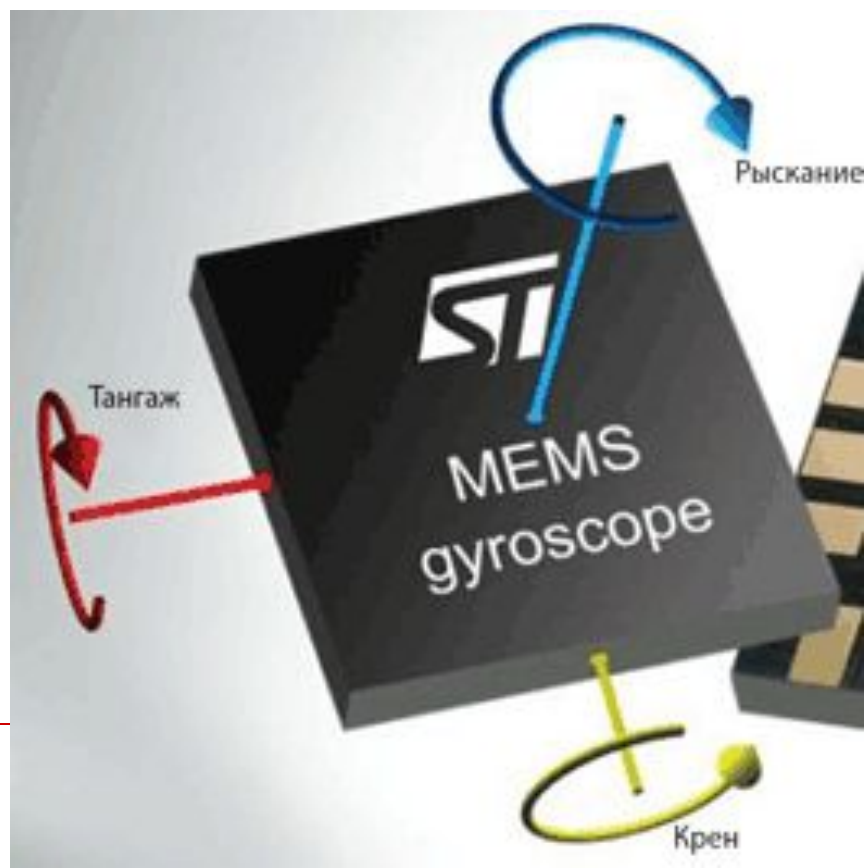
- ~~LIS3LV02DL — трехосевой цифровой линейный акселерометр~~ с программируемым 12- или 16-разрядным представлением данных.
  - Датчик поддерживает два цифровых интерфейса (SPI/I<sup>2</sup>C), имеет низкую мощность потребления и высокую разрешающую способность.
  - При подаче напряжения питания сенсор 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<sup>2</sup>C.~~
  - 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<sup>2</sup>C. 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  $\pm 2,0g$ , 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).



- 
- 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  $\pm 400$  и  $\pm 1600$  dps.
    - Высокая ударопрочность.
    - Встроенное самотестирование.
  - Объединение акселерометра и гироскопа позволяет создавать интегрированные инерционные системы (Inertial Movement Units, IMU).
-

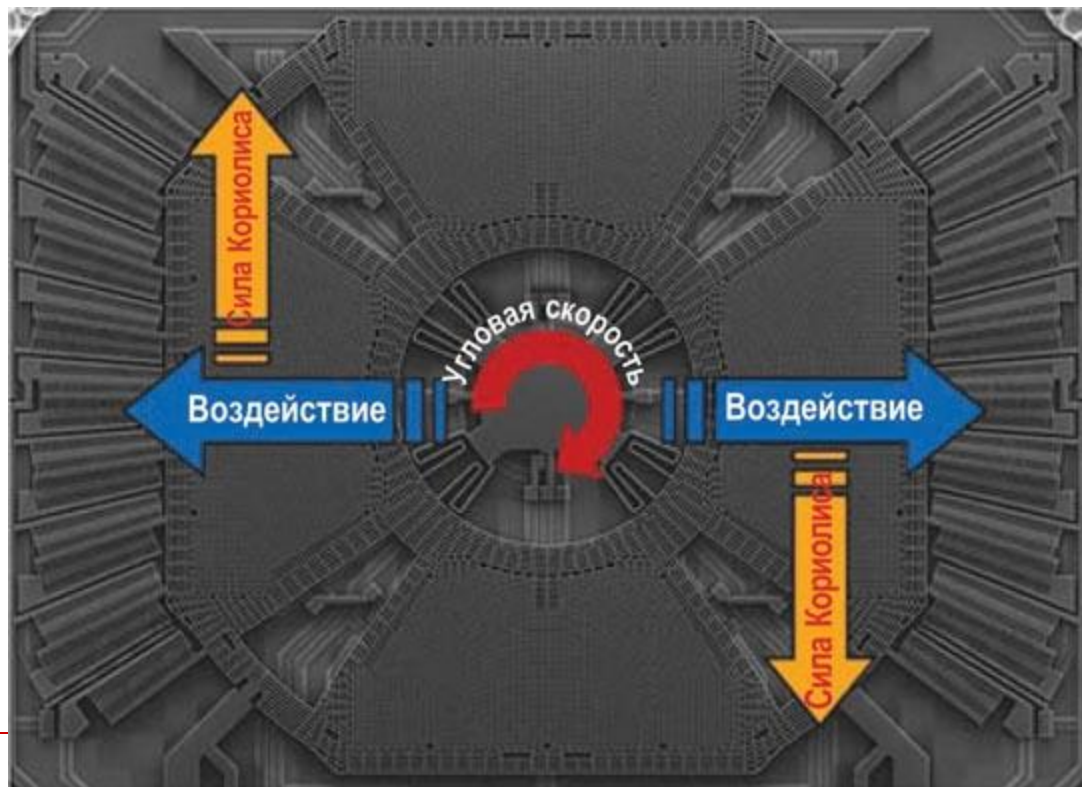


- 
- Способность гироскопов измерять угловые скорости вокруг одной или нескольких осей представляет собой естественное дополнение к MEMS акселерометрам.
  - Благодаря комбинации акселерометров и гироскопов появляется возможность отследить и зафиксировать движение в трехмерном пространстве.
  - Это позволяет системным разработчикам создавать более совершенные пользовательские интерфейсы, высокоточные навигационные системы и многое другое.
-

- 
- Сердце гироскопов STMicroelectronics представляет собой микроэлектронный механический элемент, работающий по принципу камертона и использующий эффект Кориолиса для преобразования угловой скорости в перемещение специальной чувствительной структуры.



- 
- Одноосевой курсовой (yaw) МЭМС гироскоп.

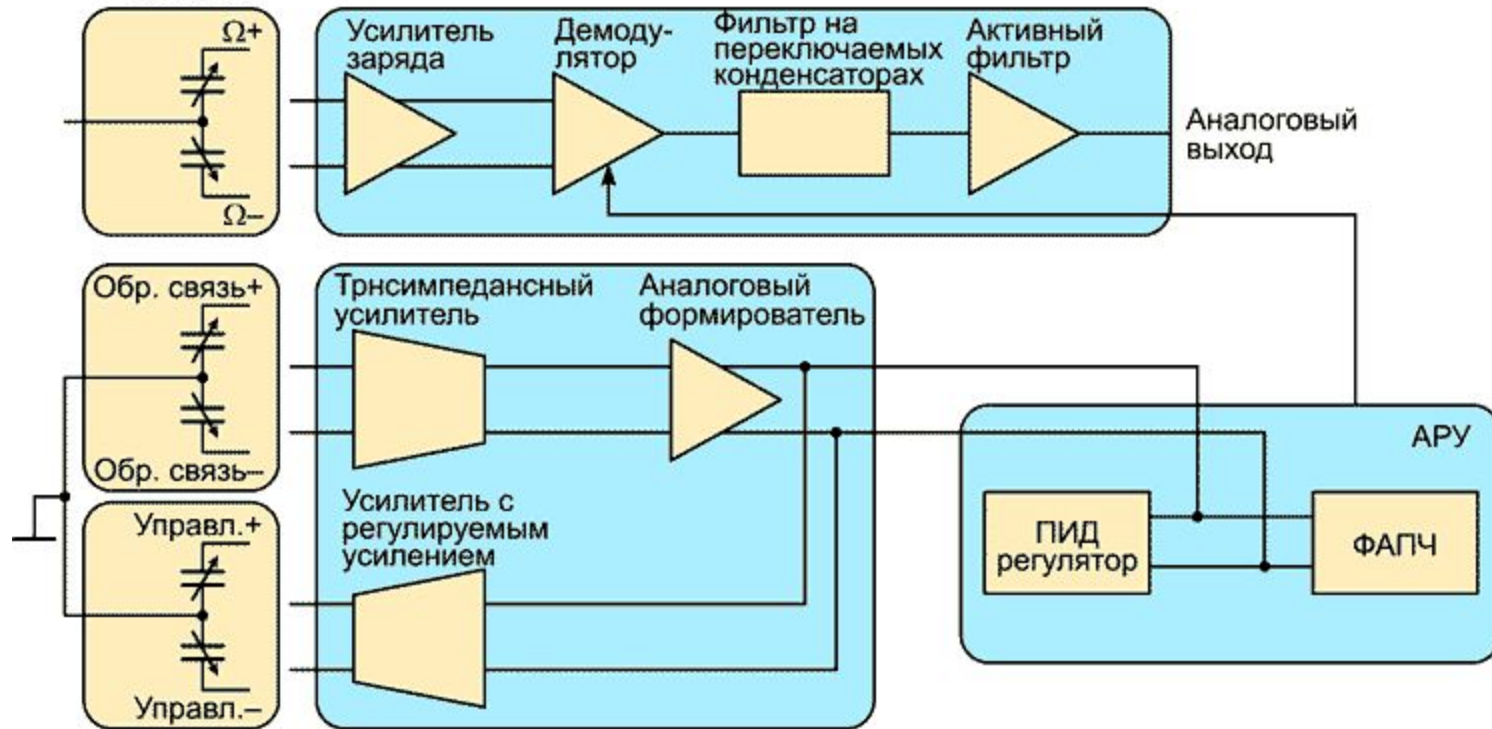


- 
- Две подвижные массы находятся в непрерывном движении в противоположных направлениях, обозначенных синими стрелками.
  - Как только произойдет изменение угловой скорости, сила Кориолиса, показанная желтыми стрелками, будет действовать в перпендикулярном направлении, и вызовет смещение масс, пропорциональное величине угловой скорости.
  - Так как движущиеся электроды (роторы) сенсорной части датчика расположены рядом с фиксированными электродами (статоры), то любое смещение будет вызывать изменение электрической емкости конденсаторов, образованных статорами и роторами.
  - Таким образом, осуществляется преобразование угловой скорости гироскопа в электрический параметр, величина которого детектируется специализированной схемой.

- 
- На основе разработанной STMicroelectronics МЭМС технологии выпущено уже более 600 миллионов.
  - По сравнению с другими гироскопами дифференциальный характер используемых STMicroelectronics камертонов делает систему нечувствительной к нежелательному линейному ускорению и случайной вибрации, воздействующей на сенсор.
  - При наличии таких воздействий обе массы датчика будут смещаться в одном направлении, в результате чего за счет дифференциального включения будет регистрироваться нулевое результирующее изменение общей емкости.
-

# Блок-схема одноосевого курсового (yaw)

гироскопа -  
Чувствительный элемент



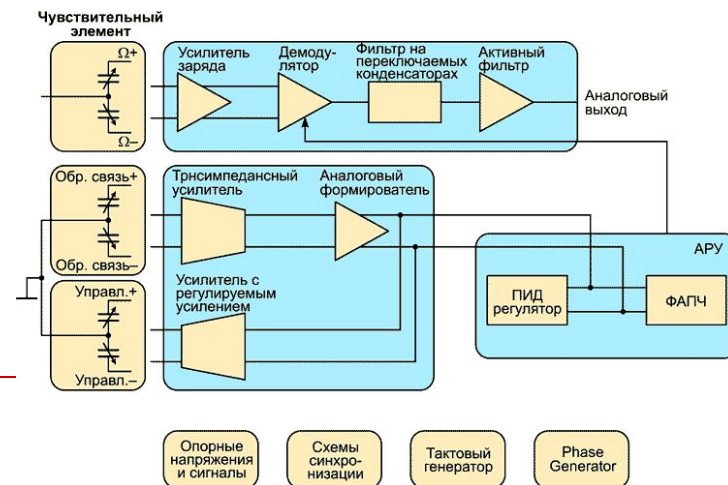
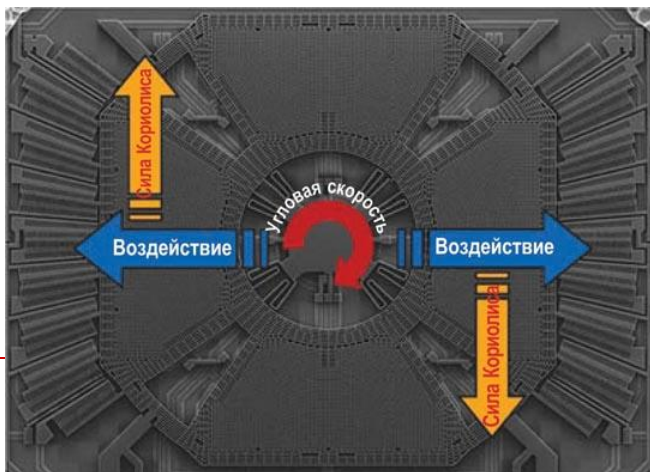
Опорные напряжения и сигналы

Схемы синхронизации

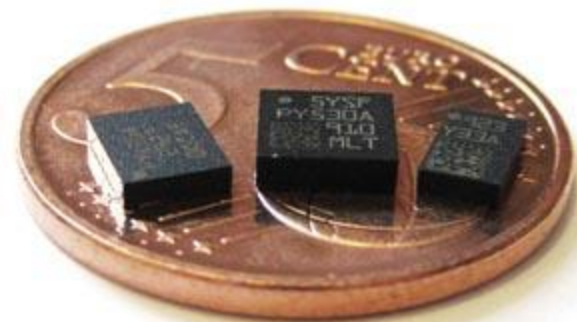
Тактовый генератор

Phase Generator

- ❑ ~~Схему преобразования и нормирования сигнала, используемую в гироскопе, можно рассматривать как сочетание секции управления двигателем и воспринимающей части акселерометра.~~
- ❑ Секция управления предназначена для возбуждения механического элемента, вызывающего его колебания вперед и назад с помощью электростатического привода (актуатора).
- ❑ Воспринимающая часть определяет смещение масс, вызываемого силой Кориолиса, посредством измерения емкости.
- ❑ Схема датчика формирует аналоговый или цифровой выходной сигнал, пропорциональный угловой скорости приобретенной датчиком.



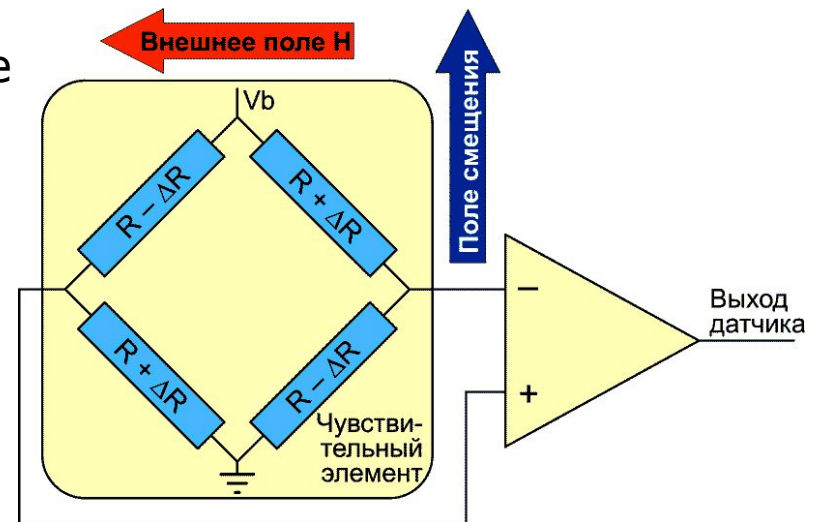
- Усовершенствованные функции снижения потребляемой мощности, встроенные в схему управления гироскопом, позволяют отключать датчик при бездействии.
- Датчик может находиться в спящем режиме, когда общее потребление гироскопа значительно уменьшается по сравнению с нормальным режимом работы, и, в тоже время, по команде пользователя немедленно переключаться в активный режим для измерения угловых скоростей.
- Так же как и МЭМС акселерометры, МЭМС гироскопы STMicroelectronics представляют собой систему-в-корпусе (system-in-package – SIP) – механический элемент датчика и специализированная схема преобразования сигналов изготовлены на разных кристаллах и помещены в один корпус.
- Многоосевые МЭМС гироскопы выпускаются в корпусе размерами 3 × 5 мм с максимальной толщиной 1 мм, сохраняя габаритную стабильность и обеспечивая высокие рабочие характеристики конечного устройства в течение всего срока службы.



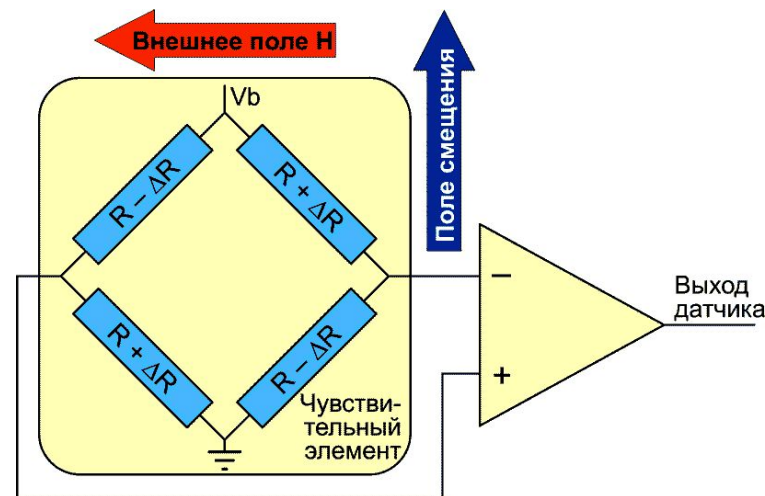


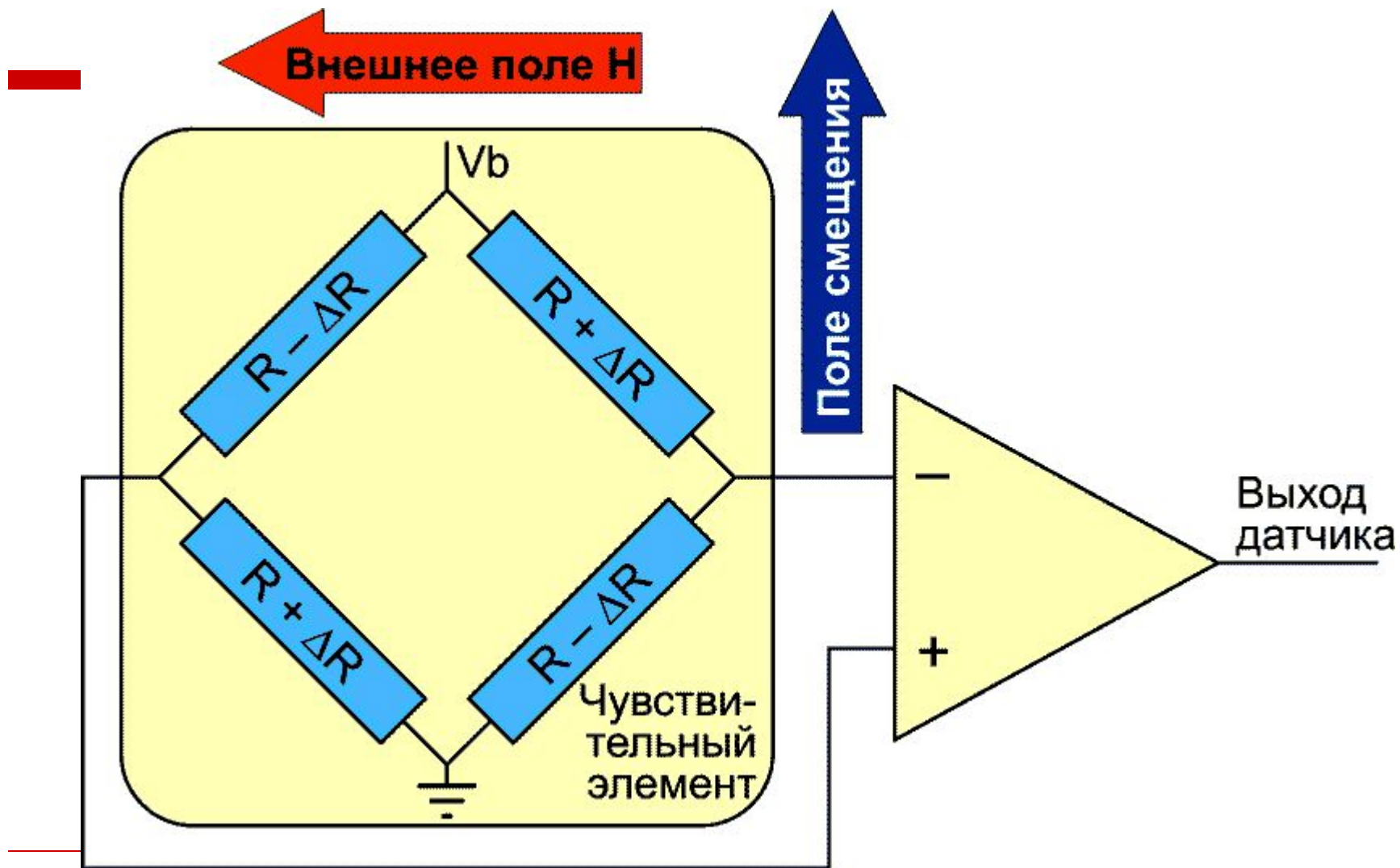
- 
- Новый класс приборов – геомагнитные датчики. Способные измерять магнитное поле земли по нескольким осям, эти устройства позволяют расширить навигационные функции портативных устройств.
  - Так же как и для датчиков движения, основным и самым быстрорастущим рынком для геомагнитных датчиков стал рынок мобильных телефонов и потребительской электроники.
  - В последнее время было зафиксировано 10-кратное увеличение поставок электронных компасов. По данным компании iSuppli поставки этих устройств в увеличатся до 750 миллионов единиц, а прогнозируемый совокупный темп годового роста составит 129%.
-

- Среди различных способов изготовления кремниевых магнитных датчиков все шире используется AMR (анизотропная магнитно-резистивная) технология.
- Это связано с ее способностью сочетать высокое пространственное разрешение и высокую точность измерений с низким энергопотреблением, что исключительно важно для устройств с батарейным питанием.
- Принцип работы таких датчиков основан на изменении сопротивления тонкой полоски ферромагнитного материала под действием внешнего магнитного поля, перпендикулярного направлению тока, проходящего по этой полоске.



- ~~Чувствительный элемент датчика, как правило, имеет конфигурацию моста Уитстона, и состоит из магниторезисторов, имеющих в состоянии покоя одинаковое сопротивление  $R$ .~~
- Во время измерения на мост подается напряжение  $V_b$ , и через резисторы начинает протекать ток.
- Всякий раз, при воздействии на измерительный мост магнитного поля  $H$ , вектор намагниченности в двух противоположно расположенных резисторах моста смещается по направлению тока, что вызывает увеличение их сопротивления.
- В оставшихся двух противоположно расположенных резисторах моста вектор намагниченности смещается против направления тока, в результате сопротивление их уменьшается.
- Таким образом, в линейном диапазоне выход датчика пропорционален приложенному магнитному полю





- 
- Мобильные телефоны давно стали самой активной сферой потребления датчиков, и установка в них магнитометров в сочетании с акселерометрами для реализации компасов с компенсацией наклона представляется все более заманчивой.
  - Примером такого устройства, имеющего шесть степеней свободы, является производимая компанией STMicroelectronics микросхема цифрового МЭМС компаса [LSM303DLH](#).
  - В микросхеме, выпускаемой в компактном корпусе LGA, объединены высокоэффективный 3-осевой акселерометр и 3-осевой магнитометр повышенной точности.
  - Подсистема магнитометра содержит дополнительные токопроводящие дорожки, позволяющие электрически управлять полярностью выходного напряжения и создавать поле смещения для компенсации внешних магнитных полей.

- LSM303DLH обеспечивает высокоточное трехмерное измерение магнитных полей внутри зданий, автомобилей, а также на высоких широтах в США, Канаде и Северной Европе, где магнитное склонение поля Земли трудно измерять с помощью датчиков Холла.
- В сочетании с программными драйверами для считывания результатов измерений, автокалибровки и компенсации магнитных помех, доступными для многих популярных мобильных операционных систем, датчик LSM303DLH с 6 степенями свободы предоставляет разработчикам мощный инструмент для реализации навигационных



- ~~Недавно появившиеся крошечные, надежные и дешевые~~ МЭМС гироскопы и магнитометры вместе со специальным ПО позволят расширить функции отслеживания и захвата движений, что приведет к созданию более реалистичных пользовательских интерфейсов во многих потребительских устройствах



