

# Оглавление

Введение .....	4
<b>Глава 1. Датчики ускорения .....</b>	<b>7</b>
1.1. Приборы и датчики для измерения ускорения .....	7
1.2. Развитие емкостных MEMS-акселерометров фирмы Freescale Semiconductor .....	12
1.3. Семейство датчиков ускорения Freescale Semiconductor .....	20
1.4. Основные свойства и характеристики датчиков ускорения .....	30
1.5. Корпуса датчиков ускорения .....	34
1.6. Примеры применения датчиков ускорения в различных областях .....	37
1.7. Выбор датчика .....	45
1.8. Практика и примеры применения датчиков ускорения .....	46
1.8.1. Измерение углов наклона объекта .....	46
1.8.2. Обнаружение свободного падения и защита жестких дисков .....	51
1.8.3. Счисление пути .....	59
1.8.4. Измерение ударного импульса .....	62
1.8.5. Использование оценочных плат .....	68
1.8.6. Программа для отладки конкретных применений с использованием персонального компьютера .....	71
1.8.7. Особенности практического применения .....	79
<b>Глава 2. Датчики давления .....</b>	<b>80</b>
2.1. Методика измерения давлений в текучих средах .....	80
2.2. Области применения датчиков давления .....	89
2.3. Устройство и классификация датчиков .....	90
2.4. Корпуса, порты и крепление датчиков .....	100
2.5. Система обозначений .....	106
2.6. Основные характеристики семейств датчиков .....	108
<b>Глава 3. Датчики давления в автомобильных шинах .....</b>	<b>121</b>
3.1. Контроль давления в шинах. Системы TPMS .....	121
3.2. Виды систем TPMS .....	126
3.3. MPXU83xx — интегрированное решение для систем TPMS .....	129
3.4. Проблемы питания модулей TPMS .....	143
<b>Глава 4. Датчики приближения .....</b>	<b>146</b>
4.1. Принцип работы .....	146
4.2. Датчики приближения семейства MPR08x .....	147
4.3. Средства разработки сенсорных панелей на базе датчиков приближения .....	156
<i>Приложение 1. Словарь терминов и обозначений для датчиков давления .....</i>	<i>158</i>
<i>Приложение 2. Словарь терминов и обозначений для инерциальных датчиков .....</i>	<i>163</i>
<i>Приложение 3. Этапы «жизни» датчиков .....</i>	<i>164</i>
<i>Приложение 4. Интерактивная программа выбора датчиков .....</i>	<i>170</i>
Литература .....	177
Материалы, представленные на CD-диске .....	183

# Введение

Этот обзор можно было бы рассматривать как второе издание книги «Датчики фирмы MOTOROLA», вышедшей в Издательском доме «Додэка-XXI» в 2000 г., если бы жизнь за истекшее время не внесла существенных изменений в ситуацию.

Прежде всего сектор полупроводниковых компонентов компании Motorola в 2004 г. стал самостоятельной компанией Freescale Semiconductor, оставив за собой весь сектор бизнеса, которым он занимался с 1953 г., в том числе и по датчикам.

Кроме того, ассортимент компании существенно обновился и расширился, изменился и статус многих приборов:

1. **Датчики ускорения.** За время, прошедшее с 2000 г., число приборов в этом секторе увеличилось с двух до нескольких десятков типов, и их выпуск продолжает расти. Об этих датчиках рассказывается в гл. 1.
2. **Датчики давления,** которые находятся на пике своего развития. Хотя новые типы датчиков появляются не так часто, тем не менее ассортимент изменился и в этом секторе. Эти датчики описаны в гл. 2.
3. **Датчики давления в шинах TPMS.** Хотя формально эти приборы относятся к датчикам давления, они представляют собой новый класс устройств, в которых в одном корпусе интегрированы датчики давления, ускорения и температуры вместе с передающими и принимающими устройствами и микропроцессором. Этим перспективным датчикам посвящена гл. 3.
4. **Датчики приближения** представляют собой новый сектор бизнеса, осваиваемый Freescale Semiconductor в настоящее время. Наиболее значительной областью применения для них стали сенсорные управляющие панели таких портативных приборов, как мобильные телефоны, карманные компьютеры, MP3-плееры и др. Приборам этого типа посвящена гл. 4.
5. **Датчики тревожной сигнализации** переживают в настоящее время пору заката, они представляют интерес для ограниченного круга потребителей, применяющих их в существующих разработках. Информацию о них можно найти в книге «Датчики фирмы MOTOROLA», полный текст которой мы разместили на компакт-диске, прилагаемом к книге.

В приложениях читатель найдет полезную информацию, что поможет правильно выбрать необходимый датчик. **Приложения** написаны на основе богатого информационного англоязычного материала, который нахо-



Это прежде всего сборник Data Book DL200, содержащий подробную справочную информацию Data Sheet (DS) по большинству датчиков. Новая информация, не вошедшая в Data Book, представлена на диске в виде отдельных файлов. Для поиска датчиков служит руководство пользователя Selector Guide SG1010, содержащее краткую информацию обо всех датчиках. Краткая информация об основных свойствах конкретного датчика содержится в информационном бюллетене Fact Sheet (FS). И наконец, информация о специфике конкретных применений датчиков в различных областях, содержащая теоретические сведения, методики и примеры расчета, схемы и программы, приводится в статьях по применению Application Notes (AN).

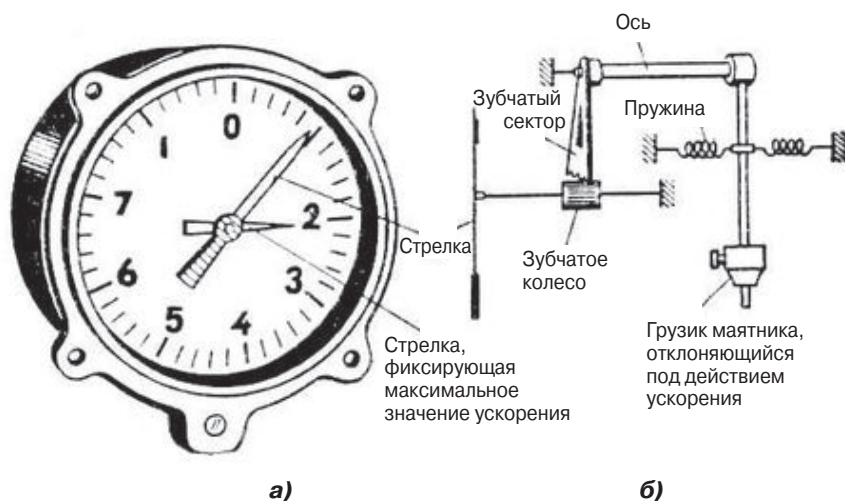
## Датчики ускорения

### 1.1. Приборы и датчики для измерения ускорения

Изначально такие датчики применялись в авиации, где они выполняли и выполняют роль измерителей ускорения (акселерометров). Акселерометры в авиации предназначены для измерения ускорений летательного аппарата ЛА (самолета, вертолета и др.), необходимых для управления полетом по заданной траектории, определения координат ЛА в пространстве, предотвращения больших перегрузок, действующих на экипаж и на сам летательный аппарат. По устройству акселерометр представляет собой грузик, подвешенный на пружинах внутри корпуса. При ускорениях летательного аппарата перемещение грузика передается на стрелку прибора или преобразуется в электрический сигнал.

**Механические акселерометры.** Механические акселерометры (например, акселерометры типа АМ-10, применяемые в авиации) [Фридлендер] предназначены для определения перегрузок, действующих на ЛА в направлении его вертикальной оси (**Рис. 1.1**). Эти приборы относятся к измерительным системам, которые используются для отображения полетной ситуации при ручном управлении полетом. Шкала прибора проградуирована в единицах, кратных

величине ускорения свободного падения ( $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ ). При отсутствии перегрузок (т. е. ускорений) стрелка указателя устанавливается на деление «+1» шкалы. В этом случае прибор показывает величину ускорения силы тяжести  $g$ .

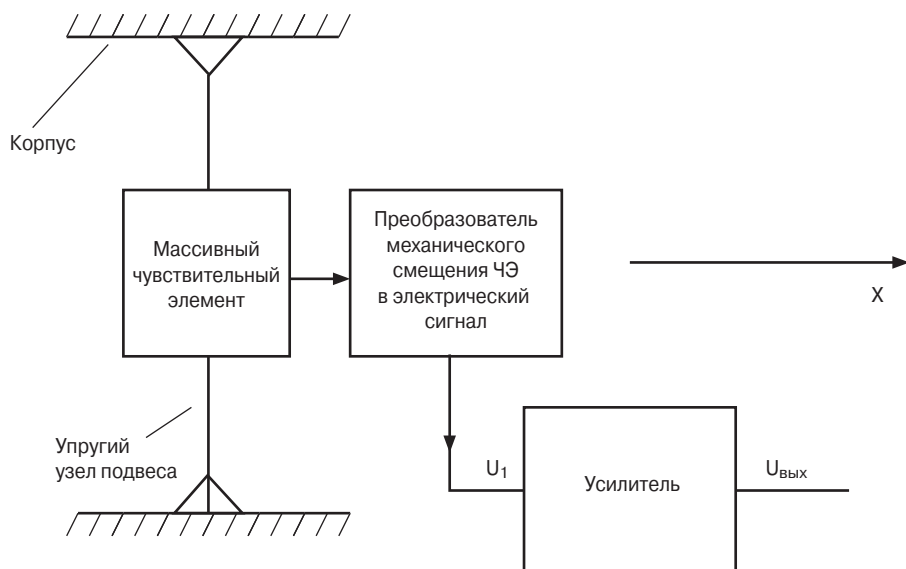


**Рис. 1.1.** Авиационный механический акселерометр:  
а) общий вид,  
б) кинематическая схема.

Хотя такие датчики еще используются в простейших моделях самолетов, внедрение автоматизированных систем управления в авиации привело к появлению различных акселерометров с электрическим выходным сигналом.

**Датчики с электрическим выходным сигналом.** Для использования в электронных системах автоматического регулирования пригодны только датчики с электрическим выходным сигналом. Общая схема таких датчиков с осью чувствительности, направленной по горизонтали (осью X) [<http://www.airwiki.org/breo/pnk/pnk6.html>], представлена на **Рис. 1.2.**

Принцип работы такой структуры заключается в следующем. Если подвес не абсолютно жесткий, то чувствительный элемент (ЧЭ) смещается за счет инерции в сторону, обратную направлению ускорения. При этом за счет смещения на вы-



**Рис. 1.2.** Схема датчика с электрическим выходным сигналом.

ходе преобразователя возникает электрический сигнал, который усиливается усилителем и может использоваться как для ручного, так и для автоматического управления.

**Преобразователи датчиков с электрическим выходным сигналом.** Преобразователь смещения ЧЭ, показанный на **Рис. 1.2**, может быть основан на самых различных физических принципах. В **Табл. 1.1** приведены краткие характеристики различных типов преобразователей, используемых в акселерометрах.

**Таблица 1.1.** Преобразователи смещения ЧЭ в электрический сигнал

п/п	Тип преобразователя	Принцип работы	Рисунок
1	Потенциометрический	ЧЭ связан с движком потенциометра, и при движении ЧЭ изменяется потенциал на выходе	

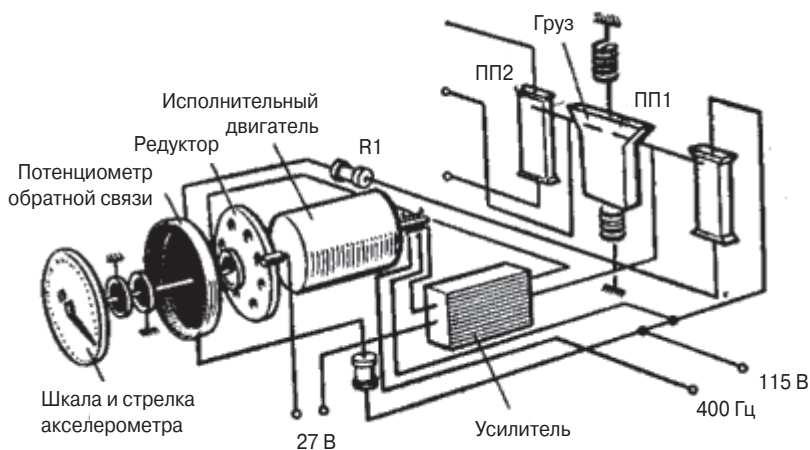
(продолжение)

п/п	Тип преобразователя	Принцип работы	Рисунок
2	Тензометрический	ЧЭ производит на резистивный элемент давление, под действием которого изменяется сопротивление этого элемента. При включении его в цепь делителя напряжений изменяется потенциал на выходе	
3	Пьезоэлектрический	ЧЭ производит давление на пьезоэлектрический преобразователь. При этом на выходе пьезоэлемента генерируется ЭДС, пропорциональная оказываемому давлению. Преобразователь является генератором электрического сигнала и не требует внешних источников питания	
4	Емкостный	ЧЭ является одной из пластин конденсатора, емкость которого изменяется при смещении ЧЭ. Для преобразования величины емкости в потенциал используется источник тока с заданной длительностью импульса	

На **Рис. 1.3** представлен авиационный акселерометр АДП, относящийся к первому типу (потенциометрический), в котором для повышения точности измерений ЧЭ устанавливается вблизи центра масс летательного аппарата.

В таком акселерометре приложенное ускорение приводит к смещению грузика и связанного с ним движка потенциометра, что изменяет входной сигнал на усилителе. При этом изменяется напряжение на исполнительном двигателе, который через редуктор поворачивает стрелку измерительного прибора и ось потенциометра обратной связи. Сигнал с выхода усилителя может использоваться в качестве сигнала обратной связи при построении систем автоматического управления. Известные недостатки макромеханических систем, изготавливаемых по традиционной технологии (включая механические и электромеханические системы), связаны с большим объемом и износом трущихся





**Рис. 1.3.** Электрокинематическая схема дистанционного акселерометра АДП.

поверхностей. С развитием современных высоких технологий появились новые системы, сочетающие микромеханические и микроэлектронные устройства, сформированные на одном кремниевом кристалле. Такая технология получила название «технология MEMS» (Micro-Electro-Mechanical Systems — микроэлектромеханические системы).

**Датчики, использующие технологию MEMS.** Развитие датчиков с использованием технологии MEMS инициировали автомобильные компании, для которых масса, объем и стоимость датчиков были более критичны, чем для авиационных лайнеров, а объем рынка постоянно рос, обеспечивая достаточные прибыли для проведения исследовательских работ. Для технологии MEMS наиболее перспективными оказались тензометрические, пьезоэлектрические и емкостные датчики, которые оказалось возможным сформировать в поверхностных и объемных структурах кремниевой пластины. В настоящее время все эти датчики разрабатываются различными компаниями, занимая собственные ниши в разных областях применения. На **Рис. 1.4** представлена качественная зависимость точности от цены для датчиков MEMS различных типов [[http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02\\_01/stat\\_66.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02_01/stat_66.htm)].

Пьезопленочные датчики оказались более дешевыми, но не слишком точными, более точными являются поверхностные емкостные датчики, но они несколько дороже, еще дороже и точнее интегральные датчики, выполненные по объемной технологии. Электромеханические и пьезоэлектрические датчики, изготавливаемые по традиционной технологии, самые дорогие, но они применяются по-прежнему в тех областях, где точность является наиболее важным показателем.

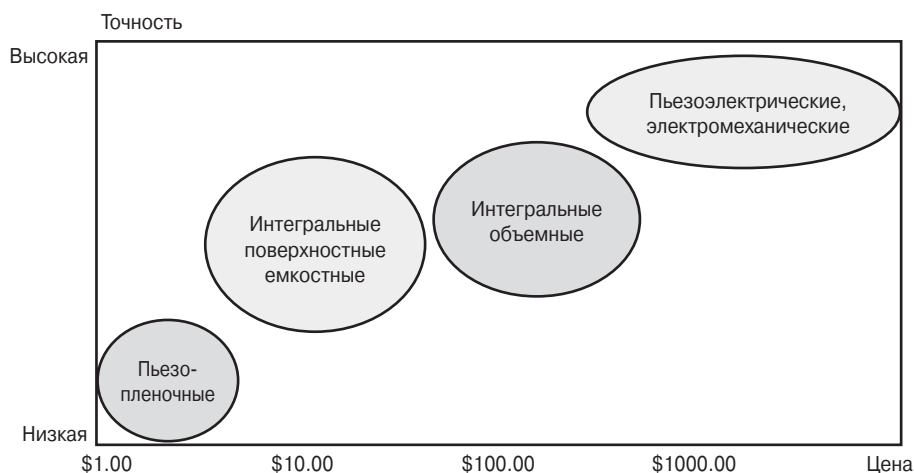


Рис. 1.4. Сравнение датчиков ускорения различных типов по соотношению точность—цена.

## 1.2. Развитие емкостных MEMS-акселерометров фирмы Freescale Semiconductor

К преимуществам емкостных датчиков ускорения относятся:

- Исключительная возможность совмещения в одном корпусе двух датчиков (датчика давления и многоосевого датчика ускорения).
- Возможность осуществления дополнительных функций (например, самотестирования).

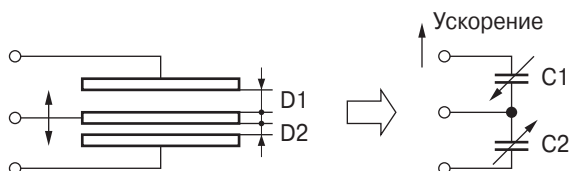
- Высокая точность и воспроизводимость измерений.
- Защита от перегрузок и прочность.
- Низкое выходное сопротивление.
- Малые габариты.
- Высокий КПД.
- Возможность применения диафрагм для ограничения смещения резисторов при перегрузках.

К достоинствам емкостного метода измерений относятся:

- Высокая линейность и чувствительность.
- Легко осуществимые самотестирование и самокалибровка.
- Легкая реализация цепей обратной связи (малая масса).
- Совместимость с КМОП-технологией.
- Минимальная подгонка.
- Широкий диапазон рабочих температур.

Сочетание всех этих качеств приводит к тому, что емкостные датчики имеют очень высокие потенциальные возможности и занимают лидирующее положение в бытовой и промышленной электронике.

Принцип работы *интегральных емкостных датчиков* ускорения хорошо иллюстрируется схемой, представленной на **Рис. 1.5**.



**Рис. 1.5.** Структурная схема датчика ускорения.

Три пластины образуют последовательное соединение двух конденсаторов. Две крайние пластины жестко закреплены, а центральная пластина может сдвигаться под действием инерциальных сил. Расстояние между пластинами при этом изменяется, что приводит к изменению емкости

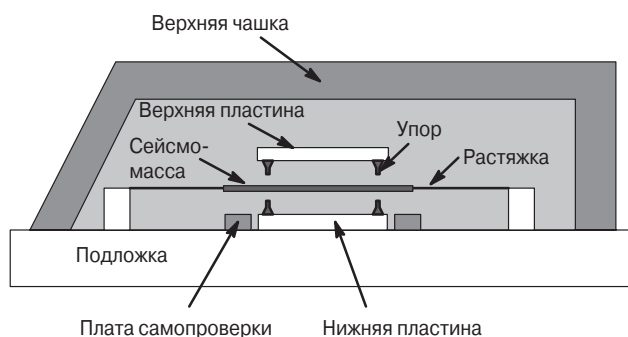
конденсаторов. Емкость одного из них уменьшается, емкость другого увеличивается в соответствии с выражением

$$C = \frac{A\varepsilon}{D},$$

где  $A$  — площадь пластины,  
 $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная,  
 $D$  — расстояние между пластинами.

При отклонении от среднего положения, показанного на **Рис. 1.5**, емкость нижнего конденсатора увеличивается, а емкость верхнего уменьшается. При современных достижениях интегральной технологии оказалось возможным осуществить принцип, показанный на **Рис. 1.5** в едином кристалле, создав микродатчик.

Структура полупроводникового датчика ускорения (**Рис. 1.6**) включает в себя четыре пластины из поликристаллического кремния, три из которых образуют два последовательно соединенных конденсатора, показанных на **Рис. 1.5**, а четвертая используется для самотестирования.



**Рис. 1.6.** Конструкция полупроводникового датчика ускорения.

Изменение емкости желательно преобразовать в изменение выходного напряжения, и обычным средством для этого является интегратор, в котором на измеряемый конденсатор подается прямоугольный импульс тока длительностью  $t_H$  и измеряется напряжение на конденсаторе, обратно пропорциональное его емкости  $C$  в соответствии с выражением

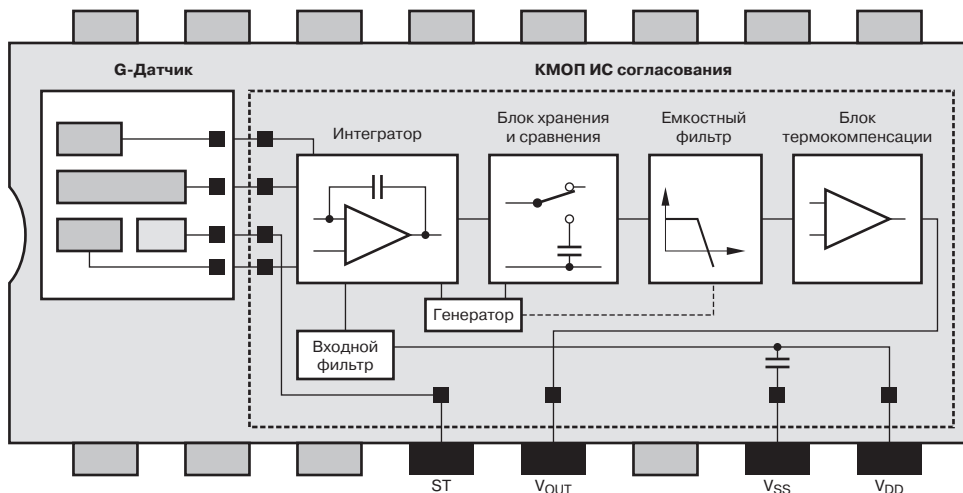
$$\Delta u_c = \frac{I \times t_{\text{И}}}{C},$$

где  $I$  — ток через конденсатор,  
 $t_{\text{И}}$  — длительность импульса.

В связи с тем что сдвиг центральной пластины очень мал, очень мало и изменение емкости (порядка фемтофарад, то есть  $10^{-15}$  Ф). Поэтому измерять лучше разность между емкостями двух конденсаторов. Метод, который при этом применяется, состоит в измерении и фиксации напряжения на одном из конденсаторов, переключении импульсного источника на другой конденсатор, получении разности выходных сигналов и последующем ее усилении. Усилитель может быть смонтирован на том же кристалле, что и датчик, или на другом кристалле в том же корпусе, и, наконец, он может представлять собой отдельную микросхему, выбранную пользователем.

Емкостный датчик преобразует ускорения, направленные вдоль определенных осей, в совокупность электрических сигналов. Датчики могут иметь одну или несколько осей чувствительности. Схемы управления микроэлектронными датчиками ускорения часто разрабатываются на базе КМОП-технологии и содержат блоки переключения конденсаторов, динамической фильтрации, операционный усилитель (ОУ), цифровую логику и ППЗУ, хранящее данные калибровки, осуществляемой при изготовлении датчика. Функциональная блок-схема для датчика с одной осью чувствительности представлена на **Рис. 1.7**.

В зависимости от применения микросхема может изменять чувствительность датчика, обеспечивать температурную компенсацию и функцию самопроверки. Поскольку и датчик, и блок согласования чувствительны к изменениям температуры, необходима компенсация, чтобы скорректировать выходное напряжение. Самопроверка — функция, которая позволяет проверить нормальное функционирование датчика ускорения. При самопроверке к датчику прикладывается небольшое напряжение, наводящее электростатический заряд, который вынуждает пластину конденсатора смещаться. Это движение приводит к изменению в



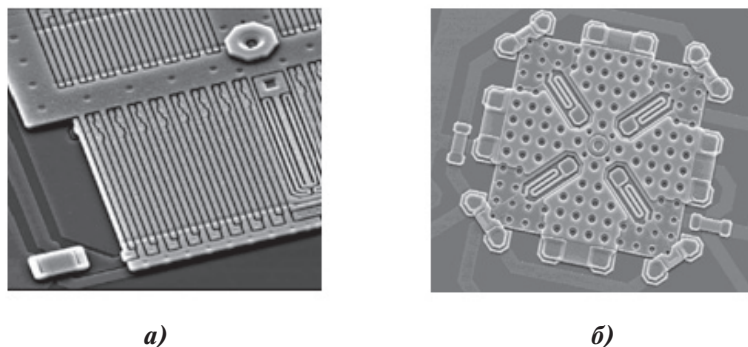
**Рис. 1.7.** Блок-схема одноосевого датчика ускорения.

выходном напряжении, которое должно иметь ожидаемое значение.

В течение последнего десятилетия продолжалось развитие датчиков ускорения: размеры уменьшались при одновременном усложнении структуры, что позволило увеличить их функциональную гибкость. Одной из основных задач было увеличение числа осей чувствительности прибора, заключенного в одном корпусе. Дело в том, что для одного из важнейших применений — защиты жестких дисков в приборах портативной электроники при падении — необходимо было измерять проекции вектора ускорения по всем трем осям. Такой прибор появился не сразу, сначала были разработаны двухосевые датчики ускорения, внутренняя конструкция которых приведена на **Рис. 1.8а**. Труднее всего было решить вопрос об измерении ускорения по вертикальной оси при горизонтальной ориентации плоского датчика. Эта проблема была решена за счет применения подвижного элемента «батутной» конструкции (**Рис. 1.8б**).

На **Рис. 1.9** приведена блок-схема трехосевого датчика.

В этой блок-схеме решена еще одна задача, стоявшая перед разработчиками, — дискретное регулирование чувствительности датчика ускорения по всем осям. Если мини-



**Рис. 1.8.** Конструкция датчиков ускорения Freescale Semiconductor:  
 а) конструкция двухосевого датчика (оси X, Y);  
 б) конструкция датчика с осью чувствительности Z.

мальная чувствительность определяется конструкцией чувствительного элемента, то повысить чувствительность в несколько раз можно, увеличив коэффициент усиления ОУ, осуществляющих температурную компенсацию. Этого можно добиться, изменив структуру обратной связи с помощью электронных ключей, что и осуществляется изменением кода на входе g-Select. Например, для датчика MMA7260Q можно выбрать один из четырех пределов измерения 1.5, 2, 4 и 6 g с помощью подачи логических сигналов на два входа, управляющих чувствительностью.

Получаемое при этом изменение диапазона измерений позволяет использовать один и тот же датчик в нескольких областях применения. На **Рис. 1.10** приведен пример изменения диапазона измерений трехосевого датчика MMA7260Q в зависимости от области его применения. Это свойство дает возможность при выполнении алгоритма обнаружения свободного падения выбирать пределы от 1 до 5 g. Если состояние свободного падения не обнаружено, датчик может использоваться для выполнения других задач.

Еще одним направлением развития стало совершенствование конструкции корпуса. Микросхема «поджала под себя ноги», избавившись от традиционных боковых выводов, вынесенных за пределы корпуса. Контакт с печатной платой осуществляется контактными площадками в нижней части датчика (**Рис. 1.11а**).