

---

## СЕКЦИЯ №2

### ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА В КОСМИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

---

#### **Пьезоэлектрический акселерометр в космическом приборостроении**

Бояхчян А.А., Шашев Д.В. \*

Научный руководитель: Гормаков А.Н., к.т.н., доцент кафедры ТПС  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

\*ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
E-mail: bojahchyan@yandex.ru

В настоящее время почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний используются акселерометры. Одним из областей применения является космическое приборостроение, в частности акселерометры используются в системах инерциальной навигации для определения ускорения объекта и его угловых скоростей. Одними из таких акселерометров являются акселерометры, основанные на пьезокерамике. Преимущество пьезоэлектрических акселерометров в том, что они отличаются от других датчиков широкими рабочими частотным и динамическим диапазонами, линейными характеристиками, прочной конструкцией и долговременной стабильностью параметров [1]. Для достижения точных и надежных результатов, акселерометр нужно закрепить на поверхности исследуемого объекта как можно надежнее. Ненадежное крепление акселерометра влечет за собой значительное уменьшение его резонансной частоты, а также значительно уменьшает его рабочий частотный диапазон. Существуют различные методы крепления пьезоакселерометров на объектах контроля, такие как крепление с помощью прочной стальной резьбовой шпильки, пчелиного воска, специальных шпилек, прикрепляемых к объекту твердым клеем или цементом, липкой лентой, постоянного магнита, ручного шупа.

Пьезоэлемент пьезоакселерометров сконструирован таким образом, что при возбуждении механическими колебаниями масса, которая закреплена в корпусе акселерометра, воздействует на него силой, пропорциональной ускорению механических колебаний.

Основные варианты конструкции пьезоэлектрических акселерометров:

- Вариант сжатия: при таком виде сжатия, масса воздействует силой сжатия на пьезоэлектрический элемент;
- Вариант сдвига: для него характерным является работа пьезоэлемента под действием срезающего усилия, обусловленного массой внутри акселерометра.

В данной работе рассмотрен вариант работы акселерометра на сжатие, т.к. подобные акселерометры обладают следующими преимуществами:

1. Довольно высокая резонансная частота, так как при работе на сжатие она соответствует очень большой жесткости пьезоэлектрического элемента;
2. Высокая прочность;
3. Чувствительность к напряжениям, возникающим в основании;
4. Чувствительность к пьезоэлектрическим эффектам, что требует использование средств для компенсации или изоляции в неблагоприятных условиях эксплуатации датчика.

Конструкции пьезоэлектрических акселерометров работающих на сжатие различных фирм [2] представлены на рисунке 1.

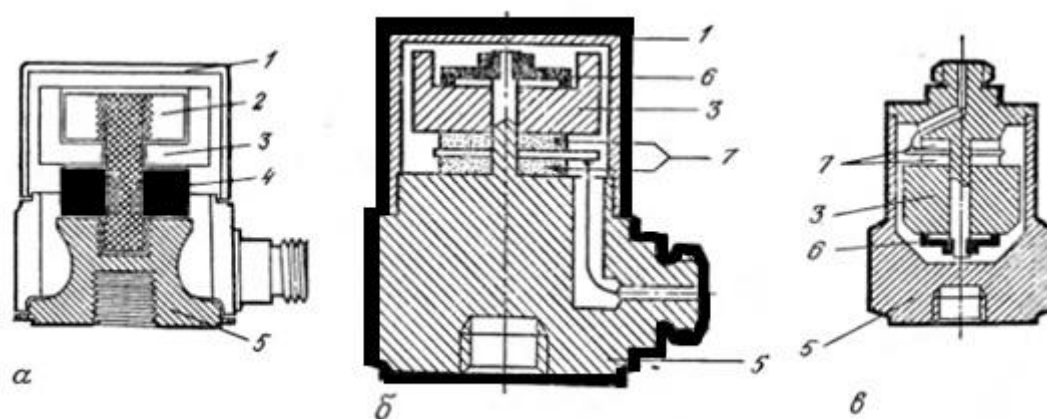


Рисунок 1 - Пьезоэлектрические акселерометры, работающие на сжатие в осевом направлении: а - затяжка гайкой; б, в - поджатие с помощью пружины  
1 - кожух; 2 - гайка; 3 - масса; 4 - пьезоэлектрический элемент; 5 - основание;  
6 - пружина; 7 - пьезоэлектрические элементы

Основные факторы, влияющие на показания пьезоэлектрических датчиков:

- Температура
- Дegrадация характеристик
- Шумы, вызванные соединительным кабелем
- Уход нуля

Учитывая эти факторы, можно приступить к основной задаче при разработке пьезоакселерометра – выбору чувствительного элемента. Роль чувствительного элемента играет пьезокерамика.

В таблице 1 представлены основные виды пьезокерамики и их характеристики, которые используются для пьезоакселерометров.

Таблица 1- основные виды пьезокерамики и их характеристики

Пьезоэлектрик	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука $c$ , м/с	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Пьезомодуль, $d$	Механическая добротность, $Q_m$
Кварц	2,6	5,47	4,5	2,31	$>10^4$
Дигридофосфат аммония	1,8	3,25	15,3	24	$>10^2$
Сульфат лития	2,05	4,7	10,3	16,3	$>10^2$
Сегнетова соль	1,77	3,1	350	275	-
Сульфид сурьмы	5,2	1,5	2200	150	20
Ниобат лития	4,64	5,8	28,6	600	$<10^5$
Титанат бария ТБ-1	5,3	4,6	1500	45	400
Титанат бария-кальция ТБК-3	5,4	4,2	1180	100	450
Титана-цирконат свинца ЦТС-19	7,45	3,6	1725	100	50
ПВДФ (пьезополимерная пленка)	1,8	1,4	12	20	-
Пьезокомпозит 30% РbTiO <sub>3</sub>	3	1,8	20	-	-

Дальнейшая работа заключается в разработке акселерометра работающего на пьезокерамике, соответствующего следующим параметрам:

- Порог чувствительности: от  $10^{-5} g$  до  $10^{-4}$
- Диапазон рабочих температур от  $-55^{\circ} C$  до  $+70 (125)^{\circ} C$
- Погрешности: основная погрешность не более  $\pm 5\%$ ;
- Габариты: не более 26x26x26 мм

Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке Минобрнауки России, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение № 14.575.21.0068, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57514X0068.

Список литературы:

1. Ж. Аш Датчики измерительных систем. Книга 2. систем. – Изд.: Москва «Мир», 1992. – 424 с.
2. Каталог продукции фирмы «Брюль и Кьер». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.istcgroup.com/pdf/bruel%20catalog.pdf>, свободный.

### **Выбор материала для чувствительного элемента пьезоэлектрического акселерометра**

Бояхчан А.А., Шашев Д.В. \*

Научный руководитель: Гормаков А.Н., к.т.н., доцент кафедры ТПС  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

\*ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»  
E-mail: bojahchyan@yandex.ru

При разработке пьезоакселерометра первостепенной задачей является выбор пьезоматериала (данный материал обладает пьезоэлектрическими свойствами) для чувствительного элемента, который чаще всего представляет собой систему «инерционная масса - упругий элемент». В зависимости от конструкции пьезоакселерометра из пьезоматериала изготавливается как весь чувствительный элемент, так и отдельные его части, чаще всего упругий элемент.

При выборе пьезоматериала следует учитывать температуру среды, в которой будет работать датчик, значения пьезоэлектрических коэффициентов  $d$  и  $g$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , модуля упругости  $E$  и плотности  $\delta$  [1].

В данной работе в качестве пьезоматериала для конструкции акселерометра рассматриваются пьезокерамика и пьезополимерная пленка. В таблице 1 отражены основные свойства данных материалов [2].

Таблица 1 – Основные свойства пьезоматериалов

Пьезоэлектрик	Плотность $\rho$ , 103 кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука $c$ , 103 м/с	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	Пьезомодуль $d$ , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н
Титанат бария	5,3	4,6	1500	45
Группа титаната- цирконата свинца	7,45	4,4	1725	100
Пьезокерамическая пленка	1,8	1,4÷1,9	280	20