

Автомобильные акселерометры. Часть 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

Третья часть статьи содержит классификацию автомобильных акселерометров, описывает и анализирует наиболее известные рабочие принципы в контексте их эволюции в составе автомобильных систем, логическим итогом которой сегодня является массовое внедрение элементной базы MEMS-датчиков.

Введение

Поскольку акселерометр измеряет ускорение или силу, вызывающую ускорение инерционной массы, физическая модель акселерометра представляет собой инерционную (сейсмическую) массу, подвешенную на пружине, закрепленной в неподвижном корпусе, — простую систему с одной степенью свободы x в направлении измерительной оси (рис. 13). Инерционная масса приобретает ускорение под действием ускоряющей силы (равнодействующей силы инерции при воздействии ускорения), пропорциональной массе m и ускорению a :

$$F = ma. \quad (2)$$

Сила упругости (жесткости) пружины в этой модели уравновешивает (демпфирует) перемещение инерционной массы m относительно корпуса:

$$F = kx, \quad (3)$$

где k — жесткость пружины, x — перемещение массы m относительно исходной точки.

Из (2) и (3) следует, что

$$a = x(k/m), \quad (4)$$

где k/m — конструктивный параметр датчика.

В соответствии с данной моделью в основе классификации акселерометров лежит различие в способах получения электрического сигнала при детектировании движения инерционной массы (рабочих принципах датчиков).

Акселерометры типа ball-in-tube

В эволюции акселерометров значительную роль сыграли датчики линейного ускорения *электромеханического типа*, рассчитанные преимущественно на работу в составе систем управления надувными подушками безопасности автомобилей (обнаруживающие замедление транспортного средства) — с металлическим шаром в качестве инерционной массы, перемещающимся в трубчатой полости (ball-in-tube sensor) (рис. 14) [33–43].

Наибольшую известность получили электромеханические акселерометры двух типов:

- с шаром и смещающим магнитом, локализованным на одном конце трубчатой по-

лости: при значительном замедлении шар катится вперед, преодолевая удерживающее его магнитное поле, и замыкает электрические контакты на другом конце полости, активируя схему датчика [36, 40]

- с шаром и смещающим пружинным контактным элементом, который при значительном замедлении замыкает второй контакт, толкаемый шаром, по инерции продолжающим двигаться вперед, преодолевая смещение [38, 40].

В более ранних конструкциях смещающее усилие на линейный поршень с инерционной массой создавалось кольцевой пружиной [33–35]. Другой распространенный вариант (в том числе и для детектирования ускорений при боковых ударах) предполагает использование груза, активирующего рычаг или ротор, преодолевающего сопротивление пружины на пути к точке, где контакты замыкают схему [37, 43].

Для демпфирования инерционной массы в датчиках электромеханического типа применяется жидкость или газ.

Типичной проблемой, ассоциирующейся с контактными датчиками, смещаемыми магнитом, являются сбои, которые происходят вследствие различной электрохимической активности используемых материалов и покрытий¹, коррозии, вредного воздействия атмосферы и загрязнений.

Общая проблема электромеханических датчиков — значительные геометрические размеры, а также невысокая технологичность довольно сложных конструкций и относительно высокая цена. Так, в контактных устройствах, смещаемых магнитом, смещающее усилие должно быть значительным, а магнитное поле — сильным, соответственно,

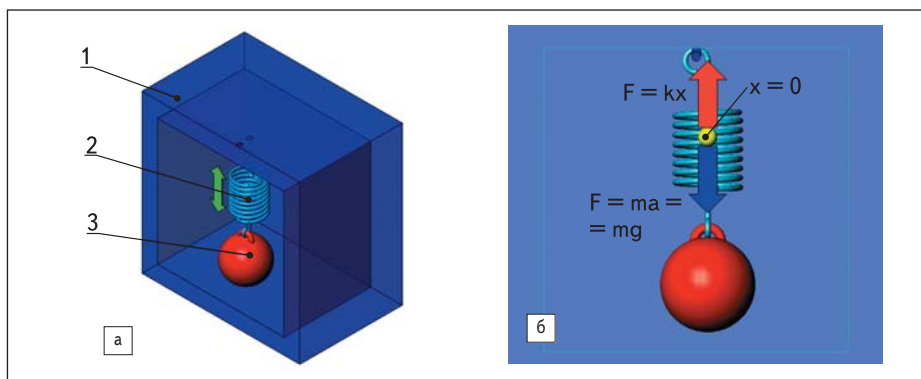


Рис. 13. Иллюстрация физической модели акселерометра:
а — конструкция физической модели: 1 — неподвижный корпус; 2 — пружина, закрепленная в корпусе; 3 — груз, подвешенный на пружине, — инерционная масса; б — силы, действующие в модели

¹ Шар изготавливается из проводящего материала и покрывается позолотой для обеспечения надежного электрического контакта. Для акселерометров, смещаемых магнитом, используется материал шара с высокой магнитной проницаемостью. Контакты, основным требованием к которым является гибкость, изготавливаются из таких материалов, как медь и сталь, а также их сплавы.

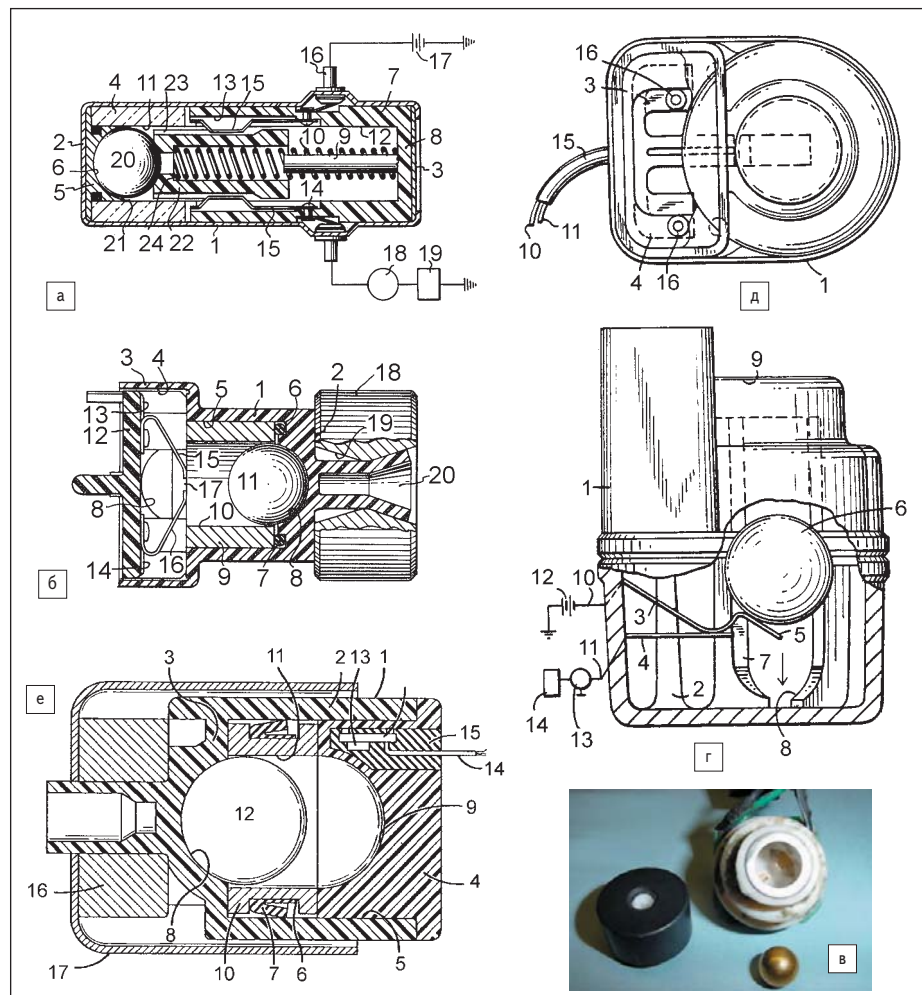


Рис. 14. Типичные конструкции электромеханических и электронных акселерометров с шаром в качестве инерционной массы (ball-in-tube):

- а — акселерометр с цилиндром и шаром — поршнем [33]: 1 — металлический корпус; 2 — замкнутая стенка; 3 — диск; 4 — непроводящий цилиндр; 5 — внутренняя часть корпуса под посадочное полусферическое место б; 7 — непроводящий цилиндр; 8 — стенка, примыкающая к диску 3, объединенная с направляющей осью 9; 10 — смещающая пружина; 11, 12 — отверстия в цилиндрах; 13 — впадина под контакты; 14 — проводящие фиксаторы; 15 — контакты; 16 — терминалы, изолированные от корпуса 1; 17 — батарея; 18 — активирующее устройство; 19 — система защиты пассажиров; 20 — поршень; 21 — зазор; 22 — трубка с внешней бороздкой 23; 24 — плечо;
- б — акселерометр с шаром, смещающим магнитом и контактами (внешний металлический корпус, крепление и проводные выводы не показаны) [36]: 1 — цилиндр; 2 — стенка, примыкающая к цилиндру 1; 3 — расширенная часть цилиндра; 4 — внутренний цилиндр; 5 — внутренняя полость; 6 — посадочное место под уплотнительное кольцо 7; 8 — полусферические посадочные места; 9 — металлический рукав; 10 — внутренняя линейная трубчатая полость; 11 — сферическая инерционная масса; 12 — электрический разъем; 13, 14 — контактные площадки; 15, 16 — контакты с зазором 17; 18 — кольцевой магнит; 19, 20 — крепежные отверстия;
- в — внешний вид контактного акселерометра с шаром, смещаемым магнитом (иллюстрация из [43]);
- г, д — пружинный акселерометр с шаром Breed Automotive Corporation (направление движения инерционной массы показано стрелкой) [38]: 1 — трубка — корпус; 2 — цилиндрическая боковая стенка трубки 1; 3, 4 — контакты; 5 — расширение контакта 3; 6 — сферический инерционный элемент (шар); 7, 8 — ребра, ограничивающие движение шара; 9 — верхняя стенка корпуса акселерометра; 10, 11 — проводные соединители; 12 — питающая батарея; 13 — активирующий механизм воздушной подушки; 14 — воздушная подушка; 15 — кабель; 16 — фиксаторы корпуса;
- е — акселерометр с шаром, смещающим магнитом и датчиком магнитного поля [42]: 1 — корпус; 2 — цилиндрическая часть корпуса; 3 — стенка, примыкающая к цилиндру 2; 4 — электрический разъем; 5 — отверстие в цилиндрической части корпуса; 6 — посадочное место под уплотнение 7; 8, 9 — полусферические посадочные места; 10 — рукав; 11 — внутренняя линейная трубчатая полость; 12 — сферическая инерционная масса; 13 — датчик магнитного поля; 14 — проводные выводы; 15 — материал, изолирующий печатную плату; 16 — магнит; 17 — магнитопровод

и магнит должен быть относительно крупным и сильным.

Устройства на основе смещающих пружинных контактов, подобные [38], позволяют исключить магнит из конструкции, одновременно устраняя необходимость дорогостоящего золотого покрытия инерционного элемента из проводящего материала. При этом пружин-

ный элемент может служить и элементом электрического контактирования, сокращая тем самым число физических элементов, осуществляющих контакт.

Электромеханические датчики контактного типа были широко распространены в автомобилях, чье время выпуска соотносится с датой публикации патентов [33–40], и за-

тем эволюционировали в бесконтактные конструкции [39, 41, 42] с датчиком магнитного поля, детектирующим перемещение смещенного шара [42] или постоянного магнита [41], который также может служить инерционной массой. Типичный датчик магнитного поля в бесконтактных конструкциях представляет собой датчик Виганда [39], Холла или магниторезистор [41, 42] (включая ГМР [42]).

В отличие от электромеханических переключателей датчик магнитного поля может вырабатывать как переключаемый при переходе сигнала уровней выше или ниже определенного порога цифровой сигнал [35], так и аналоговый сигнал, который может анализироваться внешней электронной схемой, извлекающей информацию об ударе из величины, наклона и длительности сигнала [37, 38].

Как известно из многих источников, системы управления подушками безопасности подразделяются на одноточечные (single-point system), с местоположением акселерометра (и других датчиков) в одном месте внутри диагностического модуля близ пассажирских мест, и многоточечные, или мультисенсорные, системы с дистанционным расположением нескольких датчиков (multi-point system). Современные автомобильные системы стремятся к одноточечным исполнениям, отличающимся низкой системной ценой и возможностью детектирования с наибольшей точностью ускорений, действующих на пассажиров. Поскольку одноточечная система удалена от места удара, акселерометр в ней должен заранее «предсказывать» столкновение и в случае удара активировать системы защиты в различное время: вначале — системы ограничения перемещений (ремни), затем — систему разворачивания подушек, или деактивировать при незначительном ударе.

Данные функции вполне позволяют реализовать именно одноточечный аналоговый или ШИМ-акселерометр, в то время как в мультисенсорной системе для решения тех же задач может потребоваться до пяти цифровых (контактных или бесконтактных) датчиков.

Следует также отметить, что электронные датчики типа ball-in-tube отличаются относительно низкочастотной рабочей характеристикой, исключающей необходимость фильтрации сигнала (в отличие от актуальных базовых типов современных акселерометров, рассмотренных далее, — пьезоэлектрических, пьезорезистивных и емкостных).

Акселерометры типа ball-in-tube широко использовались в иностранных автомобилях прошлых лет, но в настоящее время основная ниша их спроса — детектирование аварий — заполнена малыми и недорогими емкостными акселерометрами.

Популярные за рубежом акселерометры ball-in-tube практически не находили применения в отечественной автоэлектронике, для разработчиков которой особенно важно знание актуальных тенденций и понимание перспективных рабочих принципов.

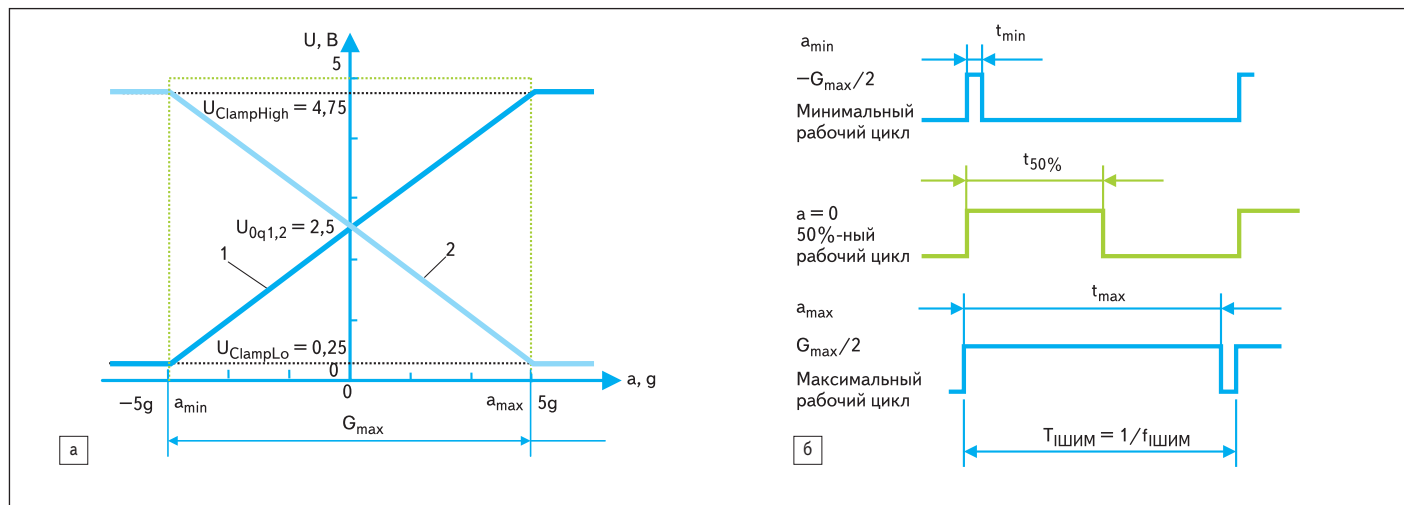


Рис. 15. Типичные передаточные характеристики акселерометра:

а — аналоговая (линейная) выходная характеристика:

a, g — детектируемое ускорение; a_{\min}, a_{\max} — амплитудные значения колебаний ускорения; $G_{\max} = a_{\min} + a_{\max}$ — максимальный диапазон; U — выходное напряжение; $U_{\text{ClampHigh}}, U_{\text{ClampLow}}$ — ограничивающие уровни; U_{0q} — среднеквадратическое напряжение;

б — ШИМ-выходная характеристика:

a — детектируемое ускорение; a_{\min}, a_{\max} — амплитудные значения колебаний ускорения; G_{\max} — максимальный диапазон;

$t_{\min}, t_{50\%}, t_{\max}$ — длительности импульсов (t_{\min} — минимальная длительность при минимальном ускорении, $t_{50\%}$ — длительность импульса, соответствующая 50%-ному рабочему циклу при нулевом ускорении, t_{\max} — максимальная длительность при максимальном ускорении);

$T_{\text{ШИМ}}$ и $f_{\text{ШИМ}}$ — постоянные значения периода и частоты ШИМ-сигнала, соответственно

Другими словами, в XXI веке, когда стало возможным осуществлять микроперемещение миниатюрного шарика инерционной массы внутри интегральной схемы, уже не стоит тратить время и деньги на разработку новых изделий для автоэлектроники с инерционным макроэлементом в виде подвижного шара или магнита.

Современные акселерометры

Как уже упоминалось, сегодня наиболее актуальны три категории акселерометров:

- пьезоэлектрические;
- пьезорезистивные;
- емкостные.

Пьезоэлектрические акселерометры — класс автомобильных устройств, наиболее популярный в недалеком прошлом, актуальный и сегодня. Емкостные датчики — наиболее массовая категория среди современных автомобильных MEMS-устройств. Еще одним актуальным примером является уникальная технология тепловых MEMS-акселерометров MEMSIC.

Некоторые другие технологии тоже могут эффективно использоваться для производства акселерометров, например магнетостриктивные или эффекта Холла.

Акселерометры также классифицируются по величине (диапазону) измеряемого ими ускорения, что является решающим фактором при выборе подходящего датчика для конкретной задачи. Выделяются акселерометры для измерения малых ускорений $\pm(1 \dots 20)g$ (Low-g) и High-g, детектирующие ускорения $\pm(20 \dots 250)g$ и выше. Другие классификационные признаки включают число

измерительных осей, тип выхода, частотную полосу и т. д.

Основные рабочие характеристики акселерометров

Согласно физической модели (рис. 13) функциональное назначение акселерометра и линейность предполагают получение линейной передаточной характеристики — зависимости выходного напряжения от детектируемого ускорения преимущественно в аналоговом или ШИМ-формате (рис. 15).

В соответствии с данным определением основными рабочими характеристиками акселерометров принимаются:

- максимально детектируемый диапазон ускорений a (полная шкала) G_{\max} , равный пиковому размаху детектируемых амплитудных значений a_{\max} и a_{\min} ;
- динамический диапазон амплитуды — отношение максимального диапазона измерений к шумам (SNR — signal to noise ratio);
- чувствительность (фактор масштаба) — изменение выходного сигнала, например аналогового напряжения, за единицу изменения в ускорении:

$$S = \Delta U / \Delta a, \text{ мВ/г}, \quad (5)$$

- среднеквадратическое напряжение U_{0q} — среднее из ограничительных уровней выходного сигнала $U_{\text{ClampLow}}, U_{\text{ClampHigh}}$ (аналогично определяется среднеквадратический рабочий цикл);
- смещение нуля — отклонение по оси выходного сигнала (U), соответствующее ну-

левому значению ускорения ($0g$) (для акселерометров тождественно U_{0q});

- дрейф чувствительности — вариации чувствительности, не являющиеся функцией измеренной переменной, например в зависимости от температуры T , отличной от комнатной температуры (температурный дрейф):

$$\Delta S_{(\Delta T)} = \frac{S(T) - S(25^\circ)}{S(25^\circ)} \times 100\%, \quad (6)$$

или во времени — в результате воздействия других факторов.

- дрейф смещения — отклонение среднеквадратического напряжения U_{0q} от теоретического значения в полном диапазоне, например вследствие влияния температуры T по сравнению с температурой в 25°C :

$$\Delta U_{0q(\Delta T)} = U_{0q(T)} - U_{0q(25^\circ\text{C})}, \quad (7)$$

- нелинейность — максимальное отклонение выхода от идеально прямой линии графика ускорения в зависимости от выхода, выраженное в процентах от полной шкалы

$$L^+ = \frac{U_{\text{ClampHigh}} - U_{0q}}{2 \times (0,75 U_{\text{ClampHigh}} - U_{0q})} \times 100\%,$$

$$L^- = \frac{U_{\text{ClampLow}} - U_{0q}}{2 \times (0,75 U_{\text{ClampLow}} - U_{0q})} \times 100\%, \quad (8)$$

- рабочий частотный диапазон f ;
- резонансная частота f_0 или ω ;

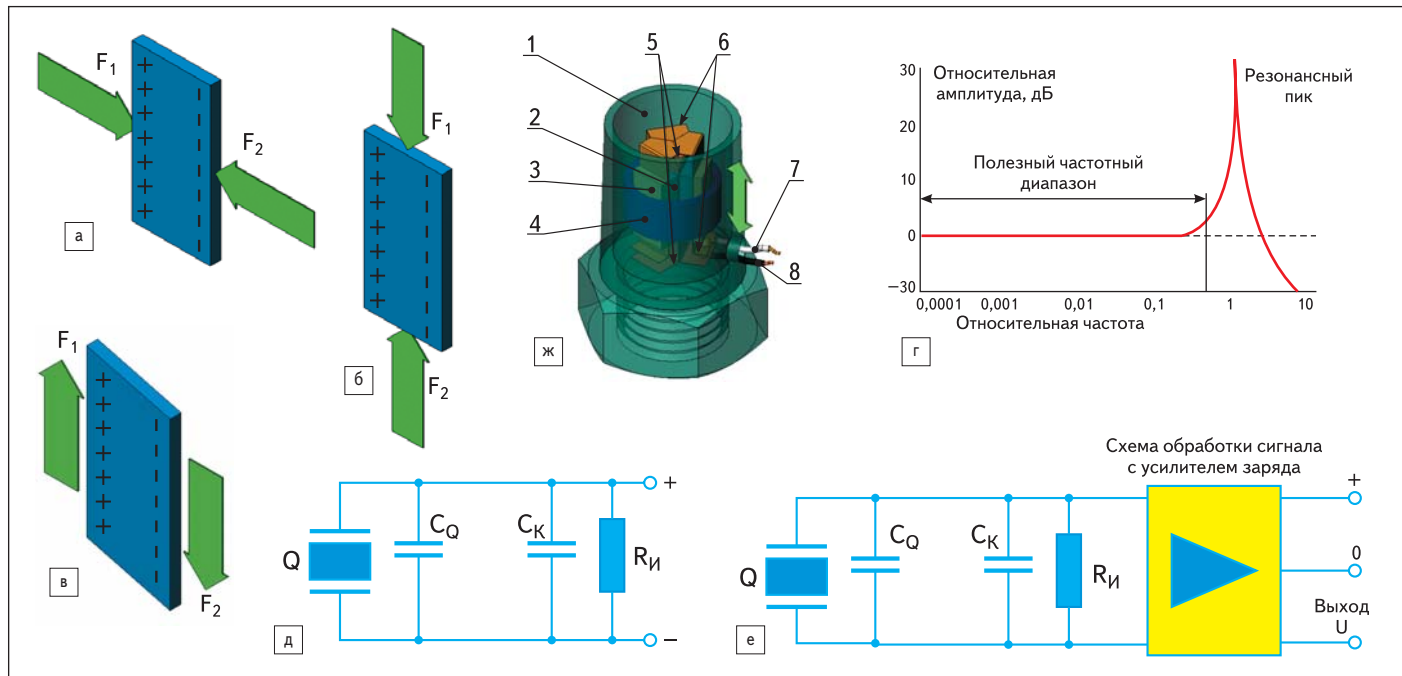


Рис. 16. Иллюстрации физических принципов пьезоэлектрических акселерометров:

а–в — иллюстрации зависимости поляризации пьезоэлемента от направления действующей силы F :

а — продольная поляризация; F_1, F_2 — поперечные воздействующие силы;

б — поперечная поляризация; F_1, F_2 — вертикальные силы;

в — поляризация при сдвиге; F_1, F_2 — силы сдвига одной поляризуемой поверхности пьезоэлемента относительно другой;

г — типичная рабочая частотная характеристика пьезоэлектрического акселерометра (иллюстрация из [1]);

д — эквивалентная схема пьезоэлектрического акселерометра с высоким импедансом;

е — схема устройства с низким импедансом: Q — пьезоэлектрический (кварцевый) элемент; C_Q — емкость ПЭ-элемента; C_K — емкость соединений и кабеля;

$R_{И}$ — сопротивление изоляции (выходное); U — выходное напряжение;

ж — акселерометр, работающий на сдвиг: 1 — корпус датчика (верхняя часть условно не показана); 2 — пьезоэлектрические элементы; 3 — инерционная масса; 4 — компрессионное кольцо; 5, 6 — физически изолированные электроды для снятия положительного и отрицательного заряда, соответственно; 7, 8 — условное изображение проводных выводов зарядового сигнала

- разрешение — самый малый уровень g , который способен измерить акселерометр (преимущественно определяемый шумами и рабочей шириной полосы частот);
- шум² (шумовая плотность или пиковый размах амплитуды шумов);
- число измерительных осей;
- поперечная осевая чувствительность — процентное выражение поперечного ускорения (или действующего под углом 90°), отображаемого на выходе акселерометра (у идеального акселерометра поперечная чувствительность равна нулю);
- масса (малая в сравнении с детектируемой системой);
- рабочий температурный диапазон T ; а также другие характеристики, например:
- чувствительность к акустическим шумам;
- коэффициент демпфирования (затухания колебаний).

Пьезоэлектрические акселерометры

Принцип работы датчиков основан на прямом³ пьезоэлектрическом эффекте: когда пьезоэлектрический кварцевый кристалл или поляризованный пьезокерамический образец (далее — пьезоэлемент) подвергается действию внешней силы F , вследствие смещения кристаллической решетки на противополож-

ных поверхностях материала аккумулируется электрический заряд, прямо пропорциональный величине приложенного воздействия [44–59].

Пьезоэлектрические датчики используются для измерения силы, давления, деформации (механического напряжения) и ускорения.

Пьезоэлектрический эффект линейный, но направление поляризации пьезоэлемента зависит от направления действующей силы. Различают продольные, поперечные и работающие на сдвиг пьезоэлектрические элементы (рис. 16а–в).

В зависимости от конструкции и назначения датчика, оптимизированного и откалиброванного таким образом, чтобы получить при данном детектируемом воздействии максимальный заряд — выходной сигнал, сила F выполняет сжатие (растяжение), сдвиг или изгиб пьезоэлемента [1, 44–59].

Типичная зарядовая чувствительность пьезоэлектрического акселерометра варьируется в диапазоне 0,5–1000 pC/g.

Природные кристаллы кварца являются одним из наилучших материалов для пьезоэлектрических сенсорных элементов. Кварц обладает способностью работы при температурах выше 300°C , однородной чувствительностью в температурном диапазоне, высокой прочностью, линейностью эффекта, отсутствием гистерезиса при воздействиях различного рода, высоким выходным сопротивлением порядка 10^{14} Ом, допускающим работу при частотах менее 1 Гц (поясняется далее) [44].

Кварцевые пьезоэлектрические (ПЭ) элементы представляют собой одиночные пластины или конфигурации, набранные из тонких пластин, соединенных в стеки.

Недорогой альтернативой кварцу являются пьезокерамические сенсорные элементы, которые производят компании, владеющие технологиями и специализированным оборудованием⁴.

Пьезоэлектрический акселерометр является несколько иной физической интерпретацией модели датчика, показанной на рис. 13.

² Шум измерения включает фоновый шум и шум, создаваемый датчиком.

³ Прямым пьезоэлектрическим эффектом называется явление электрической поляризации пьезоэлемента при механическом воздействии; пьезоэлемент вырабатывает электрический заряд, пропорциональный инерционной силе.

Обратный пьезоэлектрический эффект состоит в деформировании материалов, помещенных в электрическое поле.

⁴ В рамках данной статьи пьезокерамические материалы подробно не рассматриваются.

Среди других материалов, пригодных для создания пьезоэлектрических элементов, выделяются пьезоэлектрические полимерные пленки. Известны пленочные полимерные пьезоэлектрические акселерометры на их основе. Устройства данного типа недорогие, но их коммерциализация (включая области задач автоэлектроники) ограничена серьезными недостатками — низкой точностью, значительным разбросом характеристик, высокой чувствительностью к изменению температуры и давления.

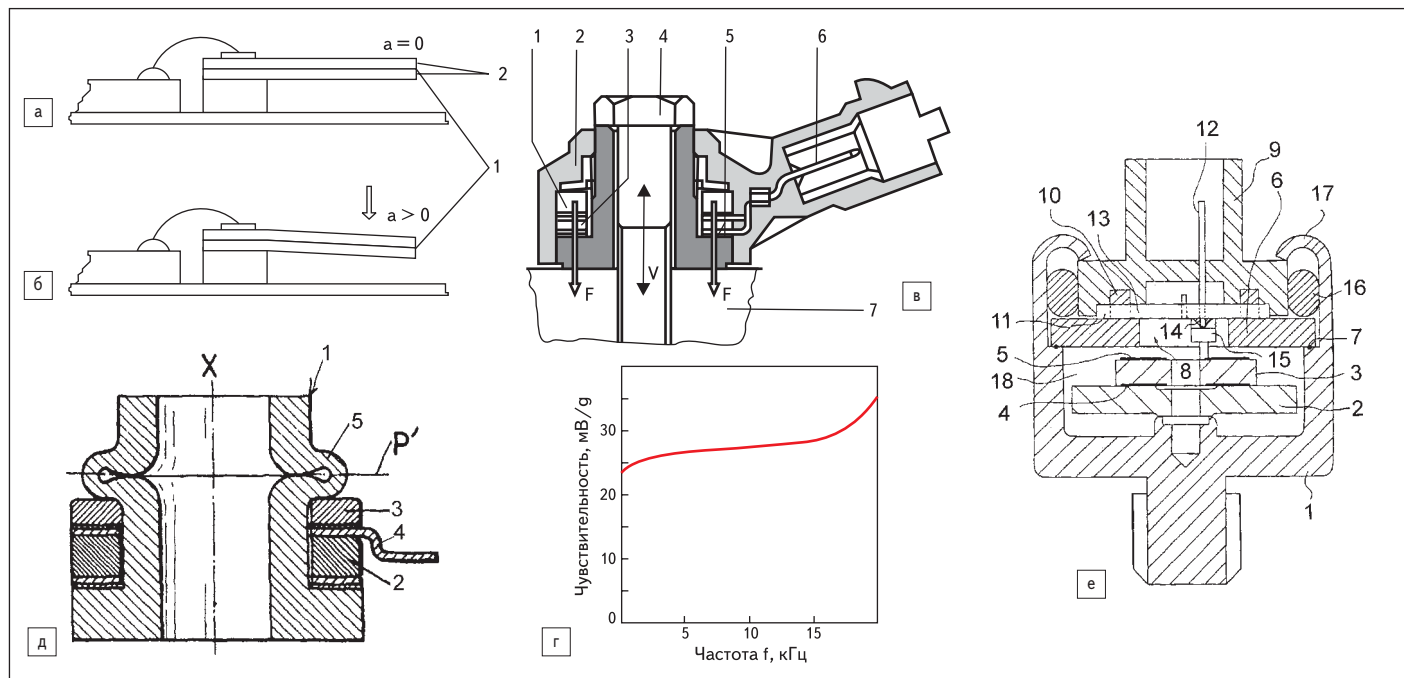


Рис. 17. Примеры пьезоэлектрических акселерометров для автоэлектроники:

а, б — принцип работы биморфного пьезоэлектрического датчика, работающего на изгиб (концепция Bosch для аварийных натяжителей ремней и датчика неровности дороги [49]):

а — в состоянии покоя;

б — под действием ускорения: 1 — пьезокерамический биморфный упругий элемент, работающий на изгиб («measuring beam»);

2 — слои с антипараллельным (противоположным) направлением поляризации; а — ускорение;

в, г — пьезоэлектрический датчик вибрации двигателя Bosch — пример продольного акселерометра [49]:

в — конструкция датчика: 1 — инерционная масса, создающая силу сжатия F ; 2 — корпус; 3 — пьезокерамический элемент; 4 — резьбовая основа; 5 — контакт (электрод);

б — контакт (электрический разъем); 7 — блок двигателя; V — вибрация;

г — рабочая характеристика датчика (чувствительность) как функция частоты f ;

д — датчик детонации Siemens Automotive [51]: 1 — цилиндрический корпус; 2 — пьезоэлектрический материал; 3 — инерционная масса; 4 — электроды; 5 — радиальная выпуклость;

X — ось перемещения сейсмической массы; P' — плоскость, положение которой в данном устройстве регулируется;

е — датчик Matsushita [52, 54, 56]: 1 — цилиндрический корпус датчика; 2 — колебательная пластина — подложка (плата); 3 — пьезоэлектрический (керамический) элемент; 4, 5 — электроды;

6 — металлическое основание; 7 — периферийные точки металлического основания; 8 — центральное отверстие металлического основания; 9 — верхняя часть корпуса датчика;

10 — соединительные терминалы для соединения металлического основания и верхней части; 11 — цилиндрический воздушный зазор; 12 — электрические терминалы датчика;

13 — печатная плата датчика; 14 — медный участок платы; 15 — контактирующая часть (стержень); 16 — упругое кольцо; 17 — обжимка корпуса датчика (часть корпуса 1)

ПЕ-датчики представляют собой активные устройства, что подразумевает получение электрического выхода только при значительном изменении нагрузки — переменного ускорения (динамический режим работы). Это означает следующее: в отличие от датчика, модель которого показана на рис. 13, ПЕ-акселерометры не могут измерять статическое или так называемое DC-ускорение (включая возникающие под действием гравитационных сил), но в паре с формователями сигнала кварцевые преобразователи способны выполнять квазистатические измерения⁵ [44]. Типичное значение нижней частоты среза ПЕ-акселерометра — 1–2 Гц.

В ПЕ-акселерометре ускоренная инерционная масса прикладывает силу $F = ma$ к пьезоэлектрическому элементу (кварцевому кристаллическому или биморфному⁶ упругому элементу), вызывая его деформацию, которая обеспечивает достаточный динамический сигнал (рис. 16). Поверхностный зарядовый сигнал, прямо пропорциональный силе F ,

снимается с электродов и усиливается усилителем заряда.

Пьезоэлемент затем выполняет функции пружины с жесткостью k , связанной с сейсмической массой m ((2) и (3)).

Пьезоэлектрические акселерометры способны выполнять динамические измерения ускорений в диапазоне 10^{-4} – 10^4 г и выше, поэтому применение ПЕ-датчиков сконцентрировано в системах автоэлектроники с максимально высокими детектируемыми уровнями g (включая удары и вибрацию): в системах пассивной безопасности автомобиля для управления развертыванием фронтальных и боковых подушек безопасности и функционированием аварийных натяжителей ремней (максимальные детектируемые при авариях уровни ускорений 35–50 г), штанг против опрокидывания (4 г), электронного оснащения крэш-тестов, контроля детонации (до 400 г).

Полезный верхний частотный предел определяется резонансной частотой датчика, находящейся в килогерцевом диапазоне.

В зависимости от рабочей частотной области различают ПЕ-акселерометры нерезонансного типа (функционирующие в пределах плоского участка кривой, показанной

на рис. 16г) и резонансного типа (рабочий участок частотной характеристики находится в диапазоне эффективных частот, близких к резонансной частоте; детектируется изменение в резонансной частоте под действием ускорения).

Большинство ПЕ-акселерометров представляет собой устройства нерезонансного типа, рабочая частотная полоса которых ограничивается сверху резонансной частотой ω , в модели слабодемпфируемой системы с одной степенью свободы x , определяемой из выражения:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (9)$$

Как правило, чувствительность и резонансная частота зависят от массы акселерометра. Большая инерционная масса будет увеличивать чувствительность акселерометра, но, как видно из (9), это снижает резонансную частоту.

Схемотехника ПЕ-акселерометров

С точки зрения схемотехники, существует два основных вида пьезоэлектрических акселерометров [1, 44–46]:

⁵ Изменения нагрузки происходят в течение промежутков времени порядка нескольких минут или часов.

⁶ Двухслойные пьезокерамические элементы, способные выполнять функции компонента или узла.

- с низким импедансом — датчики со встроенным усилителем зарядового сигнала или преобразователем «заряд — напряжение» и схемой обработки (ИЕРЕ — integral electronic piezoelectric), которая может включать этапы усиления, фильтрации и самодиагностики;
- устройства с высокоимпедансным зарядовым выходным сигналом (Charge-output devices) на основе только одного пьезоэлемента.

Схемы, иллюстрирующие работу этих устройств, приведены на рис. 16д–е. Другие примеры и детали по их реализации можно найти в [1, 44–58].

Практически важной характеристикой ПЕ-элемента является его собственная емкость (между электродами), влияющая на чувствительность ПЕ-акселерометра.

Для работы акселерометра с высоким импедансом необходима внешняя схема (преобразователь импеданса или усилитель заряда, создающий полезное выходное напряжение через конденсатор цепи); для работы акселерометра с низким импедансом требуется внешний блок питания электронной схемы.

В практическом использовании усилителей заряда (с входной ступенью с высоким входным сопротивлением — например, на основе полевого транзистора) двумя из наиболее важных понятий являются постоянная времени, определяющая частотный диапазон устройства, и дрейф (нежелательное изменение выходного сигнала во времени, не являющееся функцией измеряемой переменной).

ПЕ-акселерометры с низким полным сопротивлением (порядка 100 Ом) совместимы с большим числом электронных устройств и приспособлены к решению конкретных задач с определенными измеряемыми частотами (но в достаточно широком диапазоне) и температурными диапазонами до 120 °С, за пределами которых их использование ограничено. Такое ограничение, напротив, снимается в системах на основе сенсорного устройства с высоким импедансом, где частотный диапазон (постоянная времени), усиление, нормализация входного сигнала для получения желаемой чувствительности и амплитудного диапазона калибруются в пределах полной шкалы посредством схемы с внешним усилителем заряда. При отсутствии встроенной электроники данные устройства поддерживают наибольший рабочий температурный диапазон.

Для датчиков с высоким импедансом необходимо обеспечивать высокое сопротивление изоляции, которое может снижаться в средах с высокой влажностью или загрязнениями, поэтому специальные требования уплотнения распространяются на кабели. Датчики с зарядовым выходным сигналом чувствительны к окружающим и кабельным помехам и шумам, поэтому внешнюю электронику, питаемую от того же блока питания,

что и ИЕРЕ-датчикив, необходимо располагать перед этапом передачи сигнала к считывающему устройству, используя те же малозащитные кабели для снижения трибоэлектрических шумов, наведенных вибрацией. Датчики с низким импедансом могут подключаться и посредством двухпроводного или коаксиального кабеля общего назначения, причем допустимы большие кабельные длины.

Конфигурации ПЕ-акселерометров

Три наиболее распространенных типа конфигураций ПЕ-акселерометров — сдвиг, изгиб и сжатие — описаны в [1, 44–58] (включая другие варианты) и проиллюстрированы на рис. 16–17.

В датчиках силы и ускорения широко используется конфигурация «сдвиг» (рис. 16ж), в которой за счет изоляции кристаллов от основания корпуса устраняется влияние перепадов температур и механического напряжения на корпусе; диапазон работы расширяется в высокочастотную область, эффекты нагружения массы акселерометра на тестируемую структуру, как правило, незначительны.

Конфигурация, показанная на рис. 16ж, является одноосевой. Посредством ортогонального размещения сдвиговых элементов могут быть получены сдвиговые конфигурации и с большим числом чувствительных направлений. Один из сдвиговых акселерометров с возможностью его трехосевого исполнения запатентован Bruel & Kjaer [48].

Акселерометры, работающие на изгиб (как правило, на основе двухслойной пьезокерамики), обеспечивают высокоамплитудный сигнал и могут использоваться для измерения низкочастотных ускорений, в том числе и низкочастотных гравитационных [49, 50]. Например, акселерометры данного типа выпускаются Bosch для систем автоэлектроники — управления аварийными подушками безопасности и натяжителями ремней (детектируемый диапазон ускорений 35–50 г, верхний предел по частоте порядка 250–350 Гц), детектирования низкочастотных ускорений при отслеживании неровностей дороги с целью диагностики сбоев двигателя (уровень ускорений порядка 5 г, верхний предел по частоте порядка 50 Гц) (см. рис. 17а–б; внешний вид устройств показан на рис. 2а и 10а).

Акселерометры, работающие на изгиб, допускают высокую степень нечувствительности к отклонению движения массы от вертикального — до 15°. (Датчик может измерять вертикальное или горизонтальное ускорение в зависимости от условий его монтажа; обычно предполагается вертикальный монтаж.) Следует отметить, что данные акселерометры предполагают получение относительно худших показателей прочности и долговечности по сравнению с другими конфигурациями датчиков.

Компрессионные акселерометры на основе конфигурации «сжатие» (рис. 17в–д) представляют собой наиболее простые, технологичные структуры с высокой прочностью и износоустойчивостью [1, 49, 51]. Акселерометры этого типа способны противостоять ударам с высокими уровнями g, но из-за близкого контакта считывающих кристаллов с основанием чувствительны к механическому напряжению на корпусе. Также очевидно, что наиболее эффективный способ повышения чувствительности компрессионного акселерометра — увеличение инерционной массы, но это не всегда желательно.

Продольные (работающие на сжатие) ПЕ-акселерометры широко применяются в качестве датчиков детонации в системах зажигания; с их помощью измеряется акустический вибрационный шум двигателя, по которому обнаруживается нерегулярное горение.

Компрессионные акселерометры эффективно работают на высоких частотах, что практически используется для контроля детонации двигателя. Типичный диапазон ускорений, детектируемый датчиками, составляет 1–400 г в частотном диапазоне 1–20 кГц. На низких частотах в средах с переменной температурой компрессионный акселерометр, напротив, подвержен температурным ошибкам.

Ведущие производители современных автомобильных пьезоэлектрических акселерометров — компании Kistler, Endevco, Bruel & Kjaer, Bosch, PCB Piezotronics, Honeywell и SiemensVDO (некоторые примеры показаны на рис. 1–2, 5 и 10 в предыдущих частях статьи, другие примеры проиллюстрированы на рис. 16–17).

Значительные перспективы ПЕ-акселерометров связаны с упрощением и оптимизацией существующих конструкций (рис. 16–17) с целью повышения их технологичности и снижения цены.

Так, компания Matsushita запатентовала ряд пьезоэлектрических автомобильных акселерометров (нерезонансного и резонансного типа со специальными колебательными режимами), обеспечивающими высокие рабочие характеристики. Многие устройства отличаются низкой ценой, которая обеспечивается за счет возможностей автоматизированного производства [52–56].

Вышеописанные базовые конфигурации допускают размещение встроенной обрабатывающей электроники, обеспечивают в итоге малый размер и вес датчиков (включая устройства, показанные на рис. 16).

Таким образом, достоинствами пьезодатчиков являются:

- способность детектирования высоких уровней g;
- высокий динамический диапазон;
- широкая частотная полоса срабатывания <1 Гц – 20 кГц;
- однородная чувствительность в частотном диапазоне;

- прочность;
- точность;
- малый размер и вес.

Недостатки:

- как упоминалось выше, ПЕ-акселерометры не могут измерять статическое ускорение;
- устройства требуют калибровки (микроконтроллерной обработки);
- схемотехника и конструкции относительно сложные;
- электроника, встраиваемая в корпус датчика, не интегрирована с чувствительным элементом.

Можно предположить, что дальнейшее развитие пьезоэлектрических устройств в значительной степени будет связано с разработкой на их основе перспективных технологических MEMS-решений (один из примеров запатентован [59]), существующих для альтернативных пьезорезистивных и емкостных устройств, обзор которых продолжит статью.

Пьезорезистивные акселерометры

Пьезорезистивный акселерометр для детектирования ускорения использует изгибаемые диффузионные кремниевые резисторы (или измерители механического напряжения, известные как strain gauges, или strain gages), присоединенные к одной или более микромеханическим кремниевым консольным балкам, поддерживающим инерционную массу. Ускорение инерционной массы вызывает изгиб балок и изменяет сопротивление резисторов, создавая разбалансировку моста Уитстона, в схему которого, как правило, включаются измерители напряжения (рис. 18), что, в частности, обеспечивает их реагирование на статическое ускорение [1, 60–66].

Процесс изготовления пьезорезистивной структуры основан на технологиях объемной кремниевой микромеханики (формирование объемной механической микроструктуры), с применением туннелированных проводных соединений и методов тонкопленочной металлизации (формирование контактных площадок и электрической взаимосвязи поверхностей в кристалле). Так же, как и ПЕ-датчики, пьезорезистивные структуры допускают мультиосевые исполнения за счет ортогонального размещения колебательных плоскостей или MEMS-ячеек [60–66]. (Например, на рис. 5 в первой части статьи показан EGE3 Triaх — трехосевой акселерометр Entran.)

Пьезорезистивные акселерометры полностью построены на кремнии; высокая жесткость кремния обеспечивает высокую резонансную частоту ω порядка 10 кГц⁷, определяющую рабочую частотную полосу и динамические характеристики (динамический диапазон). К другим достоинствам дат-

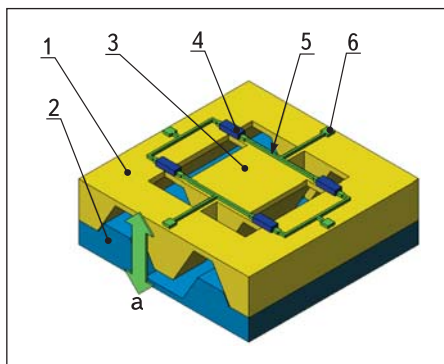


Рис. 18. Типичная пьезорезистивная микромеханическая структура (иллюстрация принципа действия):

- 1 — кремниевая структура с консольными балками, поддерживающими инерционную массу;
- 2 — поддерживающее основание;
- 3 — инерционная масса;
- 4 — изгибаемые кремниевые резисторы (strain gages);
- 5 — электрическое соединение резисторов (схематическое изображение моста Уитстона);
- 6 — терминалы MEMS — структуры (выходы моста)

чиков относятся большие амплитуды сигнала (порядка 50–100 мВ на выходе схемы обработки мостового сигнала), высокая линейность, малый размер и вес.

Как упоминалось выше, в отличие от пьезоэлектрических датчиков, пьезорезистивные акселерометры реагируют и на статические ускорения (пьезорезистивные акселерометры — это пассивные устройства), но чувствительны к ударам и механическим воздействиям (легко разрушаются) и температурно чувствительны.

Рабочий температурный диапазон устройств порядка $-54...+121$ °С.

Технология производства объемных структур разработана для практического создания кремниевых микромеханических пьезорезистивных структур и датчиков на их основе (акселерометров MEMS-типа) [60–66]. Поскольку технологии производства данных структур не вполне совместимы со стандартными поверхностными интегральными технологиями и технологией обработки информации на кремнии — КМОП-схемами, то схемы обработки сигнала пьезорезистивного моста обычно не являются интегрированными с измерительным кремниевым кристаллом [60–65]. Пьезорезистивные датчики могут содержать встроенные схемы, например толстопленочные — для лазерной подгонки чувствительности, температурной компенсации устройства и (или) программирования в EEPROM [61].

Сегодня пьезорезистивные акселерометры в автоэлектронике применяются в основном для краш-тестирования.

Ведущими производителями современных автомобильных пьезорезистивных MEMS-акселерометров являются компании Endevco, Entran, Measurement Specialities (ICSensors), Sensor One Technologies. Широкий спектр автомобильных пьезорезистивных датчиков

давления, функционирующих по аналогичному принципу, выпускается компаниями Fujicura и Lucas NovaSensor — некогда известными разработчиками и производителями акселерометров. (Некоторые примеры показаны на рис. 1 и 5 в первой части цикла.)

Пьезорезистивные датчики — это актуальный сегодня тип MEMS-акселерометров, поскольку они обеспечивают высокие рабочие характеристики. Новые разработки в данной области ориентированы на повышение гибкости технологических процессов (в том числе при интегрировании оценочной схемы) и снижение цены [66].

Заключение

Важно, чтобы современные автомобильные технические специалисты, занятые в сфере разработки и ремонта, хорошо понимали работу систем и подсистем современных автомобилей.

Подводя итоги сказанному в данном разделе, можно заключить, что устройства, созданные на основе рассмотренных рабочих принципов, представляют собой точные и надежные изделия, обеспечивающие в жестких условиях эксплуатации высокие рабочие характеристики. Именно благодаря своим качествам эти решения и смогли занять лидирующие позиции на современном рынке автомобильных датчиков.

Одновременно в последние годы наиболее эффективные решения предлагают MEMS-акселерометры, многие из которых являются емкостными датчиками, выполненными на базе технологий поверхностной микромеханики. Обзор состояния рынка перспективной в автоэлектронике элементной базы MEMS-датчиков становится логическим завершением данной темы и будет предложен вниманию читателей в следующей части настоящей публикации. ■

Литература

33. Gas damped vehicular crash sensor with gas being dominant biasing force on sensor. United States Patent 3,974,350. Оpubл. 10.08.1976 (Breed Corporation).
34. Velocity change sensor and recorder. United States Patent 4,198,864. Оpubл. 22.04.1980 (Breed Corporation).
35. Velocity change sensor. United States Patent 4,284,863. Оpubл. 18.08.1981. (Breed Corporation).
36. Magnetically biased velocity change sensor. United States Patent 4,329,549. Оpubл. 11.05.1982 (Breed Corporation).
37. Passenger compartment sensor requiring substantial velocity change. United States Patent 4,573,706. Оpubл. 4.03.1986 (Breed Corporation).
38. Velocity change sensor with spring bias. United States Patent 5,031,931. Оpubл. 16. 07.1991 (Breed Automotive Corporation).
39. Impact sensor for vehicle safety restraint system. United States Patent 5,177,370. Оpubл. 5.01.1993.

⁷ Частота среза многих коммерческих датчиков составляет порядка 500 Гц на уровне 3 дБ.

40. Gas damped crash sensor. United States Patent 5,237,134. Опубликовано. 17.08.1993 (Breed Automotive Technology, Inc.).
41. Vehicle safety restraint system with linear output impact sensor. United States Patent 5,608,270. Опубликовано. 4.03.1997.
42. Crash sensor with magnetic field sensor. United States Patent 6,282,942. Опубликовано. 4.09.2001 (Breed Automotive Technology, Inc.).
43. Reinhardt K. Air Bags How They Work. AutoInc. Magazine. www.autoinc.org, <http://www.asashop.org/autoinc/dec2001/collision.cfm>
44. The Principles of Piezoelectric Accelerometers // Kulwanoski G., Schnellinger J. Kistler Instrument Corp. Sensors Magazine, Feb 2004. <http://www.sensormag.com/articles/0204/27/main.shtml>
45. Introduction to piezoelectric accelerometers. Sensor Net-Work. <http://www.sensornet-work.com/id28.html>
46. Sensor Net-Work Guidelines for selecting an Accelerometer provided by Kistler. <http://www.sensornet-work.com/id37.html>
47. Two approaches to measure acceleration // Bowling S., Richey R. Microchip Technology Inc, Sensors Magazine, Feb 2000. <http://www.sensormag.com/articles/0200/41/main.shtml>
48. Accelerometer. United States Patent 5,572,081. Опубликовано. 5. 11. 1996 (Bruel & Kjaer).
49. Sensors. Каталог Robert Bosch GmbH.
50. Acceleration sensor and acceleration apparatus using acceleration sensor. United States Patent 6,530,276. Опубликовано. 11.03.2003 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
51. Accelerometer sensor for detecting knocks and method for making same. United States Patent 6,212,940. Опубликовано. 10.04.2001 (Siemens Automotive S.A.).
52. Acceleration sensor. United States Patent 6,622,559. Опубликовано. 23.09.2003 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
53. Acceleration sensor. United States Patent 6,769,305. Опубликовано. 03.08.2004 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
54. Acceleration sensor. United States Patent 6,779,403. Опубликовано. 24.08.2004 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
55. Acceleration sensor. United States Patent 6,817,245. Опубликовано. 16.11.2004 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
56. Acceleration sensor. United States Patent 6,925,878. Опубликовано. 9.08.2005. (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.).
57. Side impact sensors and airbag system. United States Patent 6,685,218. Опубликовано. 3.02.2004 (Automotive Technologies International, Inc.)
58. Electronic device having an acceleration-sensitive sensor. United States Patent 6,308,554. Опубликовано. 30.10.2001 (Robert Bosch GmbH).
59. Micromechanical piezoelectric device. United States Patent 6,953,977. Опубликовано. 11.10.2005 (Boston MicroSystems, Inc.).
60. Accelerometer with central mass in support. United States Patent 5,121,180. Опубликовано. 9.06.1992 (Texas Instruments Inc.).
61. Sensor with programmable temperature compensation. United States Patent 5,241,850. Опубликовано. 7.09.1993 (Texas Instruments Inc.).
62. Accelerometer with strain isolated sensor. United States Patent 5,343,748. Опубликовано. 6.09.1994 (Texas Instruments Inc.).
63. Self-testable micro-accelerometer and method. United States Patent 5,445,006. Опубликовано. 29. 08. 1995 (IC Sensors, Inc.).
64. Piezoresistive force rebalance accelerometer. United States Patent 5,596,144. Опубликовано. 21.01.1997 (Delco Electronics Corporation).
65. Integrated micromechanical sensor device. United States Patent 5,744,719. Опубликовано. 28.04.1998 (Siemens Aktiengesellschaft).
66. Acceleration sensor and method for manufacturing an acceleration sensor. United States Patent 6,883,381. Опубликовано. 26.04.2005 (Infineon Technologies AG).