

# Биморфные пьезоэлектрические элементы: актюаторы и датчики

**Биморфные пьезоэлектрические элементы находят широкое применение в современной аппаратуре различного назначения либо в качестве актюаторов, либо как датчики там, где требуются относительно небольшие механические перемещения с максимальной чувствительностью или контроль перемещений. Обеспечивая перемещение до 5 мм, биморфные актюаторы способны развивать приемлемую величину усилия до 5 Н при низких значениях напряжения возбуждения 20–150 В.**

**Виктор Никифоров,  
Виталий Климашин,  
Алексей Сафронов**

info@elpapiezo.ru

**Н**овые конструкции многослойных пьезокерамических элементов — биморфные, пакетные, моноблочные — находят все большее применение в современных оптических, электромеханических, пневматических, сейсмических электронных устройствах, а также в аппаратуре медицинского назначения.

В этой статье рассматриваются биморфные пьезокерамические элементы (в дальнейшем биморфы), которые благодаря своей компактной конструкции, простоте управления, высоким эксплуатационным параметрам и низкой стоимостинискали заслуженный интерес широкого круга создателей аппаратуры самого различного назначения. Целью этой статьи является более детальное ознакомление специалистов с конструкцией биморфов, их возможностями, производителями, а также областями применения.

## Конструкция

Биморф состоит из двух тонких склеенных между собой пьезокерамических пластин с прокладкой между ними или без нее.

Пьезокерамическая пластина изготавливается из пьезокерамики системы ЦТС, которая представляет собой твердый раствор титаната свинца и цирконата свинца с модифицирующими добавками.

Чаще всего толщина пластин составляет 0,3–0,35 мм, длина варьируется от 4 до 60 мм, а ширина от 1,6 до 20 мм. Однако по специальному заказу возможно изготовление биморфа любой геометрии. Пластины обрабатываются и подшлифовываются с точностью  $\pm 0,05$  мм по толщине и  $\pm 0,1$  мм по длине и ширине.

На пьезокерамическую пластину наносятся электроды из серебра или никеля. Серебряные электроды имеют однородный белый цвет, толщина слоя 6–10 мкм.

Серебряные электроды не рекомендуется использовать при наличии сильных электрических полей постоянного тока, так как возможна миграция серебра, что приводит к замыканию двух электродов.

Никелевые электроды имеют серый цвет, толщина 1–3 мкм, они обладают хорошей устойчивостью к коррозии и обеспечивают надежную работу при постоянном и переменном напряжении.

После нанесения на пьезокерамическую пластину электродов, она поляризуется в сильном постоянном электрическом поле и приобретает пьезоэлектрические свойства.

Биморф, собранный из двух пластин, направление поляризации которых одинаково, называют параллельным биморфом. Биморф, в котором поляризация пластин имеет противоположное направление, обозначают как последовательный биморф.

Центральная прокладка может изготавливаться из различных материалов, например, бериллиевой бронзы, нержавеющей стали, никелевой фольги, графита, композитов.

Для изделий с высокой чувствительностью возможно изготовление биморфа без прокладки.

Прокладка увеличивает механическую прочность, но уменьшает величину перемещения. Применение прокладки из нержавеющей стали обеспечивает на 25% большую прочность элемента и применяется во вживляемых кардиостимуляторах, где имеет место большое усилие.

Толщина клеевого соединения составляет 10–15 мкм. Для склеивания применяется эпоксидный или акрилатовый клей, обеспечивающий прочное соединение. Эластичность клеевого соединения обычно устраняет возможность появления вибрационной усталости при длительной работе.

Биморф может работать в двух режимах. При использовании прямого пьезоэффекта происходит преобразование механической энергии, приложенной к биморфу, в электрическую. Механическое усилие вызывает изгиб биморфа. При этом происходит сжатие одной из составляющих пластин и растяжение другой. Это вызывает в биморфе образование заряда. Биморф работает в режиме генератора.

Биморф, работающий в режиме генератора, используется как гибкий датчик. Датчик генераторного типа не требует для функционирования внешнего источника питания. Датчик предназначен для преобразования динамических деформаций в электрические сигналы с последующей обработкой и регистрацией различными приборами. Датчик может быть использован как самостоятельный преобразователь механической деформации в электрический сигнал, так и быть составной частью более сложного

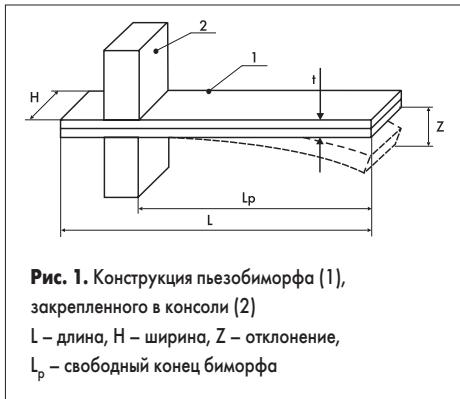


Рис. 1. Конструкция пьезобиморфа (1), закрепленного в консоли (2)  
L – длина, H – ширина, Z – отклонение, L<sub>p</sub> – свободный конец биморфа

прибора. Датчик может быть сопряжен с системой контроля и управления двумя основными способами: по схеме регистрации напряжения или по схеме регистрации заряда.

Биморф, использующий обратный пьезоэффект — преобразование электрических сигналов в механические усилия, — пьезоэлектрический актюатор. Биморфный пьезоэлектрический актюатор (в дальнейшем актюатор) является пассивным нелинейным четырехполюсником и требует наличия источника питания для возбуждения.

На практике способ возбуждения выбирается с учетом конкретного случая применения и условий работы.

Обычно биморфы монтируются в виде консоли (рис. 1), стандартная свободная длина L<sub>p</sub> составляет примерно 85% от общей длины (L).

**Схемы включения пьезобиморфа-актюатора**

В последовательном биморфе пластины соединены по отношению к источнику питания последовательно (рис. 2, а). В этом случае пластина с положительной полярностью находится под воздействием положительного напряжения и благодаря обратному пьезоэлектрическому эффекту удлиняется, тогда как пластина отрицательной полярности не работает и препятствует этому изменению длины, что приводит к изгибу биморфа. Так как пьезокерамический элемент обладает свойствами конденсатора, то поглощаемая им энергия высвобождается постепенно после отключения напряжения. Для того чтобы биморф быстро возвращался в свое первоначальное состояние, между электродами включают два резистора.

Способ включения параллельного биморфа (рис 2, б) состоит в подключении двух внешних электродов к одному выводу. Другим выводом служит центральный электрод.

При параллельном соединении развиваемые усилия в два раза больше, чем при последовательном соединении.

В последовательном биморфе одна из пластин всегда будет находиться под напряжением, противоположном напряжению поляризации, что создает опасность деполяризации. Это также справедливо для параллельного биморфа (рис. 2, б).

Для устранения возможного дефекта деполяризации пластин лучше включать биморф в соответствии со схемой (рис. 2, в), где обе пластины возбуждаются в направлении поляризации,

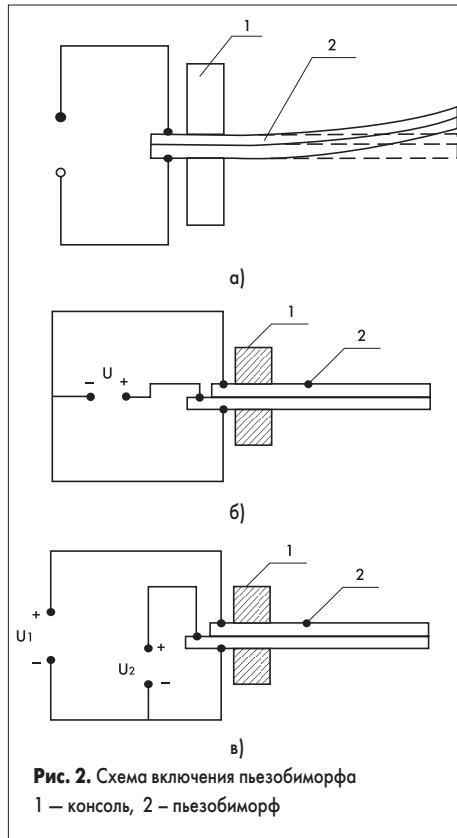


Рис. 2. Схема включения пьезобиморфа  
1 – консоль, 2 – пьезобиморф

а подача напряжения смещения позволяет избежать дрейфа характеристик, вызываемого деполяризацией, повышает чувствительность по входу и увеличивает срок службы.

**Электрические характеристики биморфов**

На практике способ включения и номинальное напряжение выбирается с учетом конкретного случая применения и условий работы.

Быстродействие биморфа определяется значением статической выходной емкости, а ее величина зависит от геометрических параметров элемента и диэлектрических свойств пьезоматериала пластин. Индуктивность биморфа пренебрежимо мала и в расчете не учитывается.

Максимально приложенное напряжение при температуре окружающей среды 20 °С не должно превышать значение

$$U_{max} = 300 (t - t_n) / 2 \quad (1)$$

где t — толщина пьезопластины (мм), t<sub>n</sub> — толщина прокладки (мм).

Таблица 1

| № п/п | Характеристики         | Параллельный биморф                   | Последовательный (серийный) пьезобиморф        | Единица измерения |
|-------|------------------------|---------------------------------------|--|-------------------|
| 1     | Отклонение             | $9 \times 10^{-10} L_p^2 / t^2$       | -  | м/В               |
| 2     | Изгиб                  | $7 \times 10^{-11} L_p^3 / H t^3$     | $7 \times 10^{-11} L_p^3 / H t^3$              | м/Н               |
| 3     | Резонансная частота    | $400 t / L_p^2$                       | $400 t / L_p^2$                                | Гц                |
| 4     | Развиваемый заряд      | $8 \times 10^{-10} L_p^2 / t^2$       | $4 \times 10^{-10} L_p^2 / t^2$                | Кл/Н              |
| 5     | Емкость                | $8 \times 10^{-8} L \times H / t$     | $2 \times 10^{-8} L \times H / t$              | Ф                 |
| 6     | Развиваемое напряжение | $10^{-2} L_p^2 / L \times t \times H$ | $2 \times 10^{-2} L_p^2 / L \times t \times H$ | В/Н               |

**Физические характеристики биморфов**

Основные физические характеристики, определяющие эксплуатационные параметры актюаторов:

- резонансная частота;
- статическая емкость;
- свободное отклонение;
- блокирующее усилие.

Резонансная частота — частота, при которой величина импеданса элемента минимальна.

На этой частоте вибрации элемента становятся наиболее интенсивными, при этом наиболее эффективно происходит преобразование электрической энергии в механическую. Резонансная частота определяется составом пьезокерамического материала пластин и геометрией элемента.

Обычно указывают величину свободного отклонения и блокирующее усилие.

Свободное отклонение означает перемещение, которое может быть достигнуто при максимальном значении рекомендуемого напряжения при полностью свободном ходе.

Блокирующее усилие означает приложенную к пьезобиморфу силу, которая при максимальном значении рекомендуемого напряжения полностью блокирует движение.

Величина отклонения максимальна при усилии, равном нулю, и усилие максимально при отклонении, равном нулю. Все другие значения представляют результаты комбинации отклонения и усилия определяются линией, проведенной между двумя точками на графике (рис. 3).

Как правило, актюатор должен обеспечить заданную величину перемещения и усилия, что определяет его рабочую точку на графике зависимости усилия от перемещения.

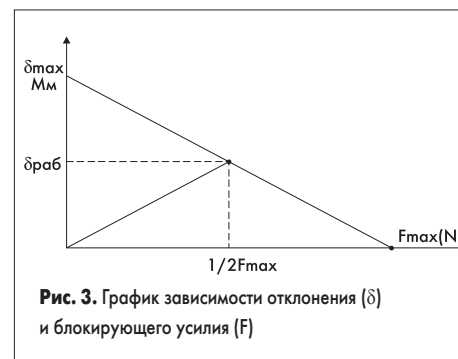


Рис. 3. График зависимости отклонения (δ) и блокирующего усилия (F)

Таблица 2

| Конструкционные параметры |               |                | Резонансная частота, Гц | Емкость, нФ | Свободная длина, мм | Напряжение, В | Максимальное отклонение, мм | Блокирующее усилие, Н |
|---------------------------|---------------|----------------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|
| Длина L (мм)              | Ширина Н (мм) | Толщина t (мм) |                         |             |                     |               |                             |                       |
| 35                        | 2,5           | 0,6            | 245                     | 4           | 28,5                | ±150          | ±0,58                       | 0,12                  |
| 40                        | 12            | 0,6            | 175                     | 30          | 35                  | ±80           | ±0,55                       | 0,35                  |
| 55                        | 2             | 0,75           | 110                     | 5           | 48                  | ±200          | ±0,5                        | 0,2                   |
| 100                       | 22            | 1              | 60                      | 20          | 85                  | ±80           | ±0,7                        | 0,3                   |

Актуатор считается оптимизированным для данного применения, если он развивает требуемое усилие при перемещении 50% свободного хода.

Технические характеристики биморфа могут быть определены с точностью в пределах 20% по формулам, приведенным в таблице 1 для стандартной конструкции пьезобиморфа (рис. 1).

Значение отклонения для параллельного биморфа рассчитывается по приведенному в таблице коэффициенту, умноженному на значение напряжения.

Блокирующее усилие определяется отношением величины отклонения к изгибу.

### Условия применения

- Диапазон рабочих температур:  $-40...+85$  °С.
- Диапазон температуры хранения:  $-20...+60$  °С.
- Сопротивление изоляции более 100 МОм.
- Длительность эксплуатации более 100 миллионов циклов.

### Крепление и подсоединение выводов

Установка биморфов в корпусе изделия возможна с помощью приклеивания, пайки и механического зажима. Наилучшим способом является склеивание эпоксидными или акрилатными клеями, при этом должны использоваться клеи с низкой температурой полимеризации, соответствующей 50% значению температуры Кюри поляризованной керамики (примерно 120–150 °С).

Подсоединение выводов к биморфу осуществляется методом пайки. Для минимизации влияния нагрева на свойства биморфа время пайки не должно превышать 3 секунд. Следует обратить внимание, что при пайке на пластине возникает электрический заряд и поэто-

му необходимо проводить пайку при короткозамкнутых электродах.

Пайка к серебряным электродам осуществляется с помощью припоя типа ПСр 2,5 (62% олова, 35% свинца и 2% серебра), флюсактивная канифоль.

Температура пайки 275–300 °С. Для никелевых электродов вместо припоя, содержащего серебро, могут быть использованы оловянно-свинцовые припои. Флюс спирто-канифольевый типа ФКСП.

### Разработчики и поставщики

Биморфы различной конструкции освоены в производстве и выпускаются миллионными партиями.

Основными разработчиками и производителями биморфов за рубежом являются ведущие мировые производители высокотехнологичных изделий: Morgan Electro Ceramics, Ceram Tec, APC Int., Xinetics, Fuji Ceramics, SPK Electronics, Dyna Optics Motion, Semicom, PI Ceramic, а также российский производитель — «Элпа».

В таблице 2 приведены стандартные параметры биморфов, выпускаемых в ОАО «Элпа».

Примечание: возможно изготовление биморфов по заказу, с требуемыми параметрами и конструкцией.

### Области применения

В настоящее время осуществляется широкое внедрение биморфов в различные области науки и техники. Основные достоинства биморфов по сравнению с аналогичными электронными элементами:

- низкая стоимость;
- малое потребление энергии;
- значительная величина перемещения (до 5 мм) и достаточное усилие (до 5 Н);
- компактность, жесткость конструкции;
- высокое быстродействие;

- работа с различными сигналами;
- долговечность (до 100 миллионов циклов) и высокая повторяемость;
- широкий температурный диапазон позволяет широкомасштабное их внедрение в новые проектируемые приборы и аппаратуру различного назначения. В последние годы они широко используются:
- в современном ткацком оборудовании (элемент электронного челнока);
- для слепых (приставка-дисплей к компьютеру для чтения по методу Брайля);
- сенсорные выключатели и контакторы;
- пневматические и гидравлические клапаны;
- насосы небольшого объема;
- устройства охлаждения электронных приборов;
- микроманипуляторы для медицины;
- датчики положения в электронных устройствах;
- охранные системы;
- тактильные преобразователи для робототехники;
- программируемые дозаторы;
- датчики расхода жидкости и газа.

В современных автомобилях биморфы активно внедряются в устройствах:

- датчики поворота для определения угла поворота дроссельной заслонки;
- датчики угловой скорости и линейные акселерометры;
- датчики неровности дорог;
- пьезогирометры для систем навигации;
- датчики потока воздуха; датчики уровня жидкости;
- датчики расхода топлива;
- сборка от 3 до 4 пьезобиморфов в едином блоке позволяет осуществлять создание пьезоустройств с высоким значением усилий, что позволяет их использовать в системах впрыска топлива и газораспределительных системах двигателя, гидростабилизированных системах подвески и т. д.
- Встроенные в оборудование биморфы постоянно отслеживают сигнатуру вибрации и выдают информацию в реальном масштабе времени о степени износа, прогнозируют преждевременную усталость конструкции.
- Совмещая с интегральной технологией разработки новой аппаратуры XXI века — микромеханики — возможно создание нового поколения интеллектуальных датчиков на основе биморфов.