

## Акселерометры компании Measurement Specialties

Александр БАЛАКИРЕВ  
balakirev@prosoft.ru

Статья знакомит специалистов с технологиями, линейкой продукции и областями применения акселерометров компании Measurement Specialties, специализирующейся на производстве двух основных в классификации этих устройств типов — пьезорезистивных (MEMS) и пьезопленочных/пьезоэлектрических датчиков ускорения.

Акселерометр (от лат. *accelero* — ускоряю и греч. *metréō* — измеряю) представляет собой прибор для измерения механического ускорения (перегрузок и вибрации), или датчик — преобразователь механического ускорения в электрический сигнал.

Схематично конструкция акселерометра с инерционной массой может быть описана в физической модели как масса, подвешенная на пружине, соединенной с основанием (рис. 1).

В такой инерциальной системе инерционная масса остается на своем месте до тех пор, пока на нее не начинает действовать сила растяжения пружины величиной, достаточной для вывода системы из равновесия. Перемещение массы пропорционально ускорению, которое в этой модели можно измерить по перемещению.

Процесс тотальной микроминиатюризации в мире измерительной электроники в первую очередь коснулся датчиков давления и акселерометров. Добиться уменьшения размеров датчиков позволили применение чувствительных элементов (ЧЭ), выполненных по MEMS-технологиям, и уход от таких ставших уже классическими технологий, на основе которых производятся пьезоэлектрические кварцевые или пьезокерамические датчики.

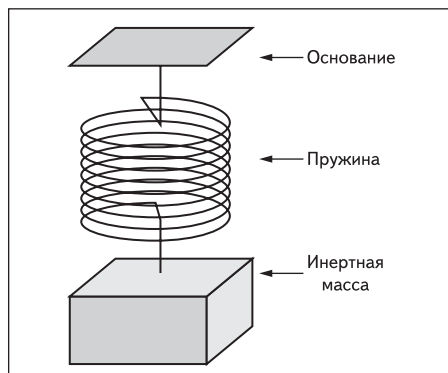


Рис. 1. Физическая модель акселерометра с инерционной массой

Подавляющее большинство акселерометров, выпускаемых в настоящее время в мире, работают на основе пьезоэлектрического, пьезорезистивного и емкостного принципов. Компания Measurement Specialties (MSI) выпускает акселерометры на основе первых двух принципов, но применяемые специалистами MSI-технологии, которые рассматриваются далее, уникальны, причем позволяют получить высокие рабочие характеристики датчиков.

### Пьезорезистивный принцип MSI

Для создания чувствительных элементов акселерометров пьезорезистивного типа Measurement Specialties использует два вида конструкций:

- мостового типа;
- кантилеверного типа.

Обе конструкции представляют собой уникальную трехслойную кремниевую структуру. На монолитной подложке располагается чувствительный слой. Сверху система закрывается кремниевой крышкой.

Различие конструкций заключается в чувствительном слое. Чувствительный слой первого (мостового) типа представляет собой кремниевую фрейм-рамку, к которой при по-

мощи микробалок крепится инерционная масса (рис. 2).

На микробалках методом ионной имплантации выполнены пьезорезисторы. На каждой микробалке размещается по два пьезорезистора: один на стыке микробалки и инерционной массы (*m*-типа), второй на стыке микробалки и кремниевой рамки (*f*-типа). Для измерения пьезорезисторы включены в мост Уитстона. Причем каждое плечо содержит пьезорезисторы одного типа: либо *f*, либо *m*, по два в каждом плече (рис. 3). Для соединения резисторных плеч разных типов использована дифференциальная схема.

Такое исполнение позволяет достигать чувствительности порядка 1% к ускорению вне чувствительной оси и устранять значимые внеосевые резонансы.

Во втором типе чувствительного слоя отсутствует двусторонняя поддержка. Инерционная масса крепится к кремниевой рамке при помощи кантилевера. На кантилевере расположен всего один пьезорезистор (рис. 4). Следовательно, отсутствует и погашение ускорения вне чувствительной оси. Внеосевое ускорение до некоторой степени уменьшают посредством установки кристалла во время производства таким образом, чтобы центр

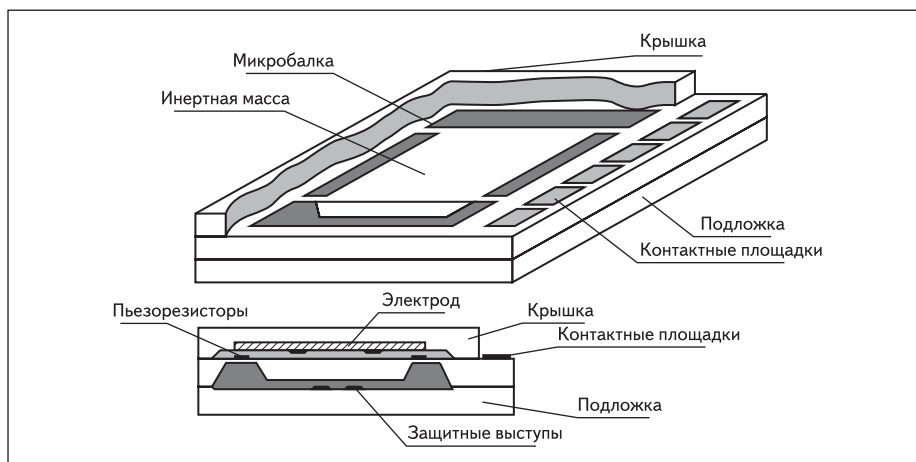


Рис. 2. Общий вид ЧЭ мостового типа

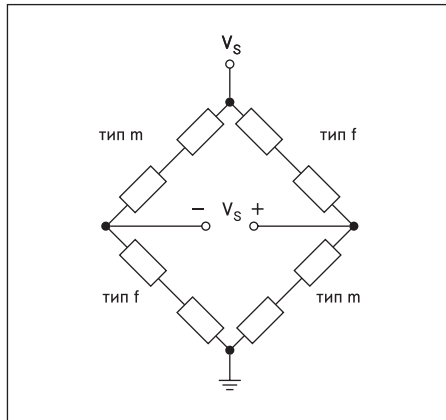


Рис. 3. Мостовая схема

массы кантилевера и центр инерционной массы были компланарны. Обычно угол установки составляет от 3° до 8° между плоскостями.

Крышка в обоих типах ЧЭ имеет одинаковую структуру и выполняет несколько задач:

- отверстия, вытравленные на нижней поверхности крышки, обеспечивают пневматическую амортизацию резонансных пиковых перемещений инерционной массы;
- небольшие защитные выступы на крышке и подложке ограничивают движение массы с двух сторон;
- электрод, расположенный с нижней стороны, обеспечивает функцию самоконтроля;
- осуществляется механическая защита измерительной структуры.

Благодаря защитным выступам появилась возможность применять акселерометры в более жестких условиях. Так, акселерометры могут подвергаться перегрузкам (сотрясениям), намного превосходящим верхнюю границу динамического диапазона датчика ускорения. Примером может послужить поведение акселерометра марки 3021, рассчитанного на ускорения до 5 g, при ударе 112 g (рис. 5.)

**Функция самоконтроля**

Функция самоконтроля решает две задачи. Во-первых, пользователь может удостовериться, что акселерометр готов к работе,

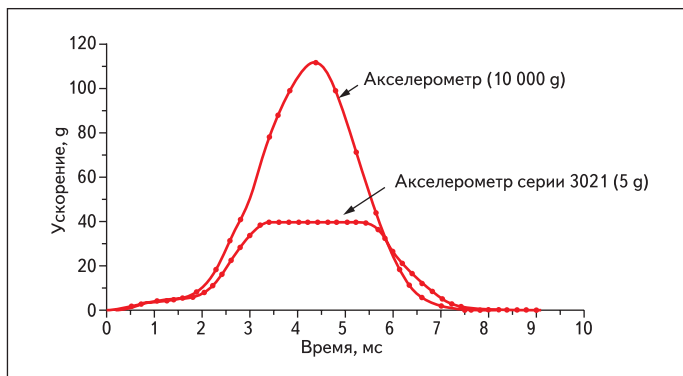


Рис. 5. Поведение акселерометра марки 3021 (5 g) при сверхнагрузке

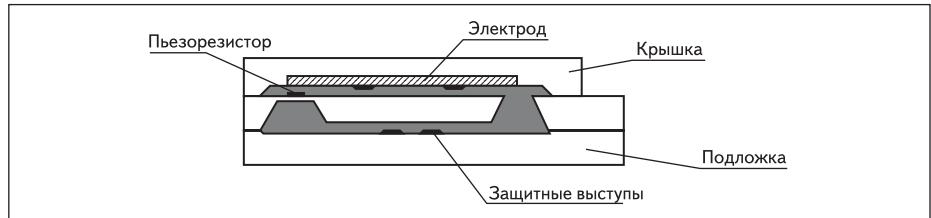


Рис. 4. Поперечный разрез ЧЭ кантилеверного типа

то есть инерционная масса может выполнять перемещения. Во-вторых, приложенная электростатическая сила позволяет регулировать отклонение инерционной массы.

Работа акселерометра с функцией самоконтроля также основана на простом отклонении массы от начального положения.

В начальном положении сумма всех сил, действующих на инерционную массу, равна 0:

$$0 = m \times g - F_{electro} - k_s \times (x_0 - x), \quad (1)$$

где  $m \times g$  — гравитационная сила,  $k_s \times (x_0 - x) = k_s \times \Delta x$  — возвращающая сила,  $F_{electro}$  — электростатическая сила.

$$F_{electro} = 0,5 \times \pi \times e \times A \times (V/x) \times 2, \quad (2)$$

где  $V$  — приложенное к электроду напряжение,  $A$  — площадь электрода,  $e$  — диэлектрическая постоянная.

Если электростатическая сила не приложена, то есть имеет нулевое значение, то смещение  $\Delta x$  пропорционально ускорению с коэффициентом пропорциональности  $m/k_s$ . Это обусловлено конструкцией акселерометра, рассмотренной выше. Смещение может быть определено при помощи измерения выходного напряжения моста Уитстона. Это модель стандартного акселерометра без самоконтроля.

Если электростатическая сила приложена, уравнение (1) становится нелинейным:

$$0 = m \times g \times 9,8 - 0,5 \times \pi \times e \times A \times \frac{V^2}{x_0^2 \times \left(1 - \frac{\Delta x}{x_0}\right)^2} - k_s \times \Delta x.$$

Для малого отклонения ( $\Delta x/x_0 < 5\%$ ) значение  $A$  может быть приблизительно равно  $x_0$ , так как электростатическая сила может изменять ширину зазора. Ошибка при этом составляет менее 10%. Обычно для акселерометра с динамическим диапазоном в 50 g с зазором в 5 мкм между инерционной массой и электродом электростатическое отклонение составляет около 3% полной шкалы с общей ошибкой до 5,9%. График ошибки отклоняющей силы для большой электростатической силы изображен на рис. 6, и он показывает, что при приближении частичного отклонения к единице ошибка становится существенной.

Приложенное напряжение к электроду общает инерционной массе ускорение:

$$g_{electro} \approx \frac{\pi \times e \times A \times V^2}{19,6 \times m \times x_0^2}$$

при условии малого отклонения. Ускорение (ускоряющая сила) зависит только от приложенного напряжения и, по существу, не зависит от температуры и чувствительности акселерометра. Этим и обусловлено применение такой системы для калибровочных целей.

Способность к самоконтролю повышает надежность датчиков, так как обеспечивает контроль окружающей среды, связанной с акселерометром и силой, отклоняющей инерционную массу. Способность к самоконтролю существенно понижает сложность схемы управления датчика.

**Пьезоэлектрический принцип MSI**

Чувствительные элементы пьезоэлектрических акселерометров Measurement Specialties пьезоэлектрического типа могут иметь и про-

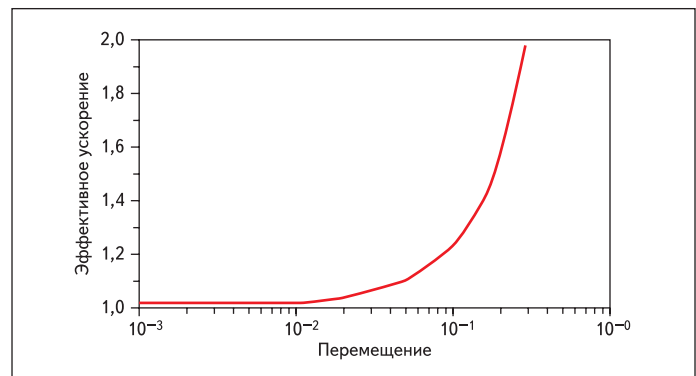


Рис. 6. График зависимости эффективного ускорения от перемещения инерционной массы

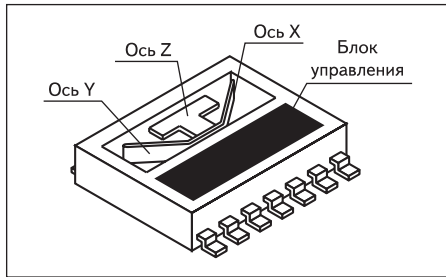


Рис. 7. Акселерометр с ЧЭ, выполненным по технологии «Оригами»

стую, и комбинированную конструкцию. Обычный пьезоэлектрический акселерометр представляет собой диск из пьезоматериала, имеющего кристаллическую структуру. К примеру, это может быть природный материал — кварц или искусственный материал — цирконат-титанат свинца.

Диск совмещается с инерционной массой, а электрический контакт пьезоэлемента в системе осуществляется посредством двух электродов, расположенных по одному на каждой стороне диска. При движении инерционная масса смещается, тем самым деформируя диск из пьезоматериала. Происходит перераспределение зарядов с обеих сторон. Посредством электродов изменения системы передаются к блоку управления. Компания MSI использует также пьезоэлектрические и флюорополимерные пленки (PVDF — polyvinylidene fluoride). Конструкция акселерометра простого одноосевого типа полностью аналогична обычным пьезоэлектрическим датчикам. Но из-за очень большого выходного сопротивления ЧЭ на подложке расположен также и полевой транзистор (JFET), выполняющий роль усилителя напряжения.

Комбинированная конструкция имеет более сложное исполнение. При помощи одного элемента акселерометр может быть ориентирован так, чтобы измерять ускорения сразу в трех направлениях. Такая технология получила красивое название «Оригами». Конструкция акселерометра с ЧЭ, выполненным по данной технологии, схематично показана на рис. 7.

### Важнейшие особенности и отличия акселерометров MSI

Имеются несколько важных характеристик, отличающих пьезорезистивные (ПР) и пьезоэлектрические (ПЭ) акселерометры MSI. Основная электромеханическая характеристика — частота. ПЭ-акселерометры чувствительны только к динамическим изменениям ускорения и не обладают чувствительностью к статическим. Нижняя граница частот таких приборов 1–3 Гц. ПР-акселерометры обладают чувствительностью и к статическим, и к динамическим изменениям. Поэтому, кроме основной цели измерения ускорения, такие приборы могут применять-



Рис. 8. Внешний вид датчиков серии Minisense 100

ся для измерения наклона или ориентации в пространстве.

Еще одна характеристика, заслуживающая внимания, — резонансная частота. ПЭ-акселерометры имеют резонансную частоту в диапазоне 10–30 кГц, ПР в диапазоне 500–5000 Гц. Такой диапазон вынуждает обеспечивать амортизацию большинства ПР-приборов. Амортизация выполняется воздухом или кремнийорганическим маслом. Это необходимо как для защиты прибора, так и для расширения диапазона частоты. В ПЭ-акселерометрах амортизацию обычно не выполняют.

### Области применения

Области применения акселерометров охватывают многие сферы деятельности человека. Так, для обеспечения надежной работы электронных блоков различных промышленных установок необходим постоянный контроль уровня вибрации и шума. Поэтому применяются целые системы обнаружения и генерации антишумовых и антивибрационных сигналов. Как правило, датчиком таких устройств является акселерометр.

Широкое применение акселерометры нашли в автомобильной промышленности. Это системы безопасности, сигнализации. Датчики этого типа необходимы и для проведения краш-тестов автомобилей. Компания Measurement Specialties представляет целый ряд разнообразных датчиков для данных применений.

Другими ключевыми сферами применения акселерометров являются военная техника и аэрокосмическая промышленность.



Рис. 9. Способ монтажа модели 3255: а) горизонтальный; б) вертикальный

Датчики для применений в этих областях должны отличаться и высокими рабочими характеристиками, и высоким уровнем защиты.

Кроме того, датчики сегодня нашли широкое применение в сейсмологических исследованиях, медицине, спорте, сотовых телефонах, ноутбуках.

### Конструктивные исполнения акселерометров MSI

В зависимости от задач, решаемых акселерометрами MSI, применяются различные типы корпусов, схем управления и типов ЧЭ. Для OEM-заказчиков компания предлагает акселерометры для монтажа на печатную плату. Очень удобным в применении можно считать исполнение серии Minisense 100 (рис. 8). Это датчик вибрации, который выполнен в виде небольшой платы с ЧЭ пьезопленочного типа. Выводы выполнены в удобном для монтажа исполнении. Активная часть датчика включает защиту RFI/EMI — от электромагнитных и излучаемых помех.

Датчик отличается превосходной линейностью и может быть использован для определения вибрации и соударений.

Интересное исполнение имеет модель 3255. Акселерометр сконструирован таким образом, что поддерживает возможность монтажа в двух направлениях (рис. 9).

При горизонтальном способе монтажа чувствительная ось может быть как параллельна, так и перпендикулярна поверхности монтажа, при вертикальном — только параллельна. Такое исполнение облегчает разработчикам размещение печатной платы конечного устройства. Диапазон измерения ускорения дан-

Таблица. Характеристики некоторых акселерометров компании Measurement Specialties

	Модель	Количество осей	Диапазон ускорений, g	Технология ЧЭ	Чувствительность, мВ/g	Усиление выходного сигнала	Частота, кГц
Для монтажа на печатную плату	3022/3028	1	2–200	ПР	0,4–10	–	0–2,7
	4650	1	5–500	ПР	4–400	+	0–1,5
	Minisense 100	1	<5	ПЭ	260 (pC/g)	–	До 40
	3255	1	25–500	ПР	4–80	+	0–1,5
Для систем безопасности автомобиля	АСН-04-08-05	3	250	ПЭ	1,8	+	0,5 Гц–4 кГц
	52	1	50–2000	ПР	0,15–2	–	0–5
	61	1	50–2000	ПР	0,08–3	–	0–4
	62/64	1	50–2000	ПР	0,15–2	–	0–5
	1202/1202F	1	50–1000	ПР	0,15–2	–	0–3
	1203	3	50–1000	ПР	0,15–2	–	0–1,5
Для общего применения	EGAXT3	3	5–2500	ПР	0,1–7,5	–	0–3
	АСН-01	1	250	ПЭ	10	+	1 Гц–20 кГц
	EGCS3	3	5–5000	ПР	0,04–40	–	0–4
	4630	3	5–500	ПР	4–400	+	0–1,5
	3801	1	10–2000	ПР	0,15–10	+	0–5

ной модели — от 25 до 500 g с номинальной чувствительностью от 80 до 4 мВ/g.

Для монтажа на печатную плату в линейке компании Measurement Specialties представлено еще несколько моделей. Все они имеют в основном пьезорезистивный ЧЭ, но есть модели и с пьезопленочным ЧЭ. Имеется широкий выбор корпусов, в основном керамических. С их характеристиками можно ознакомиться с помощью таблицы.

Помимо акселерометров для OEM-применений в линейке компании представлен также широкий ряд датчиков для систем безопасности автомобилей. Диапазон измерения ускорения от 50 до 2000 g с номинальной чувствительностью от 3 до 0,08 мВ/g покрывает диапазон ускорений, типичных для пассивных систем автомобильной безопасности

и крэш-тестирования. Причем датчики имеют разнообразное конструктивное исполнение — для поверхностного монтажа на плату и даже для винтового монтажа.

Дополнительную информацию по акселерометрам MSI можно получить на сайте компании [w ww.meas-spec.com](http://www.meas-spec.com). ■

### Литература

1. Understanding accelerometer technology. Brochure Measurement Specialties, Inc.
2. Allen H. V., Terry S. C., Bruin D.W., de. Accelerometer systems with built-in testing.
3. U.S. Patent 5.103.667. Self-testable micro-accelerator and method.
4. Accelerometer for crash and collision impact testing. Brochure Measurement Specialties, Inc.