

К. т. н. В. С. ГОЛУБ

Украина, г. Киев, Науч.-производств. фирма VD MAIS
E-mail: vdmais@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
09.10 2000 г.
Оппонент д. т. н. В. А. РОМАНОВ

ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЙ НА БАЗЕ МИКРОМЕХАНИКИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Описаны современные датчики ускорений (акселерометры), использующие новейшие принципы конструирования микромеханических и микроэлектронных приборов.

Развитие интегральной микроэлектроники способствует микроминиатюризации датчиков для измерения физических величин — температуры, давления, энергетической освещенности, ускорений и др. [1]. Ниже рассматриваются датчики ускорений (акселерометры) и, в частности, их промышленные образцы, выпускаемые фирмой Analog Devices [2–5].

Датчики разработаны на базе новейшей технологии — поверхностной микромеханики (surface micromachining), удачно сочетающейся с микроэлектронной технологией [5 (33-1); 6]. Помимо создания уникальных микромеханизмов, указанная технология обеспечивает бесконтактное соединение электрических цепей обеих систем — микромеханики и микроэлектроники. Современное построение измерительных систем предусматривает применение специализированных процессоров для цифровой обработки выходных сигналов датчиков разных типов [2, с. 9.1–9.17; 7].

РАССМАТРИВАЯ принцип работы датчика ускорений, будем пользоваться понятием силы инерции. Зачастую силы инерции считаются несуществующими, кажущимися или псевдосилами. Тем не менее силы инерции признаны [8, с. 154, 155], и реально именно они действуют на чувствительный элемент датчика (и не только на него). Датчик закрепляется, например, на объекте, способном перемещаться с ускорением, и является его составной частью. Объект (вместе с датчиком) рассматривается принадлежащим к так называемой неинерциальной системе отсчета, в которой проявляется действие сил инерции, а внешняя среда — к инерциальной, в которой объект движется с ускорением [8].

В общем случае на чувствительный элемент датчика, а также на объект в целом, действуют не только силы инерции, пропорциональные массам элемента и объекта, соответственно, но и силы тяготения (гравитационные силы), также пропорциональные указанным массам. Те и другие силы чувствуются одинаково, без какого-либо различия, что соответ-

ствует принципу эквивалентности масс — инерционной (инертной) и гравитационной, а также (в соответствии с общей теорией относительности) эквивалентности обоих явлений — инерции и гравитации (тяготения).

Силы инерции и тяготения имеют однотипные выражения —

$$\mathbf{P}_И = -m\mathbf{a}; \mathbf{P}_Т = mg,$$

где m — одна и та же масса, выступающая в одном случае как инерционная, а в другом как гравитационная, а $-\mathbf{a}$ и \mathbf{g} — "инерционное ускорение" и гравитационное, соответственно. Знак минус перед \mathbf{a} обусловлен тем, что \mathbf{a} — это ускорение движения, а $-\mathbf{a}$ — инерционное, численно равное первому, но противоположное ему по направлению действия. Сумма ускорений движения и инерции равна нулю, но действуют они в разных системах отсчета: с ускорением движения перемещается объект относительно окружающей среды (в инерциальной системе отсчета), а "инерционное ускорение", порождаемое силой инерции, действует в перемещающемся объекте (в неинерциальной системе отсчета).

Силы тяготения и инерции рассматривают как результат воздействия полей тяготения и инерции. Указанные поля можно сравнить с магнитными полями индукции и самоиндукции, в результате чего, по аналогии, поле инерции можно считать полем "самотяготения", возникающим в результате ускоренного движения тела. При этом, как уже сказано, ускоренное движение происходит в инерциальной системе отсчета, а сила инерции, как результат этого движения, возникает в неинерциальной системе. Сила тяготения действует одновременно в обеих системах (трансформируется из одной системы в другую один к одному). Соответственно, если в неинерциальной системе создать другую, "внутреннюю", неинерциальную систему, первая неинерциальная система будет для нее инерциальной, а сила инерции, действующая в первой системе, будет проявляться в ней как сила тяготения.

Если сказать проще, без учета систем отсчета, как это делается в электротехнике (в соответствии с явлениями индукции и самоиндукции), то на объект и, соответственно, на датчик и его чувствительный элемент могут воздействовать несколько ускорений движения (из разных неинерциальных систем, на-

ДАТЧИКИ

ходящихся одна в другой). Суммарное ускорение будет равно

$$\mathbf{a}_\Sigma = \mathbf{g} - (\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots),$$

где $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots$ — указанные ускорения, которые могут быть равны или не равны нулю. В отличие от $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots$, ускорение \mathbf{g} (в наших "земных" условиях) всегда присутствует, т. к. обусловлено полем тяготения Земли, и будет воздействовать на датчик. Отметим, что ускорение тяготения несколько ослаблено за счет "инерционного ускорения", обусловленного вращением Земли. В этом смысле Землю можно рассматривать как неинерциальную систему, вращающуюся вокруг своей оси в солнечной инерциальной системе. Что касается вращения Земли вокруг Солнца, то при этом вращении, сопровождаемом свободным падением, Земля будет в состоянии невесомости по отношению к Солнцу (а также по отношению к космосу в целом). Ускорения, как и силы, — векторные величины. Соответственно, выражение для \mathbf{a}_Σ представляет собой векторную сумму ускорений.

Согласно сказанному выше, датчики ускорений (акселерометры) предназначены для измерения ускорений двух видов — движения (благодаря явлению инерции) и тяготения и будут измерять их без различия того, что это за ускорения. Все будет определяться установкой датчиков и их использованием.

ФИРМА Analog Devices выпускает одно- и двухосевые (одно- и двухкоординатные) датчики, перечисленные в **таблице**. Первые из них измеряют ускорения в одном (X), вторые — в двух (X и Y) взаимно перпендикулярных направлениях.

Датчики выпускаются под торговой маркой MEMS® (Integrated Microelectromechanical Systems) и предназначены для измерения ускорений на транспортных средствах, при механических (вибрационных, ударных и статических) испытаниях механизмов и приборов, для контроля вибрации станков, оборудования и зданий и для других целей. По величине измеряемого ускорения датчики подразделяются на две группы: со шкалами низких и высо-

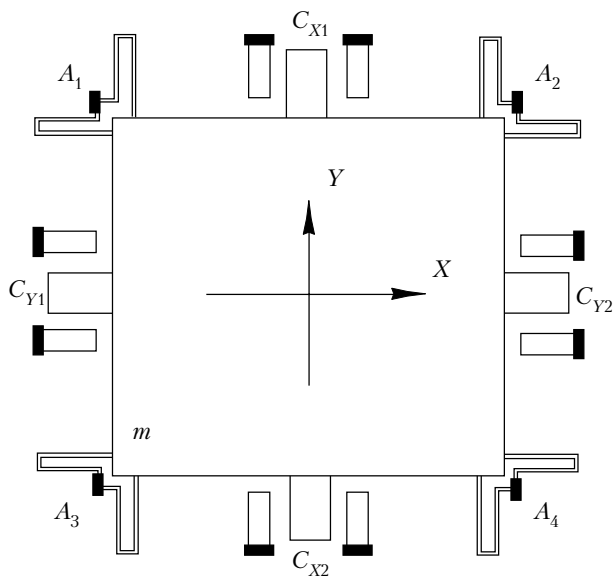
ких ускорений — до $10g$ ($2g, 5g$ и $10g$) и выше $10g$ ($50g$ и $100g$). В качестве единицы измерения принято ускорение земного тяготения g . Величина g зависит от земной широты и высоты над уровнем мирового океана. В зависимости от широты значение g лежит в пределах от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,834 \text{ м/с}^2$ на полюсах при среднем значении $9,807 \text{ м/с}^2$. Возможные отклонения величины g в зависимости от местности находятся в пределах точности рассматриваемых датчиков. Ускорение земного тяготения используется для их калибровки. При необходимости более точная калибровка датчиков может быть произведена с учетом поправки к ускорению g для данной местности. Вдоль каждой из осей датчики производят измерение в двух взаимно противоположных направлениях (положительное и отрицательное ускорения).

Рассмотрим действие двухосевого датчика, установленного горизонтально на автомашине: ось X — по направлению движения и ось Y — боковое направление (под углом 90°). По оси X будет измеряться ускорение движения (в т. ч. отрицательное при торможении). По оси Y будет измеряться ускорение, возникающее при поворотах и пропорциональное квадрату угловой скорости. При движении по горизонтали датчик не будет реагировать на ускорение тяготения, но при подъеме и спуске, т. е. при продольном крене, а также при боковом крене автомашины измеряемые ускорения движения будут суммироваться с составляющими ускорения тяготения $g \sin \alpha$ и $g \sin \beta$, где α и β — соответствующие углы наклона (по осям X и Y). При этом датчик будет различать положительные и отрицательные углы наклона (знак синуса определяется знаком угла). Соответственно датчик будет измерять только крен при отсутствии ускоренного движения или вообще при отсутствии движения. Одно из применений датчиков на автомашине — обеспечение срабатывания защитных средств при резком торможении или столкновении.

На **рисунке** приведена упрощенная схема построения чувствительного элемента двухосевых дат-

Акселерометры фирмы Analog Devices

Тип (наименование) датчика	Количество координат	Шкала измеряемых ускорений, g				Диапазон частот ускорений (-3 дБ), кГц	Разрешение, g	Чувствительность		Нелинейность, %	Шум, $\frac{mg}{\sqrt{Гц}}$	Угол рассогласования, °
		Нижнее значение	Верхнее значение					Аналог, мВ/г	ШИМ, %/г			
ном.	мин.		тип.									
ADXL105JQC ADXL105AQC	1	±1	±5	±5	±7	12	0,002	250	-	0,225	-	
ADXL150JQC ADXL150AQC		±5	±50	±40	±50	1	0,01	38,0				
ADXL190WQC			±100	±105	-	0,4	0,04	18,0				
ADXL202JE ADXL202AE	2		±2	±2	-	6/1 (Аналог/ ШИМ)	0,005	312	12,5	0,2	±0,01	
ADXL202JQC ADXL202AQC			±2	±1,5	±2	5/0,5 (Аналог/ ШИМ)						0,005
ADXL210JQC ADXL210AQC			±10	±8	±10			4,0				
ADXL250JQC ADXL250AQC			±5	±50	±40	±50	1	0,01				38,0



Упрощенная схема чувствительного элемента датчика ускорений

чиков ADXL202 и ADXL210 [4; 5 (33-1)]. Его основу составляет прямоугольная пластина, обладающая массой m и установленная на полисиликоновых рессорных подвесках $A_1 - A_4$, расположенных по углам пластины (показаны в упрощенном виде). Пластина имеет возможность смещаться в своей плоскости под действием сил инерции и тяготения (соответственно по осям X и Y). Величина смещения определяется приложенной силой, уравновешиваемой силой упругости, возникающей благодаря деформации подвесок и пропорциональной этому смещению. Конструкция двухосевого чувствительного элемента, схематически показанного на рисунке, является новой. В датчике ADXL250 [4; 5 (30-4)], разработанном ранее, вместо двухосевого используются два одноосевых элемента, установленных под углом 90° .

По сторонам пластины расположены дифференциальные конденсаторы C_{X1} , C_{X2} , C_{Y1} и C_{Y2} , подвижные части (пальцы) которых механически составляют одно целое с пластиной. Каждый подвижный палец охвачен двумя неподвижными, с которыми он и составляет дифференциальный конденсатор, состоящий из двух секций. При смещении подвижного пальца (вместе с пластиной) емкость одной секции возрастает, а другой — уменьшается. Разбаланс емкостей, обусловленный смещением пластины, используется в электрической части датчика для получения сигнала, пропорционального измеряемому ускорению. На рисунке на каждой стороне пластины показан один конденсатор. В действительности их несколько, и они включены параллельно, причем вместе включены конденсаторы обеих противоположных сторон. В результате чувствительный элемент датчика имеет два "суммарных" конденсатора — C_X и C_Y , состоящих из нескольких конденсаторов. Размеры элементов дифференциального конденсатора: длина активной части пальцев — 125 мкм, высота — 2 мкм, зазор между подвижными и неподвижными пальцами (в среднем положении) — 1,3 мкм.

Электрическая часть датчиков ADXL202 и ADXL210, помимо указанных конденсаторов, содержит:

- двухтактный высокочастотный генератор, выходное напряжение которого подается в противофазе на неподвижные пальцы дифференциальных конденсаторов (C_X и C_Y);

- демодуляторы (в каждом канале X и Y), входы которых подключены к подвижным пальцам C_X и C_Y . В демодуляторах выходной сигнал конденсаторов, величина и фаза которого определяются измеряемым ускорением, демодулируется в сравнении с напряжением высокочастотного генератора (синхронное детектирование);

- RC -фильтры на выходе демодуляторов, резисторы которых находятся в составе микросхемы, а конденсаторы, обеспечивающие вместе с резисторами фильтрацию демодулированного сигнала, могут быть подключены снаружи. Соответственно выводы для подключения конденсаторов являются выводами выходного аналогового сигнала;

- двухканальный преобразователь выходного аналогового напряжения в сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Измеряемое ускорение пропорционально $\Delta T / T_2$, где $\Delta T = T_1 - T_2 / 2$, T_1 — длительность импульса, T_2 — период ШИМ-сигнала. Период может быть выставлен внешним резистором в пределах от 0,5 до 10 мс.

В других датчиках — микросхемах ADXL150 / 190 / 250 — на выходе вместо широтно-импульсного преобразователя используются буферные усилители, позволяющие производить также подрегулировку нуля и максимального показания шкалы выходного напряжения. Микросхема ADXL105 дополнительно содержит температурный датчик, который может быть использован для температурной компенсации выходного напряжения датчика ускорений. Буферный усилитель в ADXL105 имеет свободные выводы входа и выхода и может быть конфигурирован по желанию потребителя. Все датчики имеют цепь самотестирования. Как уже сказано выше, использование специализированных процессоров (и не только специализированных) обеспечивает получение выходных данных в цифровой форме.

Основные параметры датчиков приведены в таблице. Обозначение датчика состоит из основной части (ADXL105 и др.) и дополнительной, первая буква которой определяет разновидность датчика, отличающуюся, в основном, температурным диапазоном: J — от 0 до $+70^\circ\text{C}$; A — от -40 до $+85^\circ\text{C}$; W — от -40 до $+105^\circ\text{C}$. Остальные буквы обозначают корпус микросхемы: QC — керамический корпус с 14 выводами для поверхностного печатного монтажа, расположенными с двух сторон корпуса, масса микросхемы — 5 г; E — керамический корпус меньшего размера с 8 выводами, расположенными под корпусом, масса — 1 г (для нового датчика ADXL202E [4]). Датчики способны выдерживать удары длительностью 0,5 мс, не повреждаясь: во включенном состоянии — до 500–1000 g , в выключенном — до 1000–2000 g (в зависимости от типа датчика). Температура хранения датчиков — от -65 до $+150^\circ\text{C}$. Напряжение питания — от 2,7 до 6 В (в зависимости от типа датчика).

ДАТЧИКИ

Помимо рассмотренных датчиков, фирма Analog Devices выпускает модули (Evaluation Modules), содержащие один (ADXL105EM-1, ADXL150EM-1, ADXL190EM-1) и три (ADXL105EM-3, ADXL150EM-3) датчика. Последние установлены в модулях в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Указанные модули являются оценочными, но могут быть использованы для измерений. Фирма выпускает также оценочные платы (Evaluation Boards) ADXL105EB, ADXL150EB, ADXL202EB, ADXL210EB и ADXL250EB, содержащие в смонтированном состоянии датчики и другие компоненты — все, что необходимо для ознакомления с датчиками и практической оценки их возможностей. Выпускается также набор (Evaluation Kit) ADXL202EB-232, дополнительно содержащий кабель для подключения к разъему интерфейса RS-232 и компакт-диск с программным обеспечением для оценки возможностей датчика и моделирования его работы на компьютере. В указанном наборе, помимо ADXL202, может быть использован датчик ADXL210 [3].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Электронные компоненты и системы. — Киев: VD MAIS, 1997, №№ 1–5; 1998, №№ 1, 3–6; 1999, №№ 1, 7, 8, 10.
2. Practical design techniques for sensor signal conditioning. — Analog Devices, 1999.
3. Accelerometer products sales primer // Technical Topics. — Analog Devices, Spring 2000. — Vol. VI, N 2, вкладка.
4. Analog Devices' Data Sheets: ADXL105, Rev. A, 1999; ADXL190, Rev. 0, 1999; ADXL202/ADXL210, Rev. B, 1999; ADXL150/ADXL250, Rev. 0, 1998; ADXL202E, Rev. 0, 2000.
5. Analog Dialogue (журнал). — Analog Devices, 27-2 (1993), 30-4 (1996), 33-1, 33-6 (1999).
6. Романов В. Микроизоляторы и микрореле на основе MEMS-технологии // Электронные компоненты и системы. — Киев: VD MAIS. — 2000. — № 7. — С. 3–4.
7. Охрименко В. Микроконвертеры — интеллектуальные АЦП и ЦАП // Там же. — 2000. — № 1. — С. 9–12.
8. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности. — М.: Высш. шк., 1986.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИЙ. СИМПОЗИУМЫ.

Э Н Е Р Г О Ф О Р У М "УКРАИНА-2001"

22–25 МАЯ
УКРАИНА,
КИЕВСКИЙ ДВОРЕЦ
СПОРТА

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

**"ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЕВРОПЫ.
ВЗГЛЯД В XXI ВЕК"**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЫСТАВКИ

- Нефть и газ
- Уголь
- Энергия'2001
- Нефтеперерабатывающая промышленность и нефтехимия
- Теплотехника
- Электротехника и электроника
- Энергоавтоматика и контроль

Адрес организационного комитета: 04112, г. Киев, ул. Гонты, 1, оф. 58.

Тел./факс: +38 (044) 458 3662, 458 1873.

E-mail: uez@elan-ua.net

в портфеле редакции

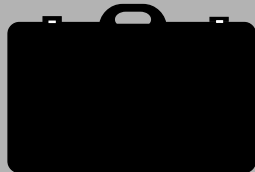
в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

➤ Новые методы обеспечения работоспособности биполярных микросхем в условиях воздействия проникающей радиации. А. И. Белоус, Э. П. Каложкин, И. Н. Карпов, В. Н. Пономарь, А. В. Прибыльский (Белоруссия, г. Минск)

➤ О возможности создания немесбауэровского гамма-лазера на основе прямозонных полупроводниковых соединений. А. С. Гаркавенко (Украина, г. Львов)



➤ Исследование выходного шума округления типовых структур цифрового фильтра второго порядка при изменении коэффициентов передаточной функции. В. П. Малахов, В. С. Ситников, П. В. Ступень, С. В. Ульяшин (Украина, г. Одесса)

➤ Функциональные микроэлектронные преобразователи для дистанционных измерений. Я. Ю. Гусейнов (Азербайджан, г. Сумгаит)

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции