

Современные МЭМС-продукты компании Analog Devices

Часть 1

Юрий Петропавловский (г. Таганрог, Ростовская обл.)

В статье рассмотрена история создания микросхем с интегрированными МЭМС компании Analog Devices. Приведены параметры и рассмотрены особенности современных аналоговых и цифровых акселерометров и гироскопов, выпускаемых компанией.

Компания Analog Devices (г. Норвуд, штат Массачусетс, США), отметившая в этом году 50-летний юбилей, известна своими прецизионными операционными усилителями (ОУ), АЦП/ЦАП, цифровыми сигнальными процессорами и многими другими аналоговыми и цифровыми микросхемами. Однако в ассортименте компании представлены и интегральные продукты на основе технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС, в США – MEMS, в Европе MTS – устройства микросистемной технологии).

Компания Analog Devices, Inc (ADI) была основана в 1965 г. в городе Кембридже (штат Массачусетс, США) выпускниками Массачусетского технологического института (MIT) Рэймондом Стата (Raymond S. Stata) и Мэтью Лорбером (Matthew Lorber). Первыми продуктами компании были модульные операционные усилители Model 101/102/103, собираемые вручную из дискретных электронных компонентов.

Модульные ОУ компании отличались высокой повторяемостью и минимальным разбросом основных параметров – токов и напряжений смещения и сдвига, малыми температурными

коэффициентами. Это давало возможность применять их в качестве усилителей сигналов датчиков физических величин (температуры, освещенности и других) для проведения точных измерений. В то время клиентами компании были производители специальной, космической и военной электроники, а также измерительной техники, для которых требовались устройства отображения измеряемых величин в цифровом виде.

В 1969 г. ADI приобрела одного из лидеров рынка в деле производства преобразователей данных – компанию Pastoriza Electronics. Первыми преобразователями, выпущенными отделением Pastoriza Division of Analog Devices, были АЦП последовательных приближений – 10-разрядный ADC-F и 12-разрядный ADC-U. В начале 1970-х гг. компания разработала первые монолитные тонкопленочные 12-разрядные АЦП ADC-12QM, внешний вид которых показан на рисунке 1. Первым сравнительно дешевым и промышленно стандартизированным 12-разрядным АЦП общего назначения, выпущенным на рынок, был ADC-12QZ (1972 г.). В преобразователе использовались интегральные



Рис. 1. Первый АЦП ADI – ADC12QM

блоки с четырёхразрядным ключом (Quad-Switch) и прецизионные тонкопленочные резисторные матрицы для внутренних ЦАП.

Разработка и производство ОУ, АЦП и ЦАП в компании успешно развивались, однако многие клиенты компании были заинтересованы в интегральных решениях, объединяющих датчики физических величин с ИС усиления и преобразования сигналов. Среди множества типов датчиков, используемых для измерения параметров движения и пригодных для интеграции в микросхемы, выделяются датчики на основе микроэлектромеханических систем. Работы в этом направлении в середине 1980-х гг. проводила группа инженеров под руководством Доктора Ричарда Пэйна (Dr. Richard Payne) из отделения MEMS Division of Analog Devices, что в городе Уилмингтон (штат Массачусетс, США). Первым МЭМС-продуктом, прототип которого компания представила в 1989 г., был интегральный акселерометр ADXL50, предназначенный для систем активации подушек безо-

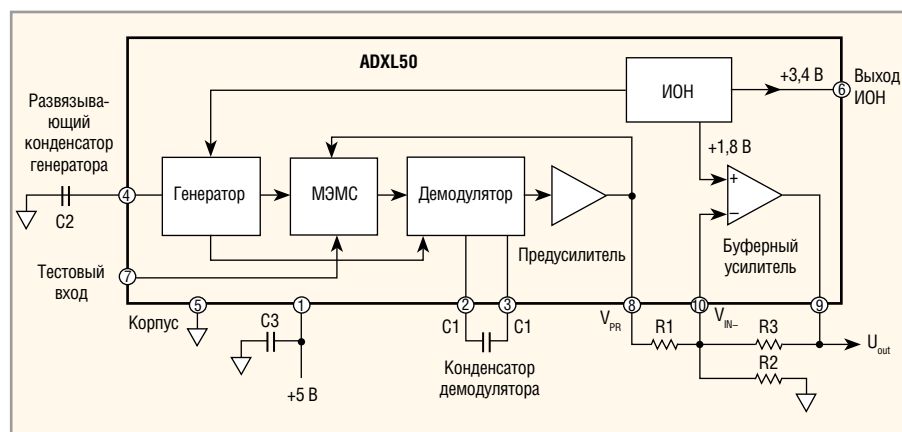


Рис. 2. Структура микросхемы ADXL50

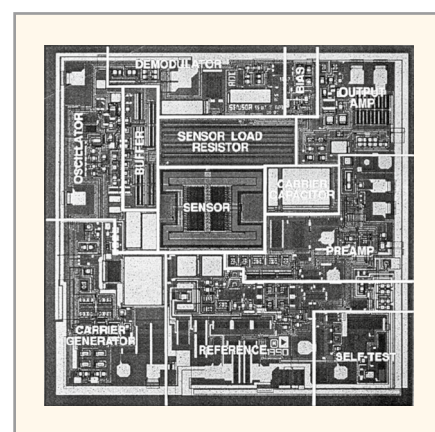


Рис. 3. Структура кристалла микросхемы ADXL50

пасности автомобилей. Его серийное производство началось в 1991 г.

ADXL50 – интегральный одноосевой акселерометр с поверхностным датчиком ускорения (Surface-Micromachined, Monolithic Accelerometer), структура микросхемы которого приведена на рисунке 2, а внешний вид кристалла – на рисунке 3. Поверхностными называют МЭМС, позволяющие детектировать ускорение в плоскости, параллельной поверхности кристалла. Кристалл микросхемы размерами 3×3 мм занят, в основном, схемами формирования сигнала, окружающими миниатюрный датчик ускорения размерами 500×625 мкм (площадь менее $1,2 \text{ мм}^2$), расположенный в центре кристалла. Сам датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную систему с воздушным диэлектриком и обкладками, вытравленными из плоской поликремниевой плёнки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки выполнены в виде простых стержней, расположенных на высоте 1 мкм от поверхности кристалла. Подвижные обкладки связаны с подпружиненной инерционной балкой (Beam), укрепленной на фиксирующих анкерах.

Упрощённая структура одной ячейки конденсаторной системы показана на рисунках 4а и 4б, функциональная схема измерителя ускорения – на рисунке 5. Весь датчик состоит из 42 элементарных конденсаторных ячеек, его подвижная инерционная масса при изменении скорости перемещения кристалла микросхемы смещается относительно неподвижной части конденсаторной системы. Неподвижные обкладки соединённых параллельно ячеек образуют дифференциальный переменный конденсатор, ёмкость которого зависит от положения подвижных частей между неподвижными обкладками. Пружинные растяжки на концах подвижной системы удерживают её на весу и обеспечивают возврат инерционной подвижной массы в исходное положение при отсутствии ускорения (в неподвижном положении и при постоянной линейной скорости движения).

Сила инерции при воздействии ускорения определяется формулой $F = ma$, уравновешивающая сила упругости пружин подвижной системы – формулой $F = kx$, где m – масса, a – ускорение, k – жёсткость пружины, x – перемещение массы относительно исходного состояния. Таким образом, ускорение мож-



АГУССОФТ – ВАШ НАДЕЖНЫЙ ПАРТНЕР



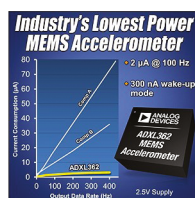
Акселерометры, гироскопы и подсистемы МЭМС iSensor® от Analog Devices

Интегрированные измерительные модули (IMU) МЭМС iSensor – это обладающие высокой степенью интеграции решения для многоосевых измерений, которые сочетают в себе гироскопы, акселерометры, магнетометры, датчики давления и другие технологии.



ADXL103/ADXL203

- Одноосевой/двухосевой акселерометр
- Диапазон измерений $\pm 1.2g$, $\pm 1.7g$, $\pm 5g$, $\pm 18g$ до 2.5кГц
- Собственный шум 110мкг/√Гц
- Предельное ускорение 3500g
- Потребление в рабочем режиме 700мкА
- Температурный диапазон $-40..+ 125^\circ\text{C}$
- Корпус LCC (5 x 5мм)



ADXL362

- Трёхосевой акселерометр с цифровым выходом SPI
- Сверхнизкое потребление 1.8мкА @ 100Гц
- Диапазон измерений $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 5g$, $\pm 8g$ (12-Bit)
- Собственный шум 175мкг/√Гц
- Температурный диапазон $-40..+ 85^\circ\text{C}$
- Корпус LGA (3 x 3.25мм)



ADXL375

- Трёхосевой акселерометр с интерфейсом SPI и I2C
- Диапазон измерений $\pm 200g$ до 1кГц (16-Bit)
- Собственный шум 5мг/√Гц
- Предельное ускорение 10000g
- Потребление в рабочем режиме 145мкА @ 100Гц
- Температурный диапазон $-40..+ 85^\circ\text{C}$
- Корпус LGA (3 x 5мм)

<http://www.analog.com/en/products/mems.html>

Реклама

Москва

Тел.: (495) 660-28-55
Факс: (495) 660-28-55
cmr@argussoft.ru

Санкт-Петербург

Тел.: (812) 412-01-07
Факс: (812) 412-18-49
spb@argussoft.ru

Новосибирск

Тел.: (383) 227-11-55
Факс: (383) 222-40-31
nsk@argussoft.ru

www.argussoft.ru

ARGUSSOFT
ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ДИСТРИБЬЮТОР

Екатеринбург

Тел.: (343) 378-32-42
Факс: (343) 378-32-41
ural@argussoft.ru

Казань

Тел.: (843) 206-01-12
Факс: (843) 293-41-00
kazan@argussoft.ru

Ростов-на-Дону

Тел.: (863) 231-56-56
Факс: (863) 242-44-52
rostov@argussoft.ru

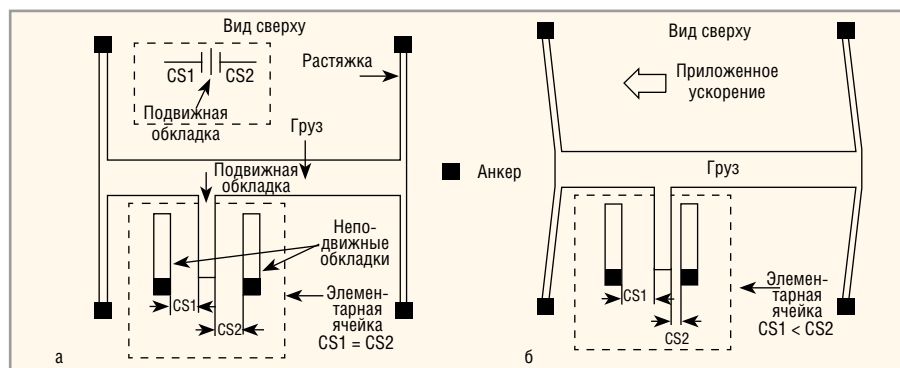


Рис. 4. Структура ячейки МЭМС: а – структура ячейки МЭМС в исходном положении, б – структура ячейки МЭМС в отклонённом состоянии

но определить по формуле $a = x \text{ (k/m)}$, причём параметр в скобках определяется конструкцией датчика. Ось чувствительности датчика лежит в плоскости поликремниевой плёнки, параллельной печатной плате, на которой установлена микросхема в металлическом корпусе TO-100 (см. рис. 6).

Соединённые параллельно обкладки конденсаторов датчика с общими ёмкостями CS1 и CS2 подключаются к электронным узлам на кристалле микросхемы. Перемещение подвижной инерционной балки при изменении скорости перемещения всей микросхемы вдоль оси чувствительности приводит к неодинаковому изменению ёмкостей CS1 и CS2. На неподвижные обкладки конденсаторов подаются противофазные импульсные сигналы одинаковой амплитуды от местного генератора (меандр с частотой 1 МГц). При движении с постоянной скоростью или в неподвижном состоянии микросхемы суммарный сигнал на подвижной части датчика, соединённого с входом уси-

лителя, практически отсутствует. При возникновении ускорения вдоль оси чувствительности датчика появляется разностный сигнал прямоугольной формы, амплитуда которого зависит от величины смещения инерционной балки, а фаза определяется направлением ускорения (вперёд или назад). Сигнал с выхода усилителя подаётся на фазочувствительный демодулятор, преобразующий его в низкочастотный с полосой 0–10 кГц (конкретная полоса пропускания определяется внешними элементами).

Для уменьшения влияния температуры окружающей среды, временных изменений параметров схемы и нелинейности переходной характеристики на точность измерений, в схему введена отрицательная обратная связь (ООС) по положению инерционной балки. Для реализации ООС напряжение с выхода предусилителя через резистор сопротивлением 3 МОм подаётся на подвижную часть конденсаторной системы. Это напряжение создаёт электростати-

ческие силы, стремящиеся установить инерционную балку в исходное состояние. При заданных параметрах внешних и внутренних элементов и в отсутствие ускорения ООС не позволяет балке сдвигаться на расстояние более чем 0,01 мкм от исходного. При отсутствии ускорения напряжение на выходе микросхемы (вывод 9) равно 1,8 В, при полном ускорении $\pm 50 \text{ g}$ напряжение изменяется до $1,8 \pm 0,95 \text{ В}$, паспортная крутизна изменения выходного напряжения (чувствительность датчика) составляет 19 мВ/г (измеряется по выходу V_{PR} /вывод 8 микросхемы).

При использовании буферного усилителя диапазон измеряемых ускорений и чувствительность микросхемы задаётся значениями сопротивлений резисторов R1, R2 и R3, которые определяют коэффициент усиления буферного каскада (см. рис. 4). При изменении КУ в пределах 2–10, диапазон измеряемых ускорений лежит в пределах $\pm 50 \dots \pm 10 \text{ g}$, а чувствительность – в пределах 40–200 мВ/г (измеряется по выходу V_{out} /вывод 9). Подробные данные об особенностях применения микросхемы приведены в статье Билла Ридела (Bill Riedel) [1].

Микросхема ADXL50 стала первым интегральным датчиком ускорения для систем управления подушками безопасности автомобилей, выпускаемых большими тиражами. До его появления на рынке цена множества компонентов и работ по установке подушек безопасности находилась в пределах \$400–600 (1990 г.). С применением ADXL50 эта цена снизилась до \$50–80. В дальнейшем принцип измерения ускорений

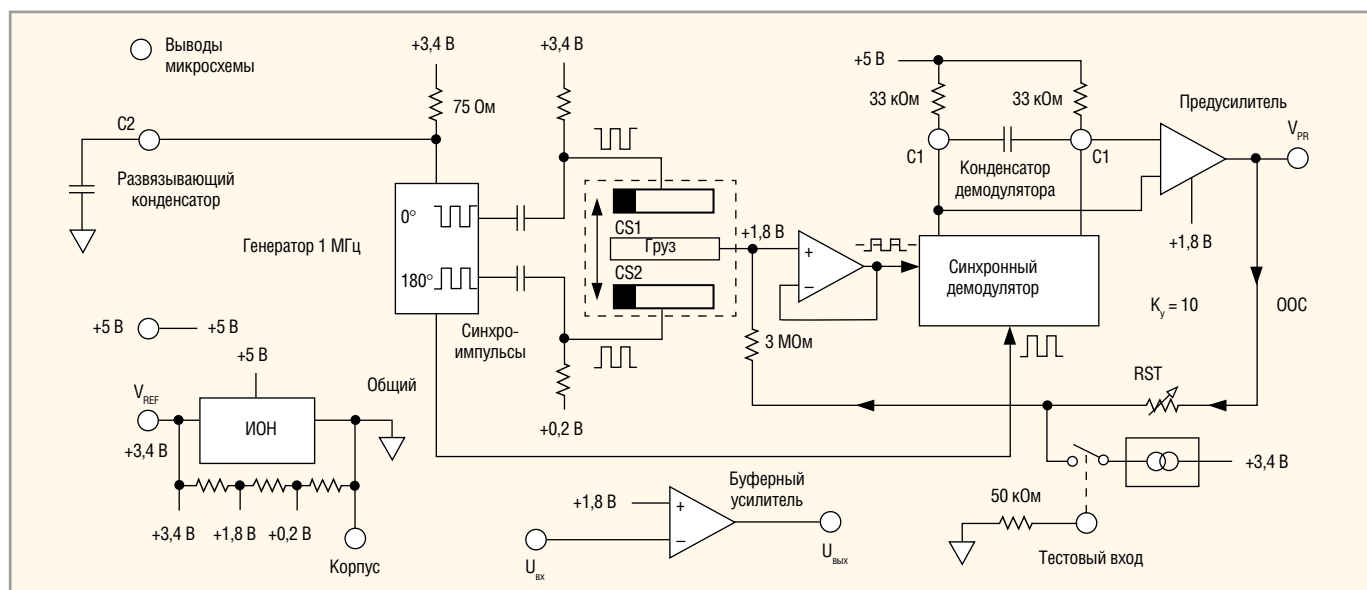


Рис. 5. Функциональная схема измерителя ускорения

с помощью ёмкостного датчика, применённого в ADXL50, использовался практически во всех типах инерциальных датчиков компании.

В 1995 г. компания выпустила на рынок микросхему ADXL05, представляющую собой совместимый по выводам с ADXL50 интегральный датчик ускорения поверхностного типа с диапазоном измерения ± 5 g и чувствительностью 200–1000 мВ/г. Микросхема отличается от ADXL50 в 12 раз меньшим уровнем шума (500 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$ по сравнению с 6,6 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$ в полосе 4 Гц – 1 кГц). Выбираемый пользователями диапазон измерения ускорения составляет $\pm 1... \pm 5$ g. Микросхема предназначена для измерения ускорений и уровня вибраций в системах бюджетного класса.

Одноосевой ADXL150 и двухосевой ADXL250 поверхностные акселерометры третьего поколения (торговая марка iMEMS® – Integrated MEMS) были представлены компанией в 1996 г. Приборы характеризуются низким уровнем шума (1 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$), большим динамическим диапазоном (80 дБ), малым потребляемым током (1,8 мА/канал) и низким дрейфом в промышленном диапазоне температур. Двухосевой акселерометр ADXL250 составлен из двух однотипных каналов, датчики которых расположены под углом 90° друг относительно друга. Для работы микросхем нужен только один внешний компонент – конденсатор фильтра по цепи питания. Чувствительность и диапазон измеряемых ускорений составляют 38 мВ/г и ± 50 g.

В 1998 г. ADI выпустила первый в мире коммерческий двухосевой акселерометр ADXL202, на одном кристалле которого интегрированы датчики малых ускорений (до ± 2 g), аналоговые схемы усиления и управления с малым потреблением (0,6 мА) и возможностью подключения выходов микросхемы непосредственно к микроконтроллерам общего назначения.

Поскольку размеры и масса поверхностных структур датчиков ускорения рассматриваемого типа чрезвычайно малы, схема измерения должна регистрировать незначительные изменения ёмкостей, а её точность ограничена разрешением схемы считывания. В конструкцию и схемотехнику ADXL202 (а также ADXL210) внесены существенные изменения. Увеличено число единичных элементов поверхностной системы конденсаторов, а их ёмкость увеличена за счёт уменьшения

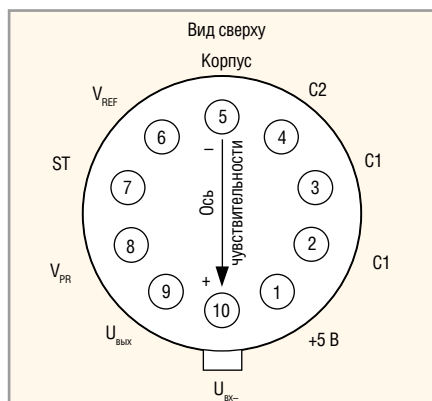


Рис. 6. Цоколёвка микросхемы ADXL50

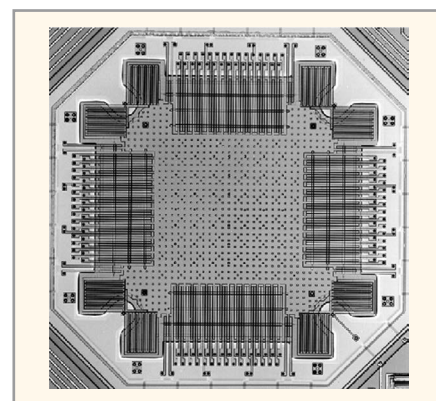


Рис. 7. МЭМС-датчик микросхемы ADXL202

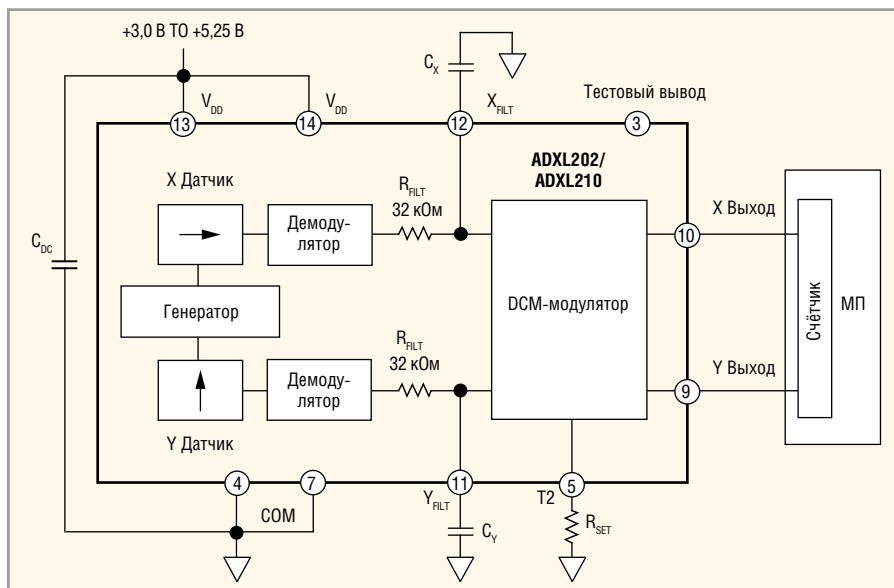


Рис. 8. Структура микросхем ADXL202 и ADXL210

зазоров и увеличения длины подвижных выступов. Увеличена и масса подвижной части системы. Внешний вид дифференциальной конденсаторной системы показан на рисунке 7. Длина подвижных элементов инерциальной массы составляет 125 мкм, зазор между подвижными и неподвижными обкладками конденсаторов – 1,3 мкм, для каждой оси измерения X и Y используется по две конденсаторные секции, которые расположены друг против друга.

В отличие от рассмотренных акселерометров, в данных приборах используется косвенный метод измерения ускорения. На рисунке 8 приведена структура микросхем ADXL202 и ADXL210: выходные сигналы с демодуляторов каналов X и Y поступают на управляющие входы модулятора DCM (DCM – Duty Cycle Modulation, аналогична ШИМ). Коэффициент заполнения D (отношение периода следования к длительности импульсов) на выходах модулятора (выводы 10, 9) пропорционален ускорению, $D = 50\%$ (скважность $S = 2$) соответствует нулевому ускоре-

нию. Величина периода следования импульсов задаётся внешним резистором R_{set} , подключаемым к выводу 5 микросхемы.

Рассматриваемые акселерометры способны измерять статические и динамические (вибрация) ускорения с разрешением 5 mg в диапазоне до 60 Гц, а также определять углы наклона с точностью ± 1 градус. Чувствительность приборов 12,5 D/g (ADXL202) и 4 D/g (ADXL210). Микросхемы выпускаются в керамических корпусах QC-14 размерами 9,9 × 7,3 мм. К основным областям применения микросхем относятся: двухосевые датчики угловых перемещений, компьютерная периферия, инерциальные навигационные приборы, аппаратура для сейсмического мониторинга, системы безопасности автомобилей, датчики движения с батарейным питанием.

В 2002 году компания выпустила первый в мире интегральный микромеханический гироскоп ADXRS150, выполненный по технологии iMEMS. Микросхема представляет собой одно-

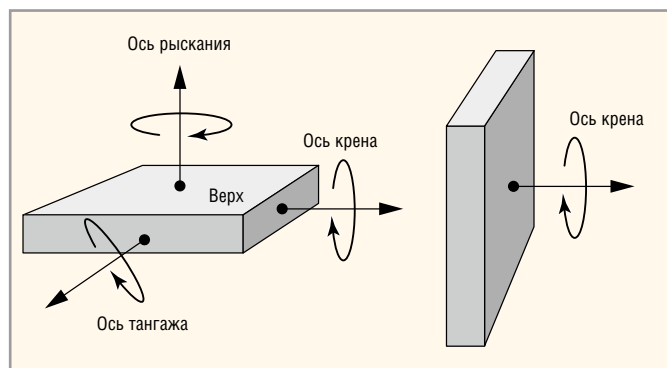


Рис. 9. Оси вращения

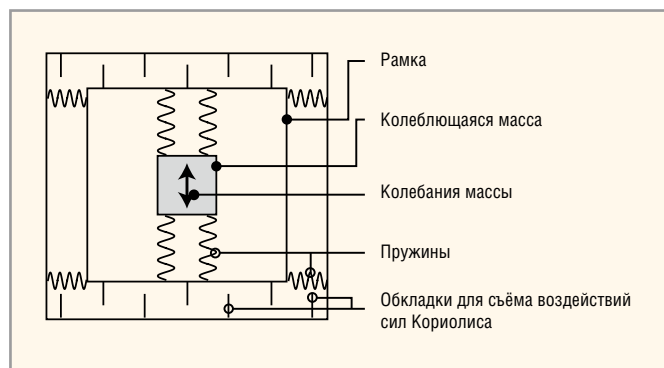


Рис. 10. Устройство МЭМС-датчика гироскопа

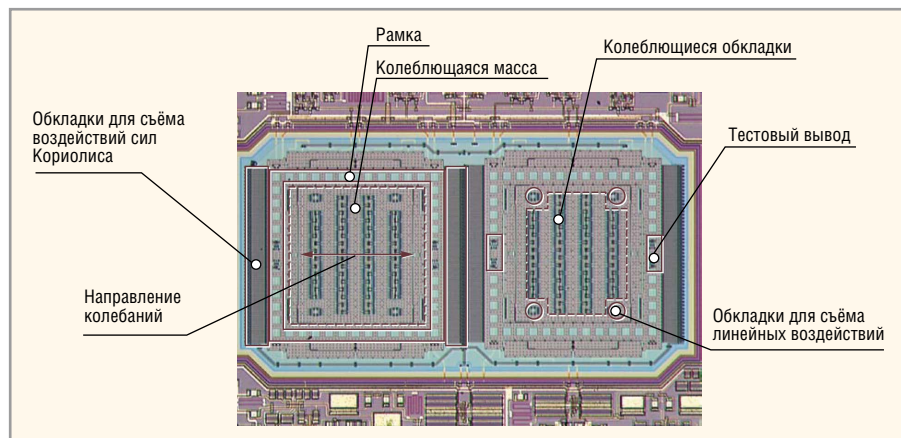


Рис. 11. Устройство МЭМС-датчика микросхемы ADXR5150

осевой вибрационный датчик угловой скорости с чувствительностью не менее $\pm 150^\circ/\text{с}$, выполненный в корпусе LCBVGA-32 размерами 7×7 мм. В зависимости от положения микросхемы в пространстве, датчик может регистрировать углы поворота вокруг одной из трёх осей: ось рыскания / ось Z / угол поворота (Yaw Axis / Z-Axis / Rate Axis), ось тангажа / ось Y / продольный наклон (Pitch Axis / Y-Axis / Longitudinal Axis), ось крена / ось X / поперечный наклон (Roll Axis / X-Axis / Lateral Axis) – как показано на рисунке 9. При горизонтальном положении микросхемы регистрируются углы рыскания, что позволяет использовать микросхему в качестве элемента систем навигации в различных устройствах (смартфоны, навигаторы и тому подобное).

Основным чувствительным элементом микросхемы является закреплённая на пружинных подвесах рамка, внутри которой закреплена некоторая инерциальная масса, совершающая колебательные движения (см. рис. 10). Колебания массы (вибрация) совершаются по оси Y, а колебания рамки возможны только по оси X, рамка снабжена множеством подвижных обкладок конденсаторов (как у описанных акселерометров), а на подложке микро-

схемы сформированы соответствующие неподвижные обкладки конденсаторов. Общая дифференциальная ёмкость конденсаторов может изменяться как при линейных ускорениях самой микросхемы по оси X, так и при поворотах корпуса микросхемы вокруг оси Z под воздействием ускорения Кориолиса. Для выделения составляющей, вызванной поворотом микросхемы вокруг оси Z, датчик выполнен из двух одинаковых секций, инерциальные массы которых колеблются в противофазе (см. рис. 11). Измерительные сигналы, снимаемые с обеих секций, поступают на дифференциальную схему, которая складывает составляющие, вызванные ускорением Кориолиса, и вычитает синфазные составляющие, вызванные линейными ускорениями.

Структура и типовое включение микросхемы ADXR5150 приведены на рисунке 12. Для возбуждения колебаний инерциальных масс датчиков используются противофазные синусоидальные колебания внутреннего генератора с частотой 14 кГц, на который с генератора подкачки заряда (ГПЗ) поступает напряжение питания +12 В. При изменении линейной скорости колебаний по синусоидаль-

ному закону зависимость выходного напряжения микросхемы на выводе 18/RATEOUT от ускорения Кориолиса практически линейная. При вращении корпуса микросхемы по часовой стрелке напряжение на выходе увеличивается от уровня 2,5 В до 4,75 В, и наоборот, при вращении против часовой стрелки уменьшается от 2,5 В до 0,25 В. Подробное описание микросхем ADXR5150/300 приведено в статье, опубликованной в журнале «Analog Dialog» [2].

Первый трёхосевой акселерометр ADXL330 (см. рис. 13) в корпусе LFCSP-16 размерами $4 \times 4 \times 1,5$ мм компания выпустила в 2005 году. Датчик прибора выполнен по той же технологии iMEMS, что и предыдущие продукты, микросхема характеризуется очень малым энергопотреблением и низким напряжением питания (ток потребления 200 мкА при $U_{\text{пит}} = 2$ В). Прибор позволяет регистрировать ускорения до ± 4 g по трём пространственным осям в аналоговом виде. Чувствительность каждого канала составляет 300 мВ/g, выходное напряжение при нулевом ускорении – 1,5 В ($U_{\text{пит}} = 3$ В), полный размах выходных сигналов – 2,8 В. Основные области применения микросхемы ориентированы на мобильные и портативные приложения с низким напряжением питания: сотовые телефоны, видео- и фотокамеры (стабилизация изображения), игровые устройства, жёсткие диски (защита от ударов), спортивные и оздоровительные приборы. Однако высокая надёжность микросхем (диапазон рабочих температур $-55...+125^\circ\text{C}$, удары до 10 000 g) делает возможным их использование в ответственных приложениях. Например, по данным болгарского исторического сайта Bulgar-Istoria, микросхемы ADXL330 (а также ADXL193, ADIS16120 и ADXR5150/300) предположительно применены в го-

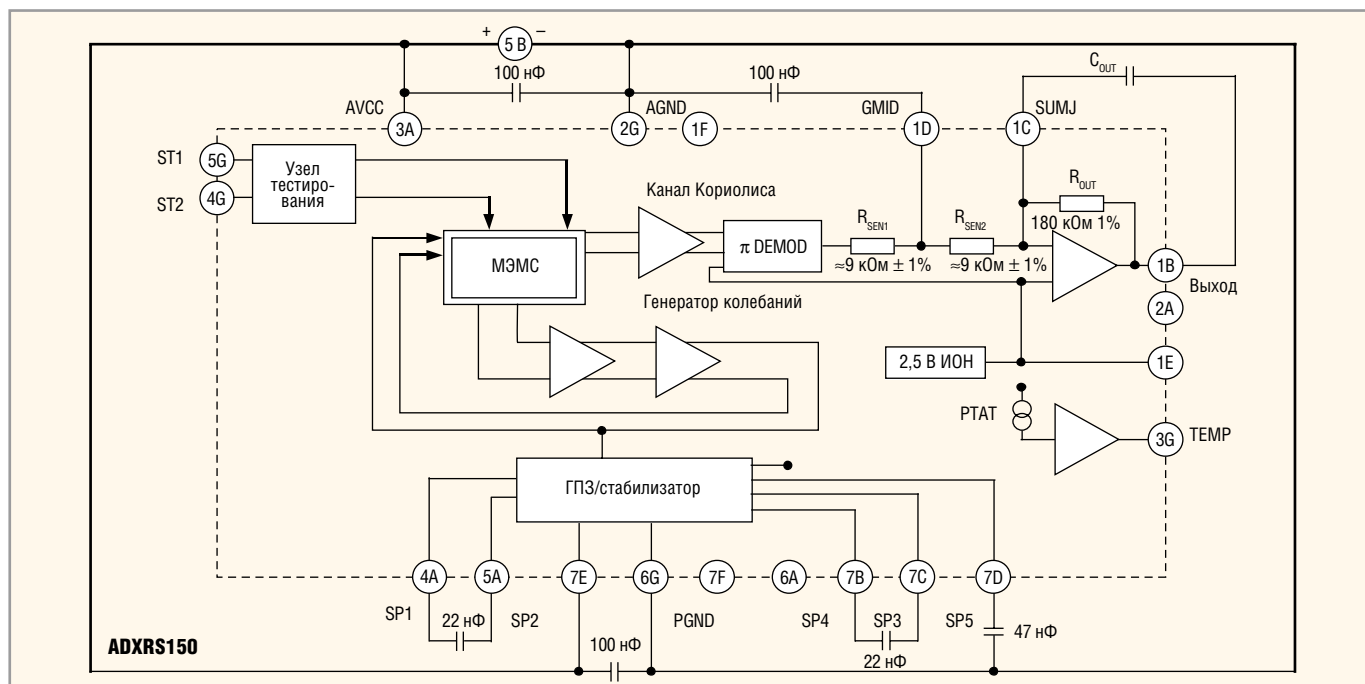


Рис. 12. Структура микросхемы ADXRS150

ловках наведения оперативно-тактических ракетных комплексов «Искандер-К» [3, 4].

Дальнейшее развитие МЭМС-продуктов компании получило в семействе интегральных датчиков движения iSensor®, объединяющих уже описанные ёмкостные интегральные структуры со схемами аналоговой и цифровой обработки сигналов повышенной функциональности. Уже в 2007 г. номенклатура микросхем ADIS16xxx семейства iSensor насчитывала около 20 типов различных интегральных акселерометров и гироскопов с разной цифровой обработкой сигналов.

Во второй части статьи будут рассмотрены современные МЭМС-продукты компании Analog Devices.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.analog.com/library/analogDialogue/archives.html#vol27.
2. www.analog.com/library/analogDialogue/archives.html#vol37.
3. www.bulgari-istoria-2010.com.
4. 9K720 Искандер-SS-26 STONE. www.bulgari-istoria-2010.com/booksBG/9K720%20ISKANDER.pdf. С. 24.
5. www.analog.com/ru/index.html.
6. Холикулов Э.Х., Султанов К.С., Исмаилов Х.М., Логинов П.В. Составляющие эле-

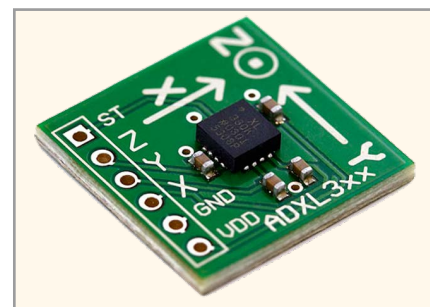


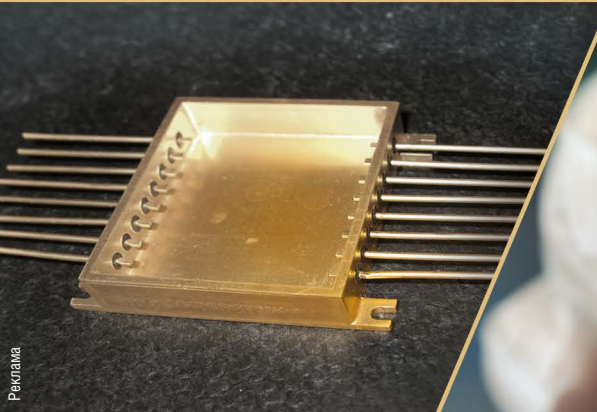
Рис. 13. Трёхосевой акселерометр ADXL330

менты системы мониторинга вибрации и колебаний КНК-270. Горный вестник Узбекистана. 2014. №1. С. 62. www.ngmk.uz/vestnik/vest_archive/2014/56.pdf. ©



ОАО «ЗАВОД «МАРС»

ПРОИЗВОДСТВО КОРПУСОВ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ





ZMARS@TORZHOK.TVCOM.RU



WWW.Z-MARS.RU / +7(848251) 552-37