

Акселерометры компании Meggitt: решения для задач любой сложности

Пол САНДЕРСОН (Paul SANDERSON)
Юрий ПОНОМАРЕВ,
к. т. н.
ponomarev@ranet.ru

Компания Meggitt разрабатывает и производит разнообразные высоконадежные акселерометры для измерения вибраций, ударов и параметров движения. Для удовлетворения различных требований клиентов предлагаются различные типы акселерометров, имеющих индивидуальные точностные, динамические и эксплуатационные характеристики. В статье представлен обзор акселерометров компании Meggitt и их основных особенностей, а также датчиков статического и динамического давления и сопутствующего оборудования.

Пьезоэлектрические акселерометры

Пьезоэлектрические акселерометры широко известны благодаря своей надежности, долговечности, высокому значению среднего времени наработки на отказ и возможности работать в условиях экстремальных температур. Для преобразования высокоимпедансного сигнала заряда акселерометра в низкоимпедансный выходной сигнал напряжения требуется соответствующая электроника, например трехканальный преобразователь сигнала 133 компании Meggitt или серия усилителей 2771С. Линейка пьезоэлектрических акселерометров Meggitt представлена широким набором моделей, отличающихся размерами, характеристиками и конфигурацией, что позволяет выбрать решение для измерения вибраций и ударов на любом объекте, будь то самолет, космический корабль или спутник, и для любых условий эксплуатации, в частности для сверхнизких и сверхвысоких температур или радиационных воздействий.

Пьезоэлектрический акселерометр представляет собой механическую систему с одной степенью свободы, совершающую вынужденные колебания под влиянием силы, действующей со стороны объекта. Чувствительный элемент пьезоакселерометра состоит из массы, прикрепленной посредством пьезоэлектрического элемента к основанию таким образом, что при возникновении вибраций или ударов основания возникает сила реакции массы, вызывающая деформацию пьезоэлемента и генерирующая в нем заряд, пропорциональный величине виброускорения. При этом существуют различные типы конструкции чувствительного элемента, которые позволяют добиться преимуществ в тех или иных областях применения. Например, пьезоакселерометры компрессионного типа (рис. 1), где пьезоэлемент работает на растяжение-сжатие, идеально подходят для измерения малых величин виброускорения, поскольку такая конструкция позволяет получить высокую чувствительность. Конструкция пьезоакселерометров сдвигового типа, где пьезоэлемент работает на сдвиг, дает

возможность получить малые габариты и массу прибора, что позволяет использовать их для измерений на объектах с малой массой и габаритами. Бесспорное преимущество пьезоакселерометров такого типа — возможность максимально развязать чувствительный элемент от основания и тем самым существенно снизить передачу механических напряжений основания на чувствительный элемент и температурные погрешности. Полоса пропускания пьезоакселерометров при помощи электроники может быть подстроена под необходимую полосу частот, что помогает, в частности, избавиться от появления в выходном сигнале колебаний на частотах, соответствующих собственным частотам чувствительного элемента акселерометра.

Другая особенность пьезоэлектрических акселерометров заключается в их применении при чрезвычайно широком диапазоне температур — от криогенных до экстремально высоких, например внутри газотурбинного двигателя (рис. 2). На сегодня линейка пьезоакселерометров компании Meggitt

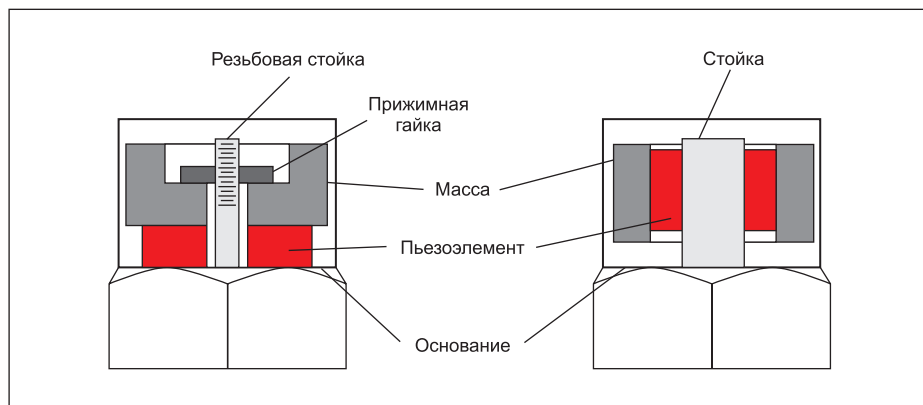


Рис. 1. Варианты конструкций пьезоэлектрических акселерометров: компрессионного типа (слева); сдвигового типа (справа)



Рис. 2. Трехосный высокотемпературный пьезоэлектрический акселерометр (модель 2280) компании Meggitt

содержит широкий спектр моделей различных размеров и формы, от миниатюрных моделей для тестирования мелкой электроники и печатных плат до пьезоакселерометров больших размеров, предназначенных для сейсмических измерений.

Пьезоэлектрические датчики давления и микрофоны

Помимо пьезоэлектрических акселерометров, в линейке продукции компании Meggitt присутствуют датчики динамического давления и микрофоны, построенные по схожему принципу. Линейка пьезоэлектрических датчиков динамического давления разработана таким образом, что позволяет прибору стабильно работать в условиях вибраций и высоких температур с хорошей температурной стабильностью вплоть до +538 °С. Это дает возможность применять датчики в жестких условиях эксплуатации — для проведения измерений в камере сгорания, на испытательных стендах для двигателей, в аэродинамических трубах и двигателях и т. д. Пьезоэлектрические микрофоны предназначены для измерения параметров высокоинтенсивного акустического шума и очень малых флуктуаций давления. Они нечувствительны к изменениям высоты и вибрациям, а их конструкция предусматривает эксплуатацию в широком диапазоне температур.

Пьезоакселерометры со встроенной электроникой (Isotron)

Акселерометры Isotron являются теми же самыми пьезоэлектрическими акселерометрами, но дополнительно оснащенными усилителем заряда для преобразования сигнала заряда акселерометра в низкоимпедансный выходной сигнал напряжения, что избавляет от необходимости применять внешний усилитель. Такое решение снижает остроту про-



Рис. 3. Трехосный сверхминиатюрный пьезоэлектрический акселерометр Isotron со встроенной электроникой (модель 35B) компании Meggitt

блем, связанных с передачей сигнала по кабелю на большие расстояния и зашумлением сигнала, но ограничивает диапазон рабочих температур и делает датчик более чувствительным к электростатическому разряду. Электроника акселерометров Isotron соответствует общепринятым стандартам, что разрешает применять их не только с анализаторами и системами сбора данных, доступными у компании Meggitt, но и с любыми другими.

Несмотря на указанные особенности, пьезоакселерометры со встроенной электроникой очень широко распространены в качестве акселерометров как общего, так и специального назначения в отсутствие экстремальных условий окружающей среды. Линейка акселерометров Isotron компании Meggitt представлена широким модельным рядом решений различного размера и формы, с разной чувствительностью и диапазоном измерения (рис. 3, 4). Ряд разработок компании Meggitt в этой области является уникальным, например, сверхминиатюрные модели с полосой пропускания 30 кГц или сверхчувствительные модели для измерения сейсмических колебаний, или модели с расширенным температурным диапазоном, превышающим принятые промышленные стандарты для акселерометров со встроенной электроникой.



Рис. 4. Малошумящий высокочувствительный пьезоэлектрический акселерометр Isotron со встроенной электроникой (модель 86) компании Meggitt

Пьезорезистивные акселерометры

Пьезорезистивные акселерометры — идеальный вариант для измерения ударов, особенно большой величины. Они очень часто используются при проведении краш-тестов автомобилей, тестов на удары и падения грузов в упаковке, испытаниях оружия. Такие акселерометры изготавливаются методами микромеханики и представляют собой подвижную массу на упругом подвесе с пьезорезистивными элементами, соединенными в мостовую схему (рис. 5). При возникновении ускорения основания подвижная масса начинает отклоняться от своего нейтрального положения, вызывая появление механических напряжений в пьезорезисторах, что приводит к изменению их сопротивления, разбалансировке моста и появлению напряжения в диагонали моста, пропорционального измеряемому ускорению. В зависимости от назначения в некоторых акселерометрах предусмотрено большое демпфирование для предотвращения их ухода в насыщение, в то время как в других, наоборот, от демпфирования стараются избавиться для повышения полосы пропускания акселерометров. Пьезорезистивные акселерометры обладают высоким соотношением сигнал-шум, температурным диапазоном $-20...+120$ °С, а возможность измерения постоянных ускорений позволяет применять их для определения плавно нарастающих ускорений, в том числе

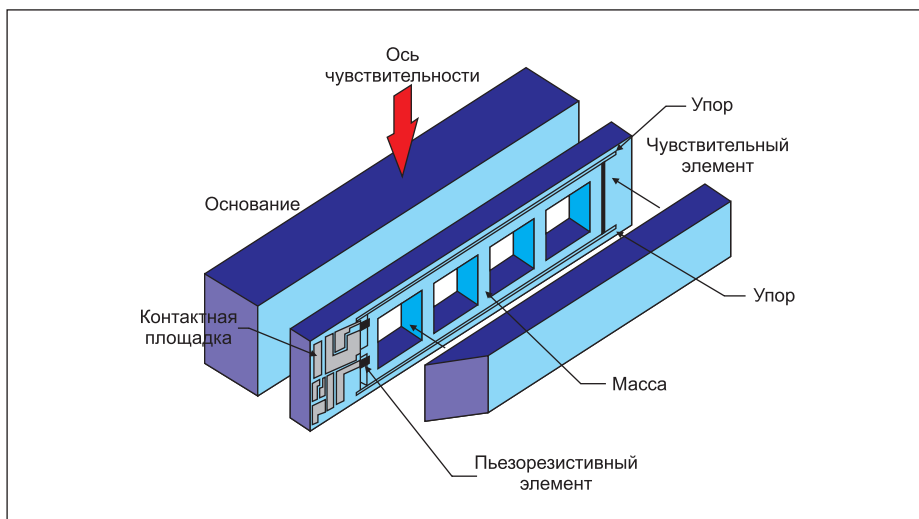


Рис. 5. Вариант конструкции пьезорезистивного акселерометра



Рис. 6. Сверхлегкий пьезорезистивный акселерометр (модель 7264H) компании Meggitt

в краш-тестах. Линейка пьезорезистивных акселерометров компании Meggitt предусматривает различные варианты корпусов с различными габаритами, что делает легким и удобным выбор решений для конкретной задачи (рис. 6).

Пьезорезистивные датчики давления

Помимо линейки пьезорезистивных акселерометров, компания Meggitt предлагает линейку пьезорезистивных датчиков давления, реализованную на основе той же технологии: на чувствительном элементе в виде мембраны, изготовленной методами микро-механики, расположены пьезорезистивные элементы, соединенные в мостовую схему. Такие датчики отличаются широкой полосой пропускания, хорошей чувствительностью, линейностью и малым гистерезисом и могут применяться для измерения динамического и статического давления при проведении испытаний и измерений в авиакосмической отрасли, автомобильной промышленности, машиностроении и прочих областях (рис. 7).

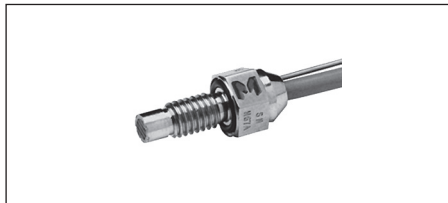


Рис. 7. Миниатюрный высокочувствительный пьезорезистивный датчик давления (модель 8510C) компании Meggitt

Емкостные акселерометры

Акселерометры емкостного типа компании Meggitt, как и пьезорезистивные акселерометры, изготавливаются методами МЭМС-технологии, но существенно отличаются по конструкции и характеристикам. Такие акселерометры представляют собой структуру типа «сэндвич», где чувствительный элемент в виде подвижной массы, связанной с рамкой посредством упругого подвеса, размещается между двумя ответными частями, образуя дифференциальную емкостную структуру (рис. 8). При наличии ускорения основания подвижная масса отклоняется от своего нейтрального положения, и с дифференциального емкостного датчика перемещения поступает сигнал, пропорциональный измеряемому ускорению.

Акселерометры емкостного типа, как правило, применяются для измерения постоянных ускорений и вибраций в относительно узкой полосе частот, в частности для определения параметров движения подвижных объектов, проведения динамических испытаний, систем мониторинга. Наличие газового демпфирования и ограничителей

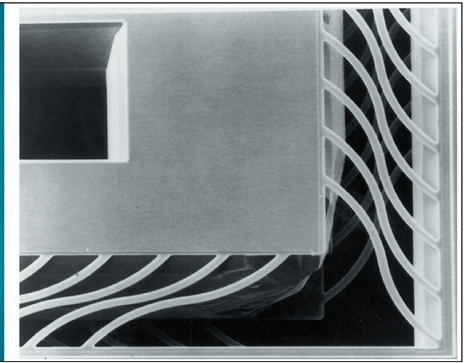
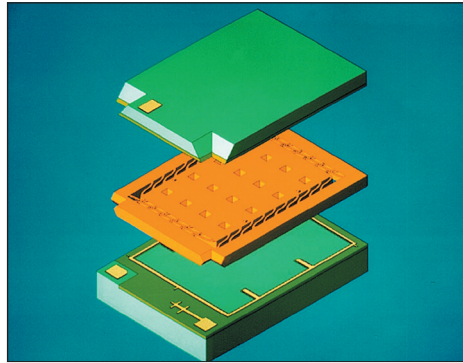


Рис. 8. Конструкция емкостного акселерометра: общий вид чувствительного элемента типа «сэндвич» (слева); увеличенный вид упругого подвеса акселерометра (справа)

отклонения подвижной массы позволят акселерометрам сохранять свою работоспособность даже при наличии ударов и вибраций. В совокупности с интегрированной электроникой удастся получить акселерометры со стабильными и хорошими точностными и динамическими характеристиками и температурным диапазоном $-55...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 9).

Кроме датчиков, описанных выше, компания Meggitt предлагает оборудование и дополнительные аксессуары, которые используются вместе с датчиками для построения системы сбора данных и решения задач испытания и измерения. К таким приборам относятся всевозможные усилители и преобразователи сигналов, начиная от портативных устройств и заканчивая стационарными лабораторными вариантами; возбудители колебаний для структурного анализа конструкций, от электромагнитных низкочастотных моделей до пьезоэлектрических высокочастотных возбудителей; модальные молотки, а также широкий спектр различных кабелей и соединителей, включающий малошумящие варианты и высокотемпературные жесткие кабели, и прочие аксессуары для акселерометров и измерительных систем.

В линейке датчиков Meggitt присутствуют и «умные» модели датчиков iTEDS со встроенной памятью, соответствующие стандарту IEEE 1421.4. Встроенная память предназначена для хранения серийного номера датчика и индивидуальных калибровочных данных, что позволяет быстро настроить измерительную систему и при этом избежать ошибок.

Хотелось бы уделить особое внимание основным характеристикам виброакселерометров, о которых следует помнить при выборе той или иной модели. Как правило, выбор стоит начинать с определения требуемой чувствительности акселерометра, максимальной измеряемой частоты вибрации, которая зависит от собственной частоты акселерометра, и его массы — от этих трех ключевых взаимосвязанных характеристик зависит тип используемого акселерометра. Каждая конструктивная схема (например, пьезоакселерометры компрессионного или

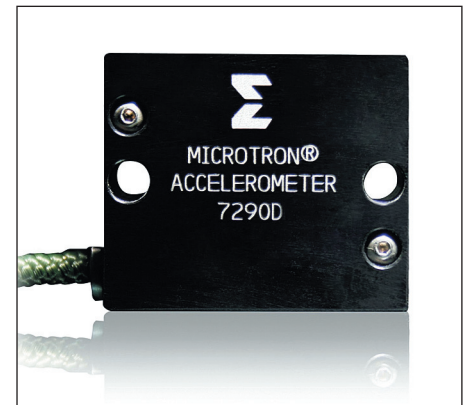


Рис. 9. Емкостной акселерометр (модель 7290D) компании Meggitt

сдвигового типа) обладает присущей только ей чувствительностью. Большая чувствительность схемы позволяет получить при одной и той же величине чувствительности виброакселерометр с меньшей массой и габаритами и, соответственно, с большей собственной частотой и полосой пропускания. Очевидно, что увеличение массы и размеров акселерометра в любой конструктивной схеме приведет к увеличению чувствительности прибора и одновременному снижению собственной частоты и полосы пропускания.

Выбор массы акселерометра зависит от массы конструкции или ее элементов — чем больше масса акселерометра приближается к величине массы объекта, чьи колебания необходимо измерять, тем больше сам акселерометр будет влиять на эти колебания и на частотные характеристики конструкции в целом. В связи с этим массу акселерометра желательно выбирать таким образом, чтобы она составляла не более 5% от массы исследуемого элемента.

Верхняя частота полосы пропускания, как уже упоминалось, определяется собственной частотой акселерометра и его способом крепления. В случае хорошего жесткого крепления АЧХ является практически прямой вплоть до частоты, соответствующей 20% от собственной частоты. При помощи схем компенсации сигнала в электронике и его фильтрации мож-

но увеличить полосу пропускания до 50% от собственной частоты. Нижняя частота полосы пропускания обычно соответствует значениям в пределах 1–5 Гц и определяется используемой электроникой.

Помимо указанных характеристик, на первом этапе также надо обратить внимание на диапазон измерения акселерометра, определяющий максимальную величину измеряемого ускорения. Затем можно переходить к точностным и эксплуатационным параметрам, таким как нелинейность выходной характеристики, перекрестная чувствительность, температурный коэффициент изменения масштабного коэффициента, шумовые составляющие, температурный диапазон, и прочим.

В заключение хотелось бы отметить, что в большинстве случаев каждая задача требует индивидуального подхода, и указанная последовательность не является аксиомой. Так, при необходимости проводить испытания в условиях повышенных температур на первое место может выйти диапазон рабочих температур и отодвинуть на второй план прочие характеристики. ■