

УДК 53.082.73

Разработка пьезоэлектрического датчика вибраций

Радкевич Д.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

Терских М.Г., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

Научный руководитель: Павлов Ю.Н., д.т.н, профессор

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

Введение

Современные технологии требуют непрерывного контроля за многими параметрами технологического процесса и контроля состояния оборудования. Одними из важнейших являются параметры механического движения, в частности параметры периодических перемещений исследуемого объекта в пространстве (вибрации).

Подобный контроль необходим в самых разных областях: в полупроводниковой электронике (контроль вибрации установок для выращивания кристаллов), в микроэлектронике (вибрация установок фотолитографии), в машиностроении (вибрация станков и биение деталей), в автомобильной промышленности (контроль вибрации отдельных узлов автомобилей и всего автомобиля в целом), на железнодорожном транспорте (датчики приближения поезда), в энергетике (контроль вибрации лопаток газовых турбин), в авиастроении (контроль биений турбин) и т.д.

Избежать механических колебаний на практике почти нельзя, так как они обусловлены динамическими явлениями, сопровождающими присутствие допусков, зазоров и поверхностных контактов отдельных деталей машин и механизмов и сил, возникающих при вращении и возвратно-поступательном движении неуравновешенных элементов и деталей. Даже механические колебания с малой амплитудой часто вызывают резонансные колебания других элементов конструкций, усиливаются и становятся важным источником вибрации и шума.

Когда речь идёт о механических колебаниях, первое, что приходит на ум – это самолёты и другие летательные средства. Вибрации, возникающие во время полета,

опасны не только своим воздействием на конструкцию самолета и установленное на самолете оборудование, но также и тем действием, которое они оказывают на здоровье находящихся в самолете людей. Именно поэтому значение вибродиагностики переоценить нельзя.

Сейчас в системах вибродиагностики применяются первичные вибропреобразователи, которыми в подавляющем большинстве случаев являются пьезоэлектрические акселерометры.

Пьезоэлектрический акселерометр является универсальным вибродатчиком и в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний.

Пьезоэлектрические акселерометры отличаются широкими рабочими частотным и динамическим диапазонами, линейными характеристиками в этих широких диапазонах, прочной конструкцией, надежностью и долговременной стабильностью параметров. Так как пьезоэлектрические акселерометры являются активными датчиками, генерирующими пропорциональный механическим колебаниям электрический сигнал, при их эксплуатации не нужен источник питания.

Можно сделать вывод, что пьезо-вибропреобразователи очень удобны и отвечают всем требованиям современной вибродиагностики.

Анализ и выбор типа конструкции.

Конструкция пьезоэлектрического вибропреобразователя зависит от типа деформации пьезоэлемента.

Основные варианты конструкции практических пьезоэлектрических акселерометров: а) с деформацией сжатия-растяжения (компрессионные); б) сдвиговые; в) изгибные.

Каждый из этих видов имеет свои достоинства и недостатки, так что однозначно лучшей конструкции пьезоэлектрического акселерометра не существует.

Компрессионный акселерометр (рис.1) отличается высокой вибропрочностью и используется в условиях высокоинтенсивных вибраций или жестких условиях эксплуатации (воздействие высоких температур). Технология растяжение-сжатие (рис. 1) используется в акселерометре типа ДВ-01, предназначенного для измерения параметров колебаний элементов фюзеляжа самолетов в процессе летных испытаний. Это наиболее распространенный тип конструкции пьезоэлектрических акселерометров.

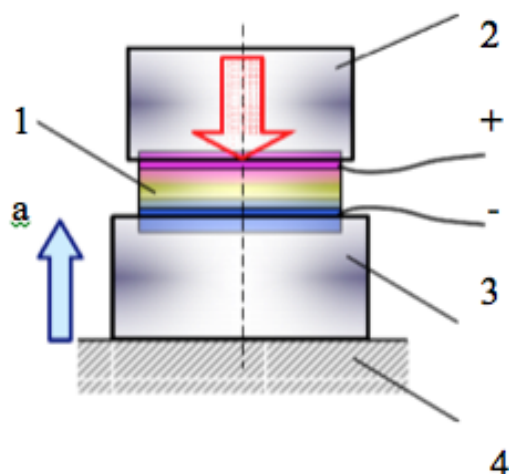


Рис. 1. Схема деформации растяжение-сжатие: 1 – пьезоэлемент;
2 – инерционный элемент; 3 – основание; 4 – опора или контролируемый объект

Использование пьезоэлектрических преобразователей с деформацией изгиба (изображен на рис. 2) позволяет значительно повысить коэффициент преобразования, преимущественно по заряду, при малых массах и габаритных размерах акселерометров в диапазонах низких и средних частот. Преобразователи с деформацией изгиба характеризуются невысокими значениями резонансной частоты и прочностью к воздействию ускорения, что ограничивает области их применения.

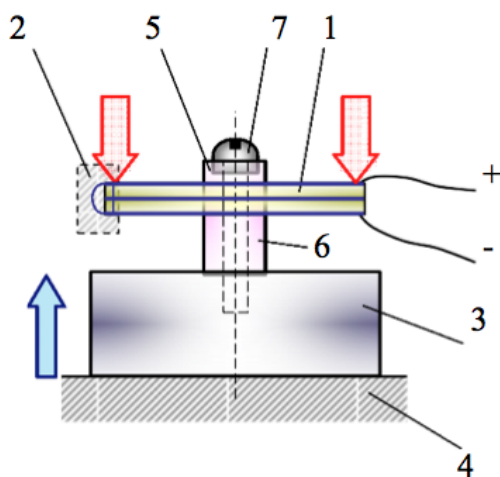


Рис. 2. Схема деформации изгиба: 1 – пьезоэлемент; 2 – инерционная масса; 3 – основание; 4,5,6 – опора и контролируемый объект; 7 – винт

К положительным качествам ряда конструкций, кроме уже упомянутой возможности получения высокого коэффициента преобразования, можно отнести их

простоту, технологичность, малую чувствительность к неизмеряемым воздействиям, а также возможность регулирования основных характеристик.

Сдвиговой акселерометр (рис. 3) сложен в изготовлении и используется там, где требуется высокая точность измерений – прецизионных датчиках, предназначенных для калибровки средств измерения вибрации. По такой схеме выполнены акселерометры типа «Isoshear» фирмы «Эндевко» (США) и «Planar Shear» фирмы «Брюль и Кьер» (Дания). Недостатком данной конструкции является недостаточная механическая жесткость, поэтому в жестких условиях эксплуатации их применение ограничено.

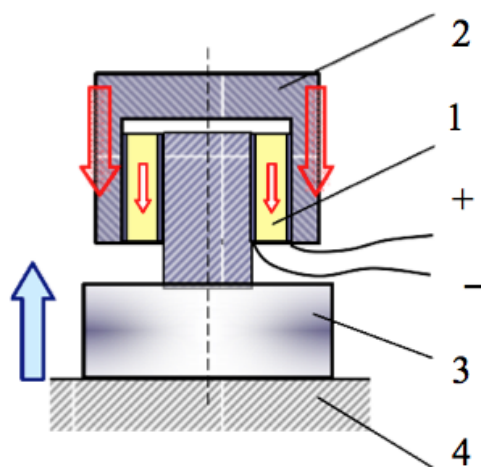


Рис. 3. Схема деформации сдвига: 1– пьезоэлемент; 2 – инерционный элемент;
3 – основание; 4 – опора или контролируемый объект

Выберем конструкцию с деформацией растяжения-сжатия. Она достаточно проста в исполнении, но при этом обладает необходимыми характеристиками для реализации поставленной задачи.

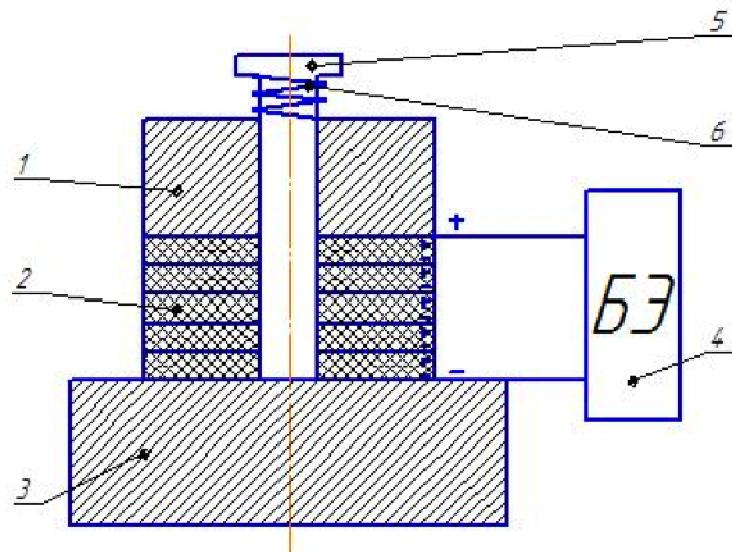


Рис. 4. Схема пьезоэлектрического акселерометра: 1 – инерционная масса; 2 – батарея пьезоэлектрических элементов; 3 – основание; 4 – блок электроники; 5 – винт; 6 – пружина

Описание и расчёт чувствительного элемента.

Чувствительный элемент пьезоэлектрического акселерометра состоит из 3 основных частей: пьезоэлемента, давящей на него инерционной массы, и основания, на которое устанавливаются оба этих элемента. Эти элементы соединяются с помощью винта и гайки. Для того, чтобы уменьшить износ деталей и обеспечить возможность регулировки сжатия, между головкой винта и инерционной массой поместим пружину.

Основание должно быть выполнено из прочного, но при этом достаточно лёгкого материала. В нашем датчике оно будет выполнено из алюминиевого сплава.

Основным элементом пьезоэлектрического акселерометра является диск из пьезоэлектрического материала. Подвергаемый действию силы пьезоэлектрический материал генерирует на своих поверхностях, к которым прикреплены электроды, электрический заряд, пропорциональный воздействующей силе.

Электрический заряд и напряжение, возникающие на электродах однослойного пьезоэлектрического элемента в результате прямого пьезоэффекта, соответственно, равны:

$$Q = d_{33}F, \quad (1.1)$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d_{33}F}{C}, \quad (1.2)$$

где d_{33} – пьезомодуль пьезоматериала; $F = ma$ – инерционная сила; m – масса инерционного элемента; a – ускорение; C – емкость.

Следовательно, коэффициент преобразования акселерометра по напряжению K_u имеет значение:

$$K_u = \frac{d_{33}m}{c}, \quad (1.3)$$

Таким образом, из (1.3) следует, что повышение коэффициента преобразования по напряжению может достигаться использованием пьезоматериала с более высоким пьезомодулем и повышенным отношением пьезомодуля к диэлектрической проницаемости.

Из формулы видно, что увеличение массы инерционного элемента также приведет к увеличению K_u , однако стоит учитывать, что это может значительно увеличить размеры конструкции и отрицательно сказаться на его применимости.

Одним из путей повышения стабильности датчика – является использование многослойного пьезоэлемента, где механически пластины соединены последовательно, а электрически – параллельно. Емкость в данном случае увеличивается в n^2 раз, где n – количество слоев.

Рассчитаем чувствительный элемент.

Приведем начальную формулу (1.2):

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d_{33}F}{C}$$

Распишем значение силы F , с которой инерционная масса действует на пьезоэлемент:

$$F = m_{\text{и}}a, \quad (1.4)$$

где: $m_{\text{и}}$ – масса инерционного элемента; a – ускорение.

Электрическую ёмкость пьезоэлемента выразим через его параметры:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} \frac{Sn^2}{h}, \quad (1.5)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – электрическая постоянная;

ε_{33} – электрическая проницаемость пьезоматериала; S – площадь одной пластины; n – кол-во пластин; h – высота пластины.

Ускорение колебания это вторая производная по времени от смещения:

$$a = \frac{d^2 l(t)}{dt^2} = \omega^2 l, \quad (1.6)$$

где: $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; (1.7)

f – частота поступательных колебаний;

l – максимальное отклонение.

Учитывая все вышеприведённые формулы и выражения, получим окончательную формулу зависимости электрического напряжения на выходе от частоты механических вибраций на входе:

$$U = \frac{d_{33} m_{\text{и}} 4\pi^2 h l}{\varepsilon_0 \varepsilon_{33} S n^2} \times f^2 \quad (1.8)$$

Зададим желаемый диапазон измеряемых величин:

$$a_{\min} = 0g; a_{\max} = 10g;$$

$$\text{где } g = 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$f_{\min} = 0 \text{ Гц}; f_{\max} = 5000 \text{ Гц};$$

Теперь выберем материалы основных частей чувствительного элемента и определим их характеристики и размеры.

Пьезоэлементом в нашем датчике будут служить 5 склеенных вместе токопроводящим клеем пластин пьезокерамики следующих размеров:

$$S = 2.25 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ – площадь одной пластины.}$$

$$h = 1 \text{ мм – высота одной пластины.}$$

$$n = 5 \text{ – кол-во пластин.}$$

В качестве материала для пьезоэлемента выберем отечественный материал ЦТС-26. Он имеет следующие значения пьезомодуля d_{33} и диэлектрической проницаемости:

$$d_{33} = 320 \times 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$$

$$\varepsilon_{33} = 1650$$

В качестве инерционного элемента будем использовать свинцовое кольцо массой:

$$m_{\text{и}} = 11 \times 10^{-3} \text{ кг.}$$

Подставим выбранные значения в формулу (1.8) и получим следующее выражение зависимости $U(f)$:

$$U(f) = 2.8 \times 10^{-7} f^2$$

Построим график зависимости $U(f)$:

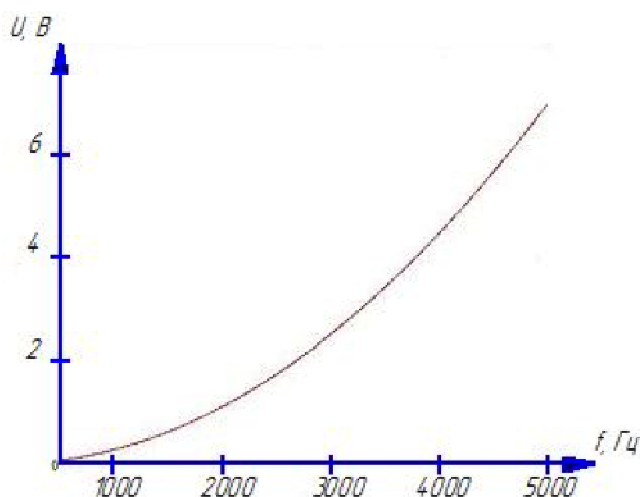


Рис. 5. График зависимости электрического напряжения от частоты вибрации.

Если подставить в формулу амплитудное значение частоты вибрации, равное 5000 Гц, то величина напряжения на выходе будет равна 7 В.

Расчёт чувствительности датчика.

Чувствительность S датчика определяется как соотношение приращения сигнала на выходе преобразователя к вызвавшему это приращение изменению измеряемой величины.

Для данного пьезоэлектрического акселерометра величина чувствительности будет определяться отношением изменения электрического напряжения к изменению частоты вибрации:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta f} = \frac{7}{5000} = 0.0014 \frac{\text{В}}{\text{Гц}} \quad (1.9)$$

Выводы.

Разработанный пьезоэлектрический датчик вибраций обладает рядом положительных характеристик. Во-первых – это миниатюрность. Габаритные размеры датчика не превышают 40мм в высоту, 40 мм в длину и 40мм в ширину. Небольшая величина датчика делает его очень универсальным. Она позволяет использовать датчик для измерения вибрации как на больших объектах (подвергаемые механическим колебаниям части летательных аппаратов), так и на гораздо более меньших.

Вторая положительная характеристика – стоимость. Материалы, сплавы и другие составляющие, используемые для создания деталей данного пьезоэлектрического датчика, могут быть куплены в России и не являются дорогостоящими.

В то же время нужно отметить, что диапазон измеряемой величины довольно большой: от 0 до 5000Гц. Чувствительность датчика также очень велика. Таким образом, несмотря на небольшую стоимость датчика и его универсальность, он позволяет производить измерения вибрации с высокой точностью.

Указания по транспортировке и монтажу.

1. К датчику должен быть приложен паспорт, удостоверяющий его соответствие техническим требованиям.

2. Датчик должен быть завернут в конденсаторную бумагу по ГОСТ 1908-66, телефонную бумагу по ГОСТ 3553-73 или обёрточную бумагу по ГОСТ 8273-75.

3. Датчик должен быть уложен в коробку из гофрированного картона по ГОСТ 7376-66.

На коробке должен быть проставлен штамп или наклеена этикетка с указанием:

- товарного знака или наименования предприятия-изготовителя;
- условного обозначения и количества датчиков;
- фамилии или номера контролёра и упаковщика;
- даты выпуска.

4. Датчик, упакованный в соответствии с п.п 1-3, допускается транспортировать всеми видами транспорта при условии защиты его от механических повреждений и воздействия влаги, паров кислот и щелочей.

5. Условия хранения датчика при отсутствии воздействия на них паров кислот и щелочей должны быть не хуже условий хранения группы 1Л по ГОСТ 15150-69.

6. Монтаж датчика производить к горизонтальной или вертикальной поверхности винтами М2х1.5 ГОСТ 1491-72.

Список литературы

1. Буцев А.А., Еремеев А.И., Кокорев Ю.И. / под ред. О.Ф. Тищенко Атлас конструкций элементов приборных устройств: учеб. пособие для студентов приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1982. 166 с.
2. Шарапов В., Мусиенко М., Шарапова Е. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
3. Янчич В.В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Машиностроение, 2008. 77 с.