

Содержание

1.	■ Пакетные актюаторы. Обзор	7
1.1	Основные правила	7
1.2	Характеристики пакетных пьезоактюаторов: Шаг (сдвиг) — баланс сил — динамика — предел работоспособности	9
1.3	Конструкции пакетных пьезоактюаторов	11
2.	■ Базовая конструкция пакетных актюаторов	12
2.1	Пьезомеханический эффект	12
2.2	Сравнение высоковольтных и низковольтных пьезоактюаторов	12
2.3	Компоновка пакета	14
2.4	Сравнение кольцевых пакетных пьезоактюаторов и пьезоцилиндров	15
2.5	Сравнение кольцевых и сплошных дискретных пакетных актюаторов	16
2.6	Преимущества пакетных актюаторов компании APC International Ltd.	17
3.	■ Прецизионное позиционирование	19
3.1	Зависимость хода (шага) от характеристики управляющего напряжения	19
3.2	Прецизионное позиционирование с помощью пакетных пьезоактюаторов	21
3.3	Пределы точности позиционирования	22
4.	■ Ход и силы	23
4.1	Не только простое позиционирование	23
4.2	Примеры соотношения сила/ход	24
4.3	Пьезоактюатор как активная пружина	25
4.4	Выбор пакетного пьезоактюатора	25
4.5	Генерирование силы	27
4.6	Жесткость пьезоактюатора	29
4.7	Предел сил, нагрузочные характеристики	31
4.8	Динамическая работа	31
4.9	Механическое предварительное напряжение (предварительная нагрузка)	32

Содержание

5.	■ Работа актюатора в динамическом режиме	35
5.1	Определения	35
5.2	Кратковременное возбуждение	36
5.3	Долговременная работа	37
5.4	Типовые рабочие частоты	38
5.5	Резонанс	40
6.	■ Расширенные возможности, опции	42
6.1	«Термостабилизация» — управление теплоотводом	42
6.2	Контроль температуры	43
6.3	Работа при низких температурах	43
6.4	Контроль позиционирования	44
6.5	Другие модификации Увеличенное предварительное механическое напряжение — Работа в условиях вакуума — Вращающиеся системы — Немагнитные структуры — Специальные материалы	45
7.	■ Инструкция по эксплуатации	46
7.1	Основные комментарии по надёжности пьезоактюаторов	46
7.2	Первичная проверка пьезоактюаторов	47
7.3	Правила установки	48
7.4	Обращение и работа с пьезоактюаторами Механические аспекты — Электрические аспекты — Температурные аспекты	49
7.5	Адгезивы — электрические контакты — химические составы	54
7.6	Другие аспекты Влияние окружающей среды — Работа в вакууме — Работа в атмосфере инертных газов и водорода — Работа в условиях радиации — Работа в условиях космоса	56
8.	■ Свойства пьезокерамических материалов	57
	Зависимость хода от напряжения питания — Гистерезис — Параметры пьезоматериалов — Температурная зависимость параметров — Специальная керамика (ультразвуковая пьезокерамика, электрострикционные материалы)	

Содержание

9.	■ Электрическое питание пьезоактюаторов	62
9.1	Электрический вход и пьезомеханическая реакция Электрические помехи — Пиковые токи — Средние токи — Баланс энергия/мощность — Рассеяние энергии — Однополярное/полубиполярное/биполярное возбуждение	62
9.2	Альтернатива — управление зарядом вместо напряжения	66
9.3	Основные органы управления усилителей для пьезоактюации	68
10.	■ Выбор подходящего пьезоактюатора	69
11.	■ Новые тенденции в применении пьезоактюаторов	70
11.1	Тестирование материалов с помощью пьезоактюации	70
11.2	Управление перемещением	72
11.3	Генерирование электрической энергии Датчики силы — Утилизация энергии, генерирование энергии — Пьезотрансформаторы	73
	О компании APC International, Ltd.	75

Актюатор (Actuator):

механический актюатор — синоним мотора, генератора, интерполятора, двигателя, часто используемый в контексте с линейным перемещением в пределах ограниченного диапазона.

Термин «мотор» обычно применяется к вращающимся приводам с нелимитированным периодом однопольного действия.

Интеллектуальные (умные) материалы (Smart materials):

специальные материалы, обладающие управляемыми свойствами и параметрами за пределами классических характеристик.

Твердотельные материалы (Solid-state materials):

материалы, имеющие индуцированную деформацию: память форм сплавов, пьезоэффект, магнитострикцию.

Растворы (расплавы) (Liquids):

электро- и магнитореологические системы с управляемой вязкостью.

Твердотельные актюаторы (Solid-state actuator):

все типы актюаторов на основе твердотельных материалов, обеспечивающие управляемое (контролируемое) передвижение (сдвиг) или генерирование силы за счёт внутренней структуры или характеристик строения материала (эффекта движущей силы).

Пьезоактюатор (Piezo-actuator):

твердотельный актюатор, использующий обратный пьезоэлектрический эффект. Синонимы: пьезоповторитель, пьезопреобразователь.

Пакетный пьезоактюатор (Piezo stack actuator):

актюатор, меняющий свою (пьезопакета) длину под воздействием электрического возбуждения, в отличие от других подвижных профилей таких, как сдвиговые элементы или изгибные элементы (биморфы).

Пьезомеханика (Piezo-mechanics):

более краткая формулировка «обратного пьезоэлектрического» эффекта, описывающая его применение для построения моторов или актюаторов (в отличие от «прямого пьезоэлектрического» эффекта).

Интеллектуальная структура (Smart structure):

механическая структура, построенная с применением интеллектуальных материалов с целью обеспечения электрического управления ее механическими параметрами.

Адаптроника (Adaptronics):

в противоположность «мехатронике» или «интеллектуальным структурам» исследует механические системы, в основном использующие «интеллектуальные материалы» совместно со сложной электроникой, с целью достижения «обучающего процесса» и самоадаптации систем для достижения их оптимального поведения.

Синонимы:

актюаторный сдвиг, перемещение

(Actuator displacement) =

ход (stroke) =

смещение (shift) =

удлинение (expansion) =

растяжение (elongation).

Пакетные актюаторы. Обзор

1.1 Основные правила

Пакетные пьезоактюаторы используются как линейные приводы или моторы. Они действуют, в основном, как расширяющиеся элементы (толкатели), генерируя силу сжатия. Полный цикл перемещения почти пропорционален напряжению входного сигнала как для постоянного тока, так и для высоких частот.

С электрической точки зрения поведение пьезоактюаторов подобно поведению электрических конденсаторов.

Вызываемое перемещение также может быть охарактеризовано, как результат изменения совокупности электрических зарядов (ёмкости) пьезоактюатора.

Пакетные пьезоактюаторы изготавливаются из специальных интеллектуальных материалов — электроактивной пьезокерамики ЦТС (Цирконата-Титаната-Свинца).

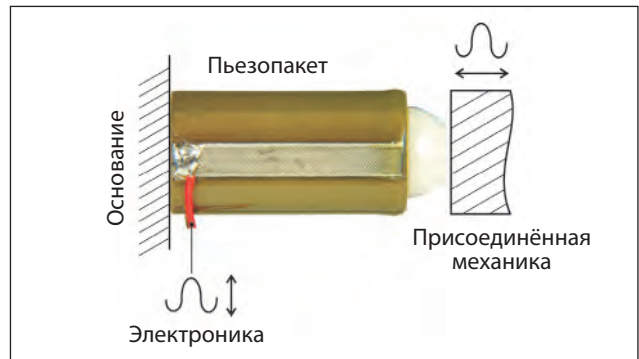


Рис. 1.1. Схема пьезомеханической системы, основанной на пакетном пьезоактюаторе, установленном на массивном основании. Перемещение присоединённой механики происходит за счёт растяжения пьезоактюатора, вызываемого электрическим сигналом.

Основные характеристики пакетных пьезоактюаторов

- Небольшой ход
- Генерирование значительной силы
- Большая механическая нагрузка
- Большая деформация (низкий коэффициент упругой податливости)
- Высокая динамика

1.1 Основные правила

Рекомендации при принятии решения об использовании пьезотехники

- Удостоверьтесь в том, что только пьезоактюаторы, а не другие альтернативные решения (например, электромагнитные приводы), способны решить вашу задачу. Пьезоактюаторы при сравнении проигрывают с точки зрения стоимости.
- Проанализируйте тщательно вашу задачу с целью определения силовых и сдвиговых параметров. Обратите внимание на то, чтобы пьезоактюатор подходил к вашей механической конструкции. Только хорошо согласованная пьезомеханическая конструкция позволит раскрыть все достоинства пьезоактюатора, включающие в себя высокую надёжность, повторяемость и значительный срок службы.
Простая замена в существующей механической системе обычного привода на «инновационный» пьезоактюатор, как правило, результатов не даёт. Система должна быть сконструирована с учётом использования пьезоактюатора.
- Не существует универсального пьезоактюатора общего назначения, который смог бы обеспечить на 100% решение всех существующих задач. Пьезоактюаторы обычно оптимизируют под определенный профиль операций. Степень оптимизации не всегда ясно указывается в спецификации. В связи с этим необходимо внимательно решать вопрос замены пьезоактюатора одного производителя на актюатор другого.
- Технологические данные на изделие зависят от определенных условий тестирования. Пьезоактюаторы могут показывать различные характеристики, когда работают в разных направлениях. Определения в спецификациях разных поставщиков также могут отличаться. В связи с этим при сравнении изделий от разных поставщиков следует обращать внимание на определение (дефиницию) параметров изделия.

- Срок службы и надёжность актюаторов сильно зависят от большого разнообразия взаимодействующих рабочих параметров и условий конкретного применения.
В связи с этим не представляется возможным установить простую процедуру тестирования, пригодную для отдельного элемента, с целью определения его надёжности для всех операций. Единственным выходом является системное тестирование в ходе реальной работы.
Даже для действующей пьезомеханической системы потребность в небольшом изменении условий перемещения потребует новых исследований стабильности.

Не трактуйте ошибочно данные каталога

Заметьте, что не все рабочие характеристики могут быть реализованы одновременно из-за простых физических факторов.

Например:

- Максимальный ход/смещение/сдвиг и максимальная генерируемая сила/максимальная блокирующая сила не могут быть достигнуты одновременно, только или-или.
- Действительная рабочая частота пьезомеханической системы обычно гораздо ниже собственной резонансной частоты пьезоактюатора!

1.2 Характеристики пакетных пьезоактюаторов

Ход (смещение) — баланс сил — динамика — предел работоспособности

На **рис. 1.2** показан твердотельный актюатор, изготовленный путем пакетирования слоёв пьезокерамики ЦТС, в котором электрические контакты выполнены по технологии многослойной конденсаторной структуры. Приложенное к пакету электрическое напряжение вызывает электрическое поле между слоями пьезокерамики, что в свою очередь приводит к **механической деформации** пьезопакета. Вызванное (генерированное) осевое увеличение **длины пьезопакета L** используется для актюации. Стыковка с дополнительной механикой осуществляется через торцевые поверхности (площадь поперечного сечения A).

Достижимый максимум деформации обычно лежит в диапазоне от 0,1 до 0,15% длины пьезопакета L. Пьезопакет длиной $L = 50$ мм обычно обладает механической деформацией на уровне 50...70 мкм.

Максимальная нагрузка и максимальная генерируемая сила пьезоактюатора зависят от площади поперечного сечения A. Нагрузка и сила ограничиваются величиной в диапазоне 7...8 кН/см² (70...80 МПа).

Механическая рабочая мощность пьезоактюатора — это произведение величины шага на развиваемую силу, т. е. она пропорциональна **активному пьезокерамическому объёму** актюатора, который выражается произведением длины пьезопакета на площадь его поперечного сечения $L \times A$.

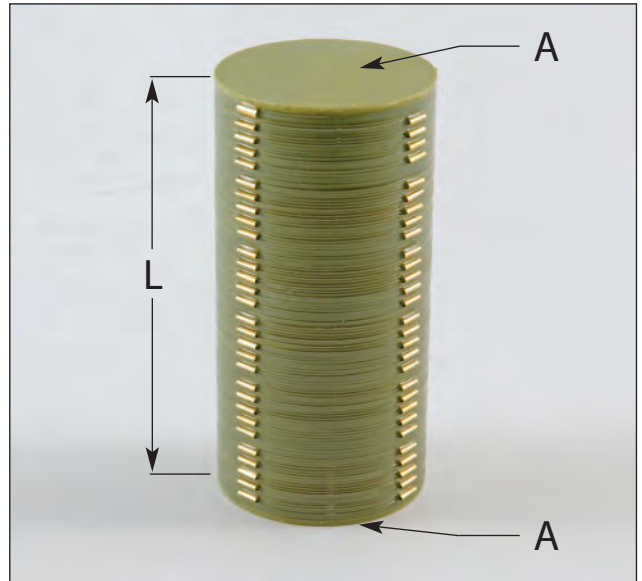


Рис. 1.2. Пьезопакет, набранный из отдельных пьезокерамических дисков, электрически соединённых между собой.

Рабочая ось: длина L.

Активная площадь поперечного сечения A (механическая стыковочная поверхность).

1.2 Характеристики пакетных пьезоактюаторов

Специфические свойства пакетных пьезоактюаторов

Ход

Нелимитированная чувствительность к позиционированию (проведены испытания вплоть до пикометрического диапазона).

Силы

- Высокая степень допустимой нагрузки до тонн.
- Значительное генерирование силы/давления (килоньютоны).
- Великолепное соотношение большой полезной нагрузки и динамической силы модуляции.
- Низкая механическая податливость (высокие собственные частоты) твердотельного пакета!

Динамика (также зависит от электроники)

- Нет задержки механической реакции (диапазон микросекунд).
- Очень высокие уровни ускорения.
- Очень высокий уровень генерации механической мощности.

Преимущества конструкции

- «Экзотические» возможности условий работы (вакуум, криогенные температуры и т. п.).
- Компактная конструкция.
- Высокий уровень генерирования удельной механической мощности даже при миниатюрном исполнении в MEMS/НЕМС-структурах (MEMS/NEMS).
- Необходимость в потреблении энергии только в момент работы.
- Отсутствие необходимости в потреблении энергии в режиме ожидания или в режиме опоры.

Характеристики актюаторов, предлагаемых на современном рынке

Ход

Длина пьезопакета коммерческих актюаторов лежит в пределах 2...100 мм, что позволяет им иметь ход в ориентировочном диапазоне 1...100 мкм.

Силы

Пьезопакеты с маленькой и средней площадью поперечного сечения (приблизительно до 10 × 10 мм²) способны развивать силу от десятков до нескольких тысяч ньютонов. С этой точки зрения предпочтительнее низковольтные пьезоактюаторы.

Динамика

- В значительной степени зависит от размеров актюатора.
- Нерезонансная циклическая работа с максимальной деформацией: < 1 кГц.
- Нерезонансная циклическая работа со сниженной деформацией: < 1 кГц.

Пределы работоспособности

Таковыми обладают специальные пьезоактюаторы — это дорогие, с необычными свойствами, в основном пригодные для изготовления прототипов или выполнения единичных задач.

Ход

Высоковольтные, с длиной пьезопакета более 600 мм обладают ходом до 1 мм (1000 мкм).

Силы

Пьезопакеты с большой площадью поперечного сечения и диаметром до 70 мм способны выдерживать максимальную нагрузку или обеспечивать блокирующую силу более 100 кН. В основном это высоковольтные пакетные актюаторы.

Динамика

Пьезоударные (шоковые) генераторы при времени нарастания < 10 мкс и ходе 100 мкм способны обеспечить ускорение > 100 000 м/с².

1.3 Конструкции пакетных пьезоактюаторов

Низковольтные пьезоактюаторы. Совместно спечённые многослойные актюаторы (СМА), также называемые «монолитные» пьезопакеты, не склеиваются. Слои пьезокерамики с электродами, собранные в пакет, спекаются при высокой температуре. Для таких актюаторов характерно прямоугольное поперечное сечение, что определяется технологией резки при их производстве. Низковольтные актюаторы имеют пьезопакеты с маленькой и средней площадью поперечного сечения от 1 мм² до приблизительно 14 × 14 мм (рис. 1.3, В). Рабочее управляющее напряжение для таких актюаторов лежит в пределах до 200 В.

Высоковольтные пьезоактюаторы. Композитные структуры, изготавливаемые путем пакетирования отдельно изготовленных пьезокерамических дисков и электродов из металлической фольги, собираются вместе путем склеивания. Наиболее распространена цилиндрическая форма таких актюаторов. Высоковольтные актюаторы имеют гораздо большее поперечное сечение пьезопакета по сравнению с низковольтными (рис. 1.3, А, С). Рабочее напряжение для таких актюаторов лежит в пределах от 500 до 1000 В.

Кольцевые пьезоактюаторы. Такие актюаторы изготавливаются из пьезокерамических колец, поэтому имеют пространство внутри, в отличие от сплошных пьезоактюаторов, пакеты которых набираются из пьезокерамических дисков или пластин. Благодаря внутреннему пространству они позволяют осуществлять внутренний монтаж механических элементов пьезомеханической сборки (рис. 1.3, С, D, E). Следует отметить, что производство кольцевых актюаторов требует более кропотливой и тщательной сборки, в связи с чем они дороже сплошных. Кольцевые пьезоактюаторы выпускаются как в высоковольтном, так и в низковольтном исполнении. Низковольтные и высоковольтные актюаторы не отличаются с точки зрения **пьезомеханической эффективности** (ход, силы, динамика, разрешение).

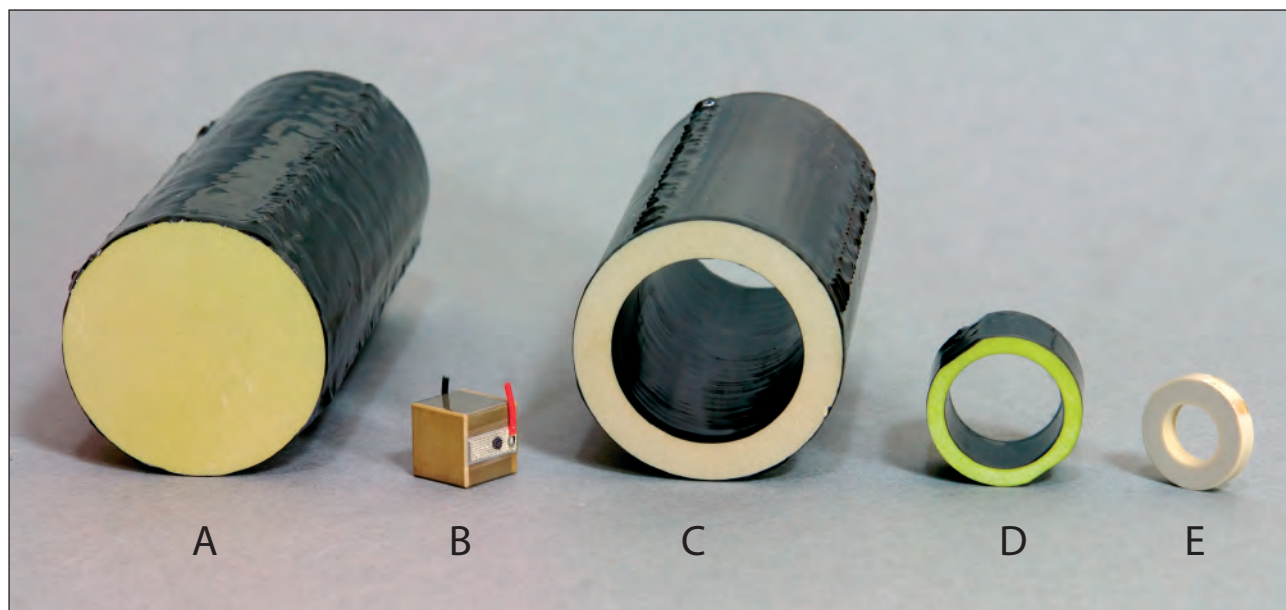


Рис. 1.3. А, С — высоковольтные сплошной (дисковый) и кольцевой пьезоактюаторы с большой площадью поперечного сечения; В, D — низковольтные сплошной (прямоугольный) и кольцевой пьезоактюаторы; Е — кольцевой чип.

Базовая конструкция пакетных актюаторов

2.1 Пьезомеханический эффект

Пакетные пьезоактюаторы являются многослойными электрическими конденсаторами, чьи наружные размеры изменяются, когда меняется величина их электрического заряда. Для целей актюации обычно используется осевое изменение размеров (осевая деформация).

Механическая реакция пьезоактюатора, ход и равновесие сил, зависят от приложенного внутреннего электрического поля (нормальное значение которого составляет до 2 кВ/мм). Для получения вышеуказанного уровня напряжённости поля при приемлемом

уровне напряжения (от 100 до 1000 В) толщина каждого слоя пьезопакета должна быть соответственно адаптирована: например, 0,5 мм на 1000 В для высоковольтного актюатора (см. **рис. 1.2**).

2.2 Сравнение высоковольтных и низковольтных пьезоактюаторов

Для изготовления высоковольтных и низковольтных пакетных актюаторов используются две совершенно разные технологии.

- Низковольтные пакетные актюаторы (до 200 В управляющего напряжения): вначале собирается пакет из пьезокерамических слоёв и слоёв металлических электродов. Пьезокерамические слои находятся в мягкой, т. н. «зелёной» стадии. Внутренние электроды представляют собой металлическую фольгу из серебро-палладиевого сплава или меди толщиной около 1 мкм. После сборки пакет спекается при высокой температуре. Такая технология производства пьезоактюаторов называется «монокристаллическое совместное спекание» («monolithic sintering»).
- Высоковольтные пакетные актюаторы с управляющим напряжением от 500 до 1000 В изготавливаются из уже спечённых готовых отдельных ЦТС пьезокерамических дисков или прямоугольных пластин. Внутренние электроды представляют собой отдельные элементы, изготовленные из тонкой металлической фольги. Весь пакет собирается и фиксируется с помощью специального высококачественного клеевого состава. В связи с этим высоковольтные пьезокерамические пакетные актюаторы являются композитной (дискретной) сборкой, а не монокристаллической.

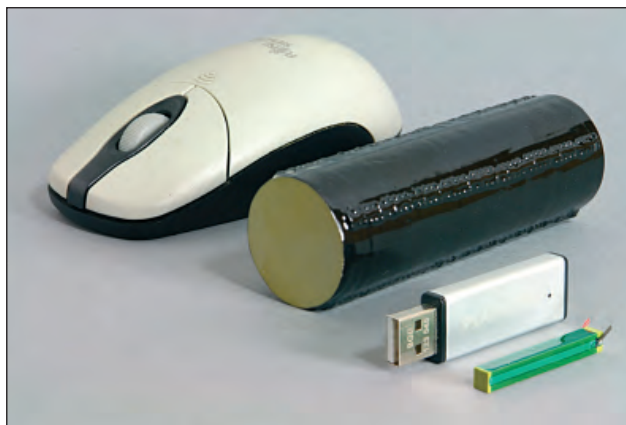


Рис. 2.1. Высоковольтный пакет (чёрный слева) и низковольтный (зелёный справа).

2.2 Сравнение высоковольтных и низковольтных пьезоактюаторов

	Высоковольтные	Низковольтные
Площадь поперечного сечения	большая, >15 мм ²	маленькая и средняя
Толщина одного пьезоэлемента, слоя, типовое значение	до 0.5 мм	до 0.1 мм
Технология производства	склеивание поляризованных ЦТС пьезоэлементов (дисков, пластин)	пакетирование мягких, неспечённых слоёв ЦТС-пьезокерамики и электродов с последующим спеканием всего пакета
Максимальное напряжение питания	500...1000 В	до 200 В
Максимальное электрическое поле (типовое значение)	2 кВ/мм	2 кВ/мм
Электрическая ёмкость на см ³ (только порядок величины)	100 нФ	2.5 мкФ
Модуль упругости	ниже, если нет предварительного механического напряжения	высокий, около 90% от теоретического значения оригинальной ЦТС пьезокерамики
Максимальная деформация	0.1...0.15%	0.1...0.15%
Максимальное усилие сжатия	одинаковое для высоковольтных и низковольтных	
Максимальная генерируемая сила	одинаковая для высоковольтных (с предварительным механическим напряжением) и низковольтных	
Точность позиционирования	одинаковая для высоковольтных и низковольтных	
Максимальная плотность энергии (зависит от ЦТС-материала)	около 0.3 Вт·с/см ³	около 0.3 Вт·с/см ³

2.3 Компоновка пакета

Большинство покупателей связывают функциональность пакетных пьезоактюаторов только с использованием пьезокерамического материала. Однако опыт работы показывает, что для обеспечения высоких характеристик и надёжности крайне важны все аспекты конструкции пьезопакета, технология производства и доводка всего изделия.

Специальное внимание следует уделять следующим аспектам:

- технологии сборки,
- конструкции электродов,
- технологии внутренней изоляции,
- технологии внешней изоляции.

Все структурные элементы пакетного пьезоактюатора во время динамической работы подвергаются воздействию большой меняющейся механической и электрической нагрузки.

Дальнейшее расширение функциональных возможностей пакетных актюаторов заключается в использовании металлического корпуса с механизмом предварительного механического напряжения (рис. 2.2), а также других опций, таких как встроенная система теплоотвода, встроенный датчик позиционирования и т. п. (см. главу 6).

Это заставляет применять различные уровни надёжности в случае разработки различных концепций актюаторов для их специфического применения.

Пьезопакеты от различных производителей отличаются не только разными пьезоматериалами, но также и различной технологией производства. Эти отличия не обязательно отражаются в кратких технических характеристиках. В случае, когда применение актюатора требует высокой надёжности, следует внимательно изучать параметры предлагаемого пакетного пьезоактюатора.

Компания APC International предлагает широкий выбор пакетных актюаторов: от общего назначения для низкого и среднего динамического применения до специально сконструированных актюаторов, предназначенных для очень высокой механической динамики.

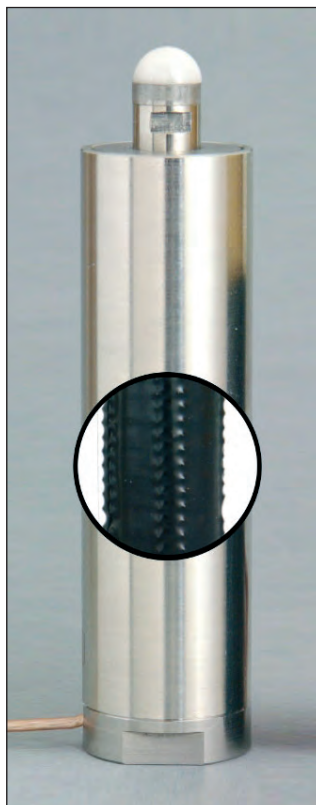


Рис. 2.2. Схема интеграции пьезопакета в корпус с предварительным механическим напряжением.

2.4 Сравнение кольцевых пакетных пьезоактюаторов и пьезоцилиндров

Пьезокерамический цилиндр представляет собой простую пьезокерамическую трубку, на внутренней и внешней стенках которой нанесены электроды.

Для обеспечения механической стабильности толщина стенки такой трубки должна быть не менее 0.5 мм (рис. 2.3, А). Для получения максимального смещения (сдвига) к электродам прикладывается высокое напряжение.

Пьезоцилиндры иногда используются как простой позиционирующий механизм, когда необходим доступ к осевой части системы.

Гораздо лучшей альтернативой пьезоцилиндру является кольцевой пакетный пьезоактюатор (рис. 2.3, В). Обладая внутренним диаметром, кольцевой пьезоактюатор по сути является полым пьезокерамическим цилиндром, но с большим диапазоном расчётных возможностей для пьезомеханики.

Компания APC International впервые вышла на рынок с кольцевыми актюаторами в 80-х годах прошлого века.

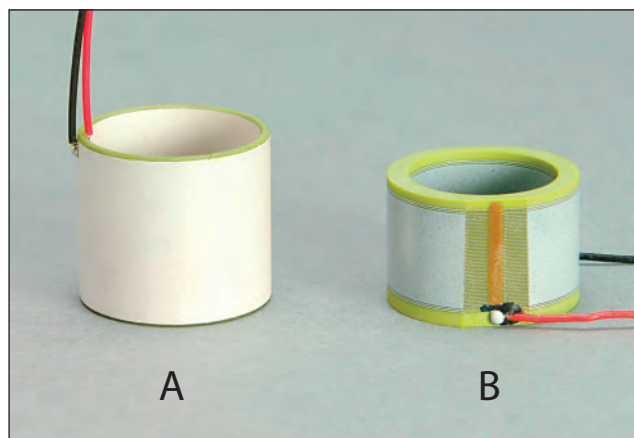


Рис. 2.3. Пьезокерамический цилиндр (А) и пакетный цилиндр, или кольцевой актюатор (В)

По сравнению с пьезокерамическим цилиндром кольцевой пакетный пьезоактюатор обладает следующими преимуществами:

- возможность обеспечения более высокого уровня деформации (за счёт почти в два раза большей эффективности осевой деформации),
- **возможность применения низковольтного управления,**
- толщина стенки не связана с уровнем управляющего напряжения.

Внимание:

В пьезокерамическом цилиндре используется сжимающий пьезоэффект (мода колебаний d_{31}).

Работа кольцевого пакетного актюатора основана на растягивающем пьезоэффекте (мода колебаний d_{33}), обладающем удвоенной деформацией по сравнению с модой колебаний d_{31} .

Такая разница в использовании моды колебаний должна всегда учитываться при построении пьезомеханических систем, например, при проектировании системы управления с обратной связью.

2.5 Сравнение кольцевых и сплошных дискретных пакетных актюаторов

Кольцевые пакетные дискретные актюаторы обладают специфическими возможностями и преимуществами по сравнению со сплошными пакетными дискретными актюаторами:

- Большая изгибная устойчивость.
Если сравнивать два актюатора с одинаковым объёмом активного пьезокерамического материала, то кольцевой актюатор будет иметь больший общий диаметр, чем сплошной актюатор. Это важно в том случае, когда пьезопакеты при большом сдвиге имеют критическое соотношение длина/диаметр. Для компенсации этого необходимо увеличивать диаметр пакета.
При сплошной конструкции актюатора электрическая ёмкость сильно увеличивает только механическую стабильность. Эквивалентно увеличивается и потребление энергии, что не сказывается на механических характеристиках. Общая отдача мощности падает (рассогласование).
При использовании кольцевых актюаторов с внутренним полым объёмом механическая стабильность улучшается без увеличения электрической ёмкости.

- Эффективное охлаждение.
Во время работы в динамическом режиме с большим количеством циклов пьезоактюаторы выделяют значительное количество тепла. В связи с этим, существует необходимость отвода тепла от пьезопакета. В противном случае перегрев может привести к ухудшению характеристик актюатора и/или к его поломке.
Это объясняется тем, что пьезокерамика имеет малую удельную тепловую проводимость. Количество тепла, выделяемого пьезокерамическим объёмом, зависит от длины пакета, выделяющего тепло, а также от величины поверхности актюатора. Как раз по этим параметрам кольцевой актюатор и превосходит сплошной (см. раздел 5.3).
Таким образом, кольцевой актюатор, в отличие от сплошного, может работать с частотой, значительно превышающей резонансную, без риска перегрева.

Кольцевой пакетный актюатор — более сложный в производстве и более дорогой в сравнении со сплошным дискретным пакетным актюатором.

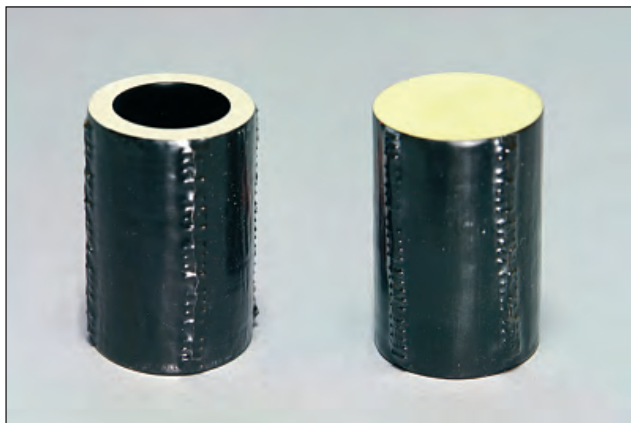


Рис. 2.4. Кольцевой и сплошной пакетные актюаторы.

2.6 Преимущества пакетных актюаторов компании APC International Ltd.

Все структурные компоненты пьезоактюаторов подвергаются потенциально высоким нагрузкам не только во время их работы, но и в процессе их транспортировки, хранения и монтажа.

Внимание: пьезокерамические компоненты являются механически чувствительными устройствами.

- Локальные концентрации механического напряжения потенциально создают «трещины» в пьезокерамике, приводящие к ослаблению её электрической «стабильности».
- Электрическая и механическая стабильность электродов питания (проводников) также важна для обеспечения надёжности работы актюатора в динамическом режиме.

С целью устранения подобных рисков компания APC International для различных случаев применения пакетных актюаторов использует две различные технологии изоляции:

ИЗНП («OSI-конструкция»):

Данную технологию APC International использует для изготовления:

- высоковольтных дискретных пакетных актюаторов с напряжением питания 500 и 1000 В (PSt 500/1000 и HPSt 500/1000),
- низковольтных дискретных и монокристаллических пакетных актюаторов с напряжением питания 150 В (PSt 150 и HPSt 150).

Изоляционный зазор изготавливается снаружи пьезопакета (**рис. 2.6**). Поэтому 100% площади пьезокерамики в пакете покрыто внутренними электродами и активируется гомогенно. Такая технология изоляции обеспечивает актюатору:

- самые высокие характеристики,
- отсутствие локальных искажений полей и т. п.,
- отсутствие локальных точек механического стресса, вызывающих растрескивание пьезокерамики с дальнейшими последствиями,
- высокую стойкость пьезопакета по отношению к изгибающим силам.

- Важной конструкторской задачей является обеспечение необходимого изоляционного зазора между разнополярными внутренними электродами и электродами питания. Особое внимание следует обратить на локальное искажение электрического поля вблизи такого изоляционного зазора. У пьезомеханических повторителей (актюаторов) это искажение ведёт к локальной концентрации механического стресса с последующим развитием трещины и потенциальному выводу из строя пьезопакета вследствие короткого замыкания.

- изоляционный зазор на пьезопакете (ИЗНП) — «OSI (on stack insulation) design»,
- изоляционный зазор внутри пьезопакета (ИЗВП) — «ISI (in stack insulation) design».

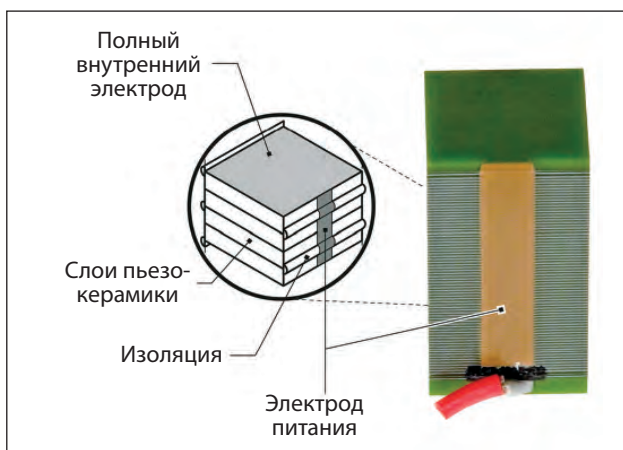


Рис. 2.6. ИЗНП (OSI) — изоляционный зазор на пакете

2.6 Преимущества пакетных актюаторов компании APC International Ltd.

ИЗВП («ISI-конструкция»): данная технология используется APC International для производства:

- низковольтных монокристаллических пакетных актюаторов с напряжением питания 200 В (PSt-HD200),
- низковольтных пьезочипов с напряжением питания 150 В (PCh150 и HPCh150).

Изоляционный зазор изготавливается внутри пьезопакета, что является широко распространённой «классической» технологией (**рис. 2.7**).

При такой технологии изготовления внутренних электродов активизируется не весь объём пьезопакета. В результате характеристики актюаторов снижены из-за уменьшения активной площади поперечного сечения слоёв.

Это, в свою очередь, создаёт концентрацию точек механического напряжения в пакете.

Во избежание развития трещин и их разрастания применяются различные контрмеры.

Одной из таких мер является применение пазов, или желобков, в поверхности пьезопакета для создания т. н. «мягкой поверхности», которая снижала бы концентрацию механических стрессов.

ИЗВП («ISI») пакетные актюаторы в большей степени подвержены воздействию изгибающих сил в сравнении с ИЗНП («OSI») актюаторами, что определяется уменьшением поверхности за счёт наличия пазов.

С целью увеличения механической стабильности пакетные актюаторы с электродами ИЗВП («ISI»), как правило, изготавливаются со встроенной системой предварительного механического напряжения.

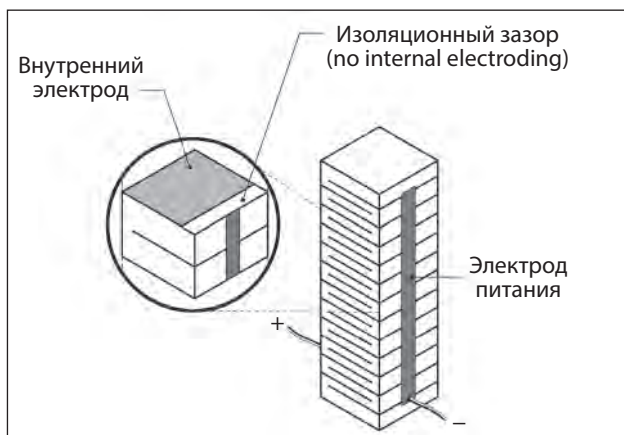


Рис. 2.7. ИЗВП (ISI) — изоляционный зазор внутри пакета.

Электроды с высокой усталостной прочностью

Все пакетные пьезоактюаторы имеют электроды (проводники) питания, прикреплённые к пьезопакету на боковую поверхность. Эти проводники подвергаются значительным нагрузкам и ускорениям, вызываемым механическим напряжением во время динамических циклов работы актюатора.

В дополнение к этому они находятся под воздействием нагрузки большого электрического тока. В связи с этим необходимо применять специальную технологию для изготовления контактов, способных передавать пьезокерамической структуре большие мощности без потерь.

APC International обладает всеми этими технологиями. Соответствующие изоляция и технология изготовления контактов позволяют производить пьезокерамические актюаторы, надёжно работающие в условиях высоких уровней мощности.

Прецизионное позиционирование

Пьезоактюаторы находят широкое применение при выполнении задач по прецизионному позиционированию, когда компонент должен перемещаться от одной точки к другой с субмикронной точностью.

Большинство пьезомеханических систем, работающих в этой области, имеют особую отличительную характеристику — практически не должно быть изменения баланса внутренней силы системы, возникающего во время работы пьезоактюатора. Только в этом случае можно достичь максимального расширения динамического диапазона пьезопакета.

Пакетный пьезоактюатор за счёт деформации пьезопакета удлиняется в то время, когда он заряжается от управляющего напряжения, меняющегося в диапазоне от U_{\min} до U_{\max} . Обратный ход актюатора происходит тогда, когда он разряжается.

Максимальная (допустимая) деформация составляет около 0.1...0.15% от длины актюатора. Чрезмерная деформация за счёт создания слишком большого электрического поля неблагоприятно влияет на надёжность актюатора.

При субрезонансной работе перемещение пьезопакета мгновенно следует за приложенным напряжением управляющего сигнала. Электрическое поведение пьезоактюатора подобно поведению электрического конденсатора.

При прецизионном позиционировании управление актюатором осуществляется электрическим напряжением.

Шаг (сдвиг) пьезомеханической системы может быть увеличен за счёт использования рычажного механизма, у которого без особых проблем достигается коэффициент усиления $n = 10$.

Но при этом следует иметь в виду, что:

- допустимая нагрузка снижается на величину $1/n$,
- коэффициент упругой податливости всей системы увеличивается на n^2 по сравнению с данными пьезопакета.

3.1 Зависимость хода (шага) от характеристики управляющего напряжения

Зависимость хода пьезоактюатора при управлении без системы обратной связи от изменения управляющего напряжения в диапазоне $U_{\min} - U_{\max} - U_{\min}$ выражается хорошо известной кривой гистерезиса (рис. 3.1).

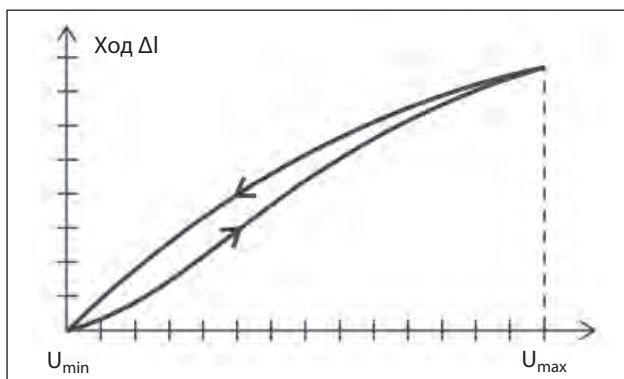


Рис. 3.1. Схематическая диаграмма зависимости хода пьезоактюатора от управляющего напряжения при его циклической работе в диапазоне напряжений $U_{\min} - U_{\max} - U_{\min}$.

Внимание:

Данные в нижеуказанных графиках приведены для справки, а не для практических целей.

- Кривая гистерезисного цикла (рис. 3.1) зависит от диапазона изменения управляющего напряжения. При очень малых изменениях напряжения он более линейный в сравнении с обычной петлей гистерезиса (небольшой сигнал по сравнению с большим сигналом возбуждения).
- Приемлемая повторяемость кривой гистерезиса достигается только после установления баланса, полученного в результате многочисленных циклов работы системы, при условии что другие рабочие параметры, такие как температура, сила и нагрузка, весьма постоянны. Если условия цикличности работы меняются, то система будет подстраиваться в течение определенного числа циклов до тех пор, пока не наступит очередной баланс.

3.1 Зависимость хода (шага) от характеристики управляющего напряжения

- Точный вид диаграммы на **рис. 3.1** зависит от времени цикла. Чем медленнее происходит цикл, тем шире становится петля гистерезиса из-за замедления процессов поляризации в пьезокерамической структуре. Эти процессы вызываются также эффектом крипа, как результат изменения шага (перепада) напряжения, прилагаемого к пьезопакету.
- Когда к пьезопакету со схемой управления без системы обратной связи (в разомкнутой цепи) прикладывается нерегулярное (непериодическое) напряжение, то формируется поле позиций, которое укладывается в петлю «циклического» гистерезиса (**рис. 3.2**).

Другими словами, окончательная позиция пьезопакета в зависимости от приложенного определенного уровня напряжения зависит от «истории» его работы («эффект памяти» на разомкнутую цепь).

С целью исключения необходимости обратной связи в пьезоэлектрических системах прецизионного позиционирования было использовано много разных методов, но успех оказался ограниченным:

- а) с целью компенсации таких «ферроэффектов» ЦТС пьезокерамики, как нелинейность, гистерезис и «эффект памяти», были разработаны алгоритмы для компьютерного управления пьезоактюатором;
- б) вместо ЦТС пьезокерамики стали применять электрострикционную керамику (см. главу 8);
- в) вместо управления пьезоактюатором с помощью напряжения стали применять управление зарядом или током (см. раздел 9.2).

Все эти методики оказались неэффективными, приводили, например, к нелинейности и т. п., и на самом деле не подходили для прецизионного позиционирования без применения системы обратной связи.

Методики а) и б) в обычной практике не применяются, а методика в) оказалась интересной для использования пьезоактюаторов в динамическом режиме при решении других задач, но не для прецизионного позиционирования.

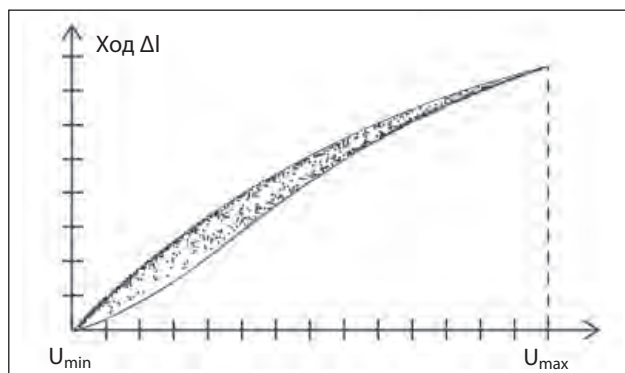


Рис. 3.2. Поле позиций, формируемое изменением непериодического напряжения при отсутствии системы обратной связи. Неопределенность позиционирования при таком управлении составляет около 10% от рабочего диапазона, определяемого U_{min} и U_{max} .

Внимание:

Даже, если будет создан превосходный пьезокерамический актюатор, управляемый без системы обратной связи, то это позволит решить проблемы прецизионного позиционирования только частично. В большинстве случаев пьезоактюатор является первичным источником перемещения, состыкованным с механическими устройствами для передачи этого перемещения к рабочему инструменту. На практике такой механике присущи групповые ошибки. Без определения позиции с высокой точностью и передачи этих данных через обратную связь на блок управления актюатора невозможно выявить эти ошибки, а соответственно невозможна их компенсация, если актюатор не имеет системы обратной связи.

Даже простейшая процедура механической подстройки управляющего напряжения в лабораторных условиях является подобием системы обратной связи: систему обратной связи заменяет оператор, который проверяет правильность результатов (например, получение четкой интерферограммы при настройке оптической системы).

3.2 Прецизионное позиционирование с помощью пакетных пьезоактюаторов

Уникальные параметры пьезоактюаторов:

Практически неограниченная высокая относительная чувствительность позиционирования. Пьезокерамика преобразует крайне малые изменения управляющего напряжения в крайне малые перемещения.

Практически доказано, что уже сейчас можно осуществлять позиционирование в пикометрическом диапазоне.

Как было показано в разделе 3.1, для осуществления прецизионного позиционирования с чувствительностью не хуже 1% от максимального хода пьезоактюатора необходима система обратной связи. С такой системой пьезоактюатор способен выполнить точнейшую корректировку с целью выхода на заданную позицию. В этом случае гистерезис, крип и нелинейность контролируются автоматически.

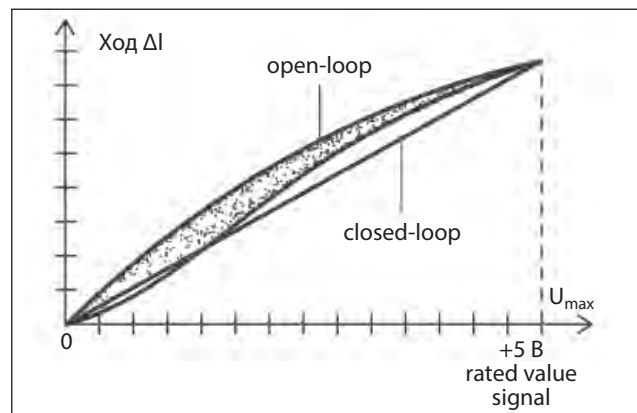


Рис. 3.3. Схематическое сравнение пьезосистемы без (open loop) и с (closed-loop) системой обратной связи.

Внимание:

Философия обратной связи имеет дело только со всеми разъюстировками пьезомеханизма между актюатором и датчиком позиции. Разъюстировки вне пьезомеханизма система обратной связи не компенсирует. Пьезоактюатор с интегрированным датчиком позиции может компенсировать все внутренние рассогласования (гистерезис, крип, нелинейность), а также все эффекты, влияющие на деформацию актюатора (например, изменения нагрузки).