

Пьезокерамические пакетные и моноблочные актюаторы

Пьезоэлектрические актюаторы, как приводы точных микроперемещений, находят все большее применение в различных областях техники. Обеспечивая перемещение от единиц до 200–300 мкм с точностью 0,01–0,005 нм, они способны развивать усилия до 50 кН.

**Алексей Сафронов,
Виталий Климашин,
Борис Парфенов,
Вера Ярошевич,
Виктор Никифоров**

info@elpapiezo.ru

Как чаще всего бывает, первое применение актюаторы нашли в военной технике, в приборах управления лазерным лучом — как приводы деформируемых лазерных резонаторов в лазерных адаптивных системах.

Однако с учетом компактности, удобства управления перемещением и быстродействия они начали находить свое применение в топливно-распределительных системах бензиновых и дизельных двигателей, в качестве компенсаторов вибрации оборудования, в устройствах точного позиционирования объектов (микролитография, туннельные растровые микроскопы и т. д.).

Принцип действия актюаторов построен на использовании так называемого обратного пьезоэффекта, то есть на деформации пьезоэлемента под действием электрического поля.

В таблице 1 приведены основные типоразмеры и эксплуатационные параметры актюаторов, выпускаемых серийно зарубежными фирмами (Morgan Electro Ceramics, Ceram Tec, Piezomechanik, Ceram Nort America, Xinetics, APC, Piezo Kinetics, Piezo Systems, TRS Ceramics, Ferroperm Group) и российским производителем — ОАО «ЭЛПА».

Для актюаторов обычно указывается величина свободного перемещения (ход) и развиваемая си-

ла (усилие). Свободное перемещение означает перемещение, которое может быть достигнуто при максимальной величине напряжения при полностью свободном ходе актюатора. Развиваемая сила означает усилие, которым обладает актюатор при максимальной величине напряжения при отсутствии смещения. Величина емкости определяет быстродействие актюатора.

В таблице 1 приведены эксплуатационные параметры в зависимости от геометрических размеров пьезокерамического изделия при минимальном и максимальном значении геометрических параметров.

По устройству и технологии изготовления различают пакетные и моноблочные конструкции пьезоактюаторов, которые, в свою очередь, в зависимости от режима включения подразделяются на высоковольтные (максимальное рабочее напряжение до 1000 В) и низковольтные (максимальное рабочее напряжение до 150–200 В).

Развиваемая сила прямо пропорциональна площади сечения актюатора, а величина свободного перемещения линейно зависит от длины актюатора и используемого пьезокерамического материала.

Зависимость резонансной частоты и емкости от геометрических размеров определяется соотношениями, приведенными в таблице 2.

Таблица 1

Тип актюатора	Стандартные геометрические размеры					Эксплуатационные параметры			
	Диаметр		Длина L	Ширина d	Высота b	Максимальный ход (X), мкм	Емкость (C), мкФ	Частота резонансная (f), кГц	Развиваемая сила (F), кН
	внешний D	внутренний d							
		мм							
Высоковольтные пакетные актюаторы									
Бескорпусные	5÷35	–	10÷75	–	–	10÷110	0,02÷3,3	10÷50	1÷50
В корпусе с предварительным внутренним напряжением	10÷35	–	25÷200	–	–	10÷250	0,02÷6,5	5÷40	4÷50
Высоковольтные кольцевые актюаторы									
Бескорпусные	10÷35	5÷25	10÷100	–	–	10÷200	0,065÷1,8	10÷50	3÷20
В корпусе с предварительным внутренним напряжением	10÷35	5÷25	25÷125	–	–	10÷150	0,065÷1,8	10÷40	2÷20
Высоковольтные бескорпусные прямоугольные актюаторы	–	–	5÷20	2÷14	3÷14	7÷30	0,07÷11	25÷240	2÷11
Низковольтные актюаторы (полые цилиндры)									
Бескорпусные	15÷35	10÷15	10÷70	–	–	15÷180	0,07÷110	10÷45	2,8÷8
В корпусе с предварительным внутренним напряжением	15÷25	8÷15	15÷90	–	–	15÷110	0,07÷110	10÷30	2,8÷3
Низковольтные актюаторы в корпусе с предварительным нагружением	4÷20	–	20÷200	–	–	10÷200	0,17÷110	5÷40	0,5÷14
Пьезокартридж – низковольтные актюаторы в корпусе с резьбой для фронтального соединения M 8÷14	4÷10	–	25÷150	–	–	25÷200	0,34÷5,6	–	0,15÷3
Низковольтные электрострикционные актюаторы (пакет)	5÷7	–	20÷70	–	–	6÷40	1,2÷22	–	0,5÷1
Полый цилиндр	15	–	3÷35	–	–	2÷12	4÷22	–	0,5÷5

Работа пьезоактюаторов возможна в двух режимах: однополярный и биполярный режимы. При биполярном режиме величина напряжения противоположной полярности обычно составляет 20% от величины максимального положительного напряжения. При биполярном режиме работы возможно увеличение хода и усилия на 30% (в таблице 1 эти значения указаны для биполярного режима).

Пьезоактюаторы изготавливаются путем сборки пьезокерамических дисков и колец с металлизированными поверхностями в пакет, в котором для внешних соединений используются металлические межсекционные электроды. Жесткая конструкция формируется либо с помощью высококачественных клеевых материалов, либо путем пайки твердым припоем. Отдельные пьезоэлементы соединены между собой параллельно электрически, что позволяет создать устройство, обладающее максимальной деформацией. Толщина диска и кольца 0,25–0,5 мм, количество слоев 7–40 шт. Материал электродов — серебро и серебрено-палладиевый сплав — наносится методом трафаретной печати на керамическую поверхность (толщина слоя 6–12 мкм).

Для повышения механической прочности, стойкости к климатическим воздействиям и температурным перегрузкам пьезокерамические изделия помещаются в корпус из меди или ее сплавов, обеспечивающий лучший теплообмен. При помещении пьезокерамического актюатора в корпус с целью повышения жесткости конструкции и, соответственно, повышения эксплуатационных параметров и надежности, с помощью специальных устройств (пружин или гибких элементов) осуществляется предварительное механическое нагружение в осевом направлении (предварительное усилие) — усилие сжатия от 50 до 1500 Н. Предварительное нагружение позволяет работать при подаче положительного и отрицательного напряжения, исключает наклон концевых поверхностей актюатора и обеспечивает их параллельность при установке в изделиях.

Конструкция высоковольтных бескорпусных прямоугольных актюаторов представляет собой прямоугольный брус. Актюаторы изготавливаются из моноблока пьезокерами-

Таблица 2

Тип актюатора	Геометрические размеры					Расчетные значения	
	D мм	d мм	L мм	a мм	b мм	Резонансная частота, кГц	Емкость, мкФ
Пакетный	D	-	L	-	-	N L	$\epsilon_{33}^T \pi D^3$ $4 \times L$
Кольцевой	D	d	L	-	-	2N D-d	$2\epsilon_{33}^T \pi L$ $\ln D/d$
Прямоугольный	-	-	L	a	b	N L	$\epsilon_{33}^T \times a \times b$ L

Примечание: ϵ_{33}^T — диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;
N — частотная постоянная пьезоматериала

ческого материала по технологии изготовления пьезоизделий. На боковую поверхность наносятся серебряные электроды (толщина слоя 6–12 мкм), к которым припаиваются провода. Максимальные габариты определяются возможностями существующего техпроцесса изготовления пьезокерамических изделий.

Конструкция низковольтных кольцевых актюаторов представляет моноблок из пьезокерамического материала в виде полого цилиндра, на боковые поверхности которого нанесены серебряные электроды.

Картриджный вариант пакетного актюатора имеет конструктивную особенность, позволяющую выполнять простое крепление актюатора к механической системе с помощью резьбового соединения для фронтального монтажа. Картриджные актюаторы предназначены для работы в оптико-механических устройствах.

С помощью резьбы осуществляется грубая юстировка зеркала, а точная настройка осуществляется пьезовоздействием.

Чувствительность — точность перемещения стандартных конструкций актюаторов от 0,01 до 0,1 нм.

Эксплуатация пьезоактюаторов в промышленной аппаратуре в течение пяти лет показала их высокую надежность: частота отказа — менее 1%.

На рис. 1 представлены зависимости основных параметров пьезоактюаторов от напряжения, а на рис. 2 — зависимость перемещения (хода) и развиваемой силы.

Зависимость хода и развиваемой силы от напряжения имеет ярко выраженный гистерезис — различие величины при возрастании и падении напряжения. Данное явление определяется свойствами пьезоматериала. Типовые пьезоматериалы имеют гистерезис 15÷20%.

Как видно на рис. 2, величина развиваемого усилия уменьшается с увеличением значения свободного перемещения практически линейно.

В устройствах прецизионного позиционирования необходимо исключить явление гистерезиса в пьезоактюаторах. Это возможно либо путем замены пьезоматериала, либо путем активной стабилизации пьезоактюатора с применением систем управления с обратной связью.

В настоящее время для стабилизации параметров актюаторов используются электрострикционные материалы.

Электрострикционный материал (ниобат магния свинца — титаната свинца типа PMN-PT) позволяет получить такие же перемещения и усилия, как и при применении пьезокерамического материала при малой петле гистерезиса ~ 1%. Электрострикционные актюаторы обладают внутренней стабильностью и способны точно возвращаться в нулевую точку. Получение аналогичных характеристик в пьезоактюаторах возможно только при применении активной обратной связи с установкой датчиков позиционирования для определения действительного положения.

Основным недостатком электрострикционных актюаторов является зависимость их эксплуатационных параметров от температуры окружающей среды. Оптимальный температурный диапазон 15–35 °С, максимальное значение параметров при температуре 25 °С.

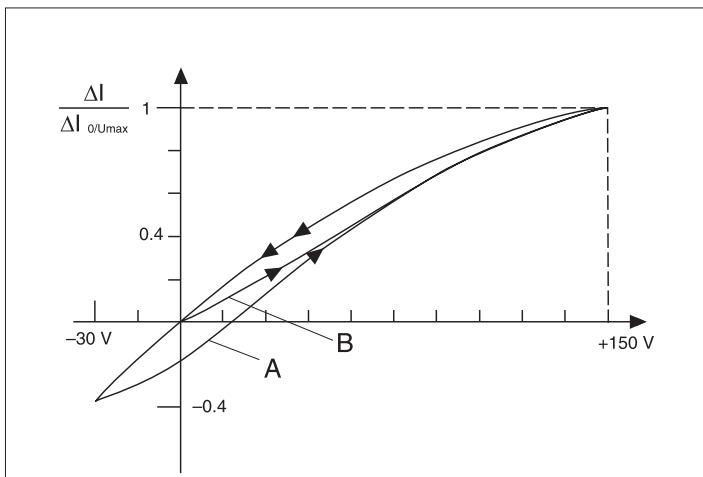


Рис. 1. Нормализованная зависимость ход (x) — усилия (F) от напряжения (A — для биполярного напряжения; B — для однополярного напряжения)

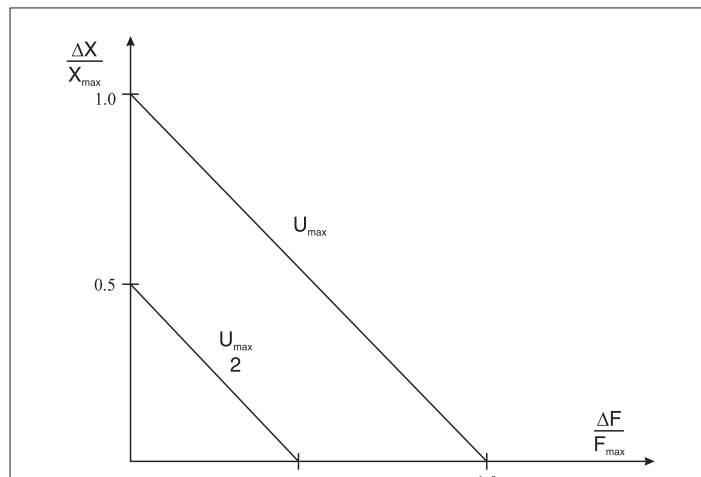


Рис. 2. Нормализованная зависимость хода (x) от усилия (F) для однополярного максимального напряжения (U_max)



Рис. 3. Конструкция многослойного актюатора (1 — внешний электрод; 2 — внутренний электрод)

Высокие значения пьезомодуля ($d_{33} > 2000$ нКл/Н) и диэлектрической проницаемости электрострикционного материала ($\epsilon_{T_{33}}^T \approx 15000\text{--}20000$, тогда как для пьезокерамики $\epsilon_{T_{33}}^T \approx 1500\text{--}3000$) более чем на порядок повышают емкость электрострикционных актюаторов, увеличивая потребление тока, и при этом почти на порядок снижают быстродействие. По этой причине они в основном используются в квазистатическом режиме работы и нашли свое применение в оптической и электронной промышленности в устройствах квазистатических перемещений при стабильных условиях с оптимальным поддержанием температуры окружающей среды $+25\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$).

В настоящее время осуществляется широкое внедрение актюаторов в различные области науки и техники, сформулированы основные требования к актюаторам в перспективных приборных разработках для электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности.

Основные области применения:

- прецизионная техника: современные пневматические и гидравлические клапаны с быстродействием до 10 мкс;

- интеллектуальное управление работой двигателя: предварительный впрыск топлива в двигателях автомобилей и последующее управление аналоговой схемой основного впрыска;
- системы оптической оптоволоконной линии связи — стыковка и подстройка оптических волокон, волоконных лазеров;
- прецизионный контроль и точное позиционирование технологического оборудования в электронном производстве;
- автоустойровка и подстройка лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики;
- управление и компенсация вибрации станков, транспортных средств (активное демпфирование вибрации рамы самолетов).

Широкое внедрение актюаторов сдерживает их относительно высокая стоимость и габариты, что связано со сложностью их компоновки в изделиях.

В последние годы созданы недорогие многослойные актюаторы — альтернатива пакетным актюаторам.

Многослойные актюаторы (рис. 3) состоят из чередующихся тонких слоев пьезокерамики и электродов. Толщина керамического слоя обычно 20–100 мкм. В многослойном актюаторе каждый слой соединен с последующим слоем электрически параллельно. Перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев.

Преимущество конструкции заключается в том, что для заданного уровня деформации требуется напряжение в N раз ниже (N — количество слоев, обычно от 10 до 40), чем в монолитном исполнении с теми же размерами.

Многослойные актюаторы изготавливают по стандартной технологии многослойных конденсаторов. На начальном этапе формируется пакет из тонкослойных пластин или шайб.

При большом давлении пакет уплотняется и спекается при высокой температуре.

Образуется многослойный керамический блок с параметрами, близкими к теоретическому пределу монолитной керамики.

В отличие от пакетных актюаторов, многослойные актюаторы имеют более высокую жесткость и деформацию и, соответственно, более высокую резонансную частоту и быстродействие. Они способны развивать значительные усилия пропорционально площади сечения (сечение 1×1 мм² может создать усилие до 1000 Н).

В настоящее время сформулированы основные области применения многослойных актюаторов:

- системы впрыска топлива — управление клапанами с быстродействием $\sim 1\text{--}10$ мс при максимальном ходе 3–5 мкм и усилием до 5 кН;
- системы гашения вибрации, усилие до 100 кН;
- системы торможения и системы подвески автомобиля;
- оптико-механические устройства с системой активной стабилизации;
- системы гашения вибрации корпуса и крыла самолета с целью снижения уровня шума до 40–10 дБ и т. д.

Внедрение актюаторов позволит повысить надежность, безопасность и комфорт современных автомобилей, существенно сократить расход топлива за счет оптимизации режима работы двигателя.

В России основным разработчиком и производителем пьезоактюаторов является ОАО «ЭЛПА». В настоящее время с целью удовлетворения современных требований к пьезоактюаторам в ОАО «ЭЛПА» проводятся исследования и разработки новых типов пьезоактюаторов на базе современных технологий. Новая конструктивно-технологическая база позволяет выпускать по требованиям заказчика уникальные образцы пьезоактюаторов, в полной мере соответствующих уровню разработок лучших аналогичных зарубежных образцов.