МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

А.А.Бобцов, В.И.Бойков, С.В.Быстров,

В.В. Григорьев

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2011

Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений.- СПБ ГУ ИТМО, 2011.- 131 с.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с разработкой, исследованием и применением пьезоэлектрических преобразователей в качестве исполнительных устройств для микроперемещений. Проблема прецизионного позиционирования оптических элементов, различного инструмента весьма актуальна в наши дни, когда во многих областях науки и техники активно внедряются нанотехнологии, создаются сверхточные оптические и оптико-электронные приборы и системы. Круг задач, где применяются пьезоэлектрические исполнительные устройства постоянно расширяется: это и автомобилестроение, и прецизионное станкостроение, фото- и видеотехника. Представляется, что современный специалист в области приборостроения должны владеть основными вопросами, связанными с проектированием, элементной базой пьезоэлектрических исполнительных устройств, разбираться в их конструктивных особенностях и способах управления. В первом разделе учебного пособия содержится информация о распространении пьезоактивных устройств в различных областях, приводятся конкретные примеры. Дается историческая справка внедрения пьезоэлектрического эффекта в технические системы. Раскрывается физическая природа прямого и обратного пьезоэффектов, предлагается подход к их математическому описанию. Второй раздел пособия посвящен материальной базе пьезоэлектрических исполнительных устройств: от современной пьезокерамики до законченного в своем конструктивном исполнении пьезодвигателя. Анализируются физические свойства различных отечественных и зарубежных пьезоматериалов, даются рекомендации по их применению в исполнительных устройствах. Приводятся аналитические выражения для расчета статических характеристик типовых пьезоэлементов и актюаторов. В третьем разделе рассматривается подход к составлению модели пьезодвигателя на примере многослойного пьезоактюатора с нагрузкой. Опираясь на данный материал, студенты смогут составить математическое описание и других пьезоэлектрических исполнительных устройств. В этом же разделе рассматриваются проблемы, связанные с нелинейностью статических характеристик пьезоактюаторов, называются причины их появления, даются рекомендации по их учету при моделировании. Четвертый раздел содержит рекомендации по структуре и составу функциональных схем цифровых пьезоприводов, рассматриваются часто встречающиеся варианты с регулированием по выходу и подчиненным регулированием. В качестве примеров приводятся системы и приводы, разработанные авторами в

последние годы. Кроме того, учебное пособие содержит ряд приложений с информацией о характеристиках отечественных и зарубежных пьезоматериалов, стандартные ряды отечественных пьезоэлементов и др., что может быть полезным для студентов при выполнении аудиторных и домашних практических заданий.

Рекомендовано к печати Учёным советом Факультета КТ и У, 12.04.2011, протокол №4

Авторы благодарят магистрантов второго года обучения Обертова Д.А. и Гончар А.А. за помощь в обработке и подготовке материалов учебного пособия.

Содержание

Введение……7

1 Пьезопреобразователи, тенденции развития, принцип действия..7
1.1 Тенденции развития и использования пьезоэлектрических исполнительных устройств…… 7
1.2 История открытия пьезоэффекта…… 15
1.3 Явление пьезоэлектрического эффекта…… 17

2 Материально-техническая база пьезоэлектрических исполнительных устройств…… … 24
2.1 Пьезоэлектрические материалы…… 24
2.1.1 Пьезоэлектрики – монокристаллы…… 24
2.1.2 Поликристаллические пьезоэлектрики…… 26
2.2 Пьезоэлементы…… 36
2.3 Пьезокерамические актюаторы…… 45
2.3.1 Пакетная конструкция…… 46
2.3.2 Биморфная конструкция…… 51
2.4 Пьезоэлектрические двигатели. Особенности конструкций.. 55
2.4.1 Резонансный (ультразвуковой) пьезоэлектрический двигатель (РПД)……..… 56
2.4.2 Силовые двигатели с ограниченным диапазоном угловых и линейных перемещений……62
2.4.3 Шаговые двигатели…… 66

3 Математическое описание пьезоэлектрических исполнительных устройств…… 67
3.1 Математическая модель многослойного тонкопленочного актюатора…… 67
3.2 Гистерезис, последействие и ползучесть пьезоэлектрических исполнительных устройств …… 72
3.3 Учет влияния гистерезиса и последействия (ползучести) при проектировании и моделировании пьезоэлектрических исполнительных устройств…… 74

4 Цифровой пьезоэлектрический привод……82

4.1 Пьезоэлктрический привод с регулированием по положению……. 84

4.2 Пьезоэлектрический привод с подчиненным регулированием…… 86

4.3 Система управления многосегментным адаптивным зеркалом телескопа……..…… 89

4.4 Цифровой контрольно-измерительный стенд……. 93
4.4.1 Принцип действия стенда…… 94
4.4.2 Структурная схема измерительной системы…….. 95
4.4.3 Математическая модель процесса измерения…… 97

Литература…… 100
Приложение А……. 101
Приложение Б…… 104
Приложение В…… 106
Приложение Г…… 107
Приложение Д…… 112
Приложение Е…… 116
Приложение Ж…… 120
Приложение З……...…… 123
Приложение И……...… 124
Приложение К…… 125
Приложение Л…… 127
Приложение М……...…… 130
Приложение Н……...… 131

Введение

Во все времена электромеханическим системам отводилось центральное место, уровень их развития определял производственные возможности многих отраслей промышленности, успешность проведения различных научных исследований, боевые качества военной техники, потребительские характеристики товаров народного потребления. Вот и сейчас, когда взят курс на развитие нанотехнологий, в первую очередь должны решаться задачи развития и совершенствования элементной базы электромеханических систем. Для решения различных задач в микрометровом, а тем более в нанометровом диапазоне, потребуются совершенно новые технологии и технические средства. Самой актуальной проблемой является повышение точности позиционирования. Субмикронный диапазон погрешностей линейного позиционирования и секундный диапазон для угловых перемещений характерен для современных металлообрабатывающих станков, оптико-механических приборов, роботов микроманипуляторов и т. д. Попытки решения данной проблемы с помощью традиционных электромеханических систем наталкиваются на целый ряд технических трудностей. При создании микроперемещений и работе на сверхнизких скоростях электромашинные устройства постоянного и переменного тока работают в неустойчивых (зарегулированных) режимах, что проявляется в нерегулярных колебаниях объекта позиционирования в направлении движения. Кроме того, существенное влияние оказывают нелинейности кинематических передач (люфты, сухое трение, зоны нечувствительности и т.д.), пренебречь которыми в данных условиях не представляется возможным. Даже в лучших шарико-винтовых передачах повторяемость позиции достигается с погрешностью от десятков долей до единиц микрометров. Большое влияние на точность микроперемещений оказывают тепловые и вибрационные возмущения, которые при больших диапазонах перемещений, как правило, не учитываются. Таким образом, можно сделать вывод о том, что традиционные электромашинные исполнительные устройства в данном направлении свои возможности исчерпали и необходим переход на другой технологический уровень с применением новых материалов, иных физических эффектов и конструктивных решений.

Уже не один десяток лет у нас в стране и за рубежом ведутся исследования и разработки исполнительных устройств нового типа, преодолевающих перечисленные недостатки. Это и магнитострикционные, и пьезоэлектрические, и электромагнитные и даже тепловые преобразовательные устройства. Анализ результатов поиска в технической литературе и Интернете показывает, что пьезоэлектрические устройства

занимают лидирующие позиции, обгоняя все остальные типы устройств еще и по таким показателям как энергосбережение, миниатюризация и адаптивность к компьютерным системам управления. Такое лидерство накладывает серьезные обязательства на производителей пьезоматериалов и устройств на их основе в плане улучшения их свойств и характеристик, повышения стабильности параметров. За последние пять лет, многое сделано в этом направлении как у нас в стране, так и за рубежом. Разработаны новые типы пьезокерамик, созданы новые и совершенствуются известные пьезокерамические элементы и компоненты, предназначенные специально для исполнительных устройств нового поколения.

1. Пьезопреобразователи, тенденции развития, принцип действия

1.1 Тенденции развития и использования пьезоэлектрических исполнительных устройств

В начале XXI века пьезотехника переживает бум в своем развитии. Расширяются области применения пьезоэлектрических преобразователей различного назначения: от пьезозажигалок, акустических излучателей и приемников до коммутирующих устройств, компенсаторов вибраций и микророботов. Несмотря на то, что пьезоэффект был открыт еще в XIX веке, а со второй половины XX активно развивалась теория и технология создания пьезокерамических материалов, считается, что пьезокерамика — один из перспективных материалов века XXI. Причиной такого взгляда является то, что замечательные свойства, присущие пьезокерамике, до сих пор не в полной мере востребованы наукой, техникой и технологиями. Пристальное внимание, которое в особенности теперь уделяется пьезоматериалам и элементам на их основе, объясняется целым рядом их достоинств:

1. Высокая надежность – выходит на уровень электронных схем (например, интенсивность отказов пьезоэлементов <10-6 1/час) основными причинами отказов являются электропробой и разрыв соединительного шва у биморфных элементов, который происходит в результате изгибных колебаний.
2. Малые массогабаритные показатели – определяются размерами пьезоэлементов (массогабаритные показатели отдельных узлов систем управления могут быть снижены при применении ПД в десятки раз).

3. Высокая радиационная стойкость - ПД могут сохранять работоспособность при воздействии всех известных видов радиоактивного излучения.
4. Стойкость к действию различных агрессивных сред – из известных в настоящее время химических соединений только плавиковая кислота способна оказать разрушающее действие на пьезокерамику, что позволяет использовать ПД в ряде химических производств.
5. Высокая термостойкость – элементы, изготовленные из некоторых марок пьезокерамики ЦТС, ПКР не теряют своей работоспособности при температурах до 300-400°С, а на основе кобальта способны выдерживать температуру равную и более 700 °С. Разработана также высокотемпературная и высокостабильная пьезоэлектрическая керамика, предназначенная для применения в топливных системах двигателей современных автомобилей. Весьма важным является то, что данная керамика обладает значительной стойкостью к высоким температурам и механическим воздействия. Единообразная частотная реакция делает датчики из данной керамики пригодной для любого типа автомобильного двигателя.
6. Возможность использования ПД непосредственно без дополнительных кинематических связей с объектом измерения – что обеспечивает отсутствие дополнительных погрешностей измерения (механических, тепловых и др.).
7. Диэлектрическая природа пьезоэлемента – функционирование за счет действия электрического поля (а не тока проводимости), практическое отсутствие тока и связанных с этим тепловыделений в диапазоне инфранизких частот обеспечивает ему качество взрывобезопасного элемента (возможно использование на нефтехимических производствах).

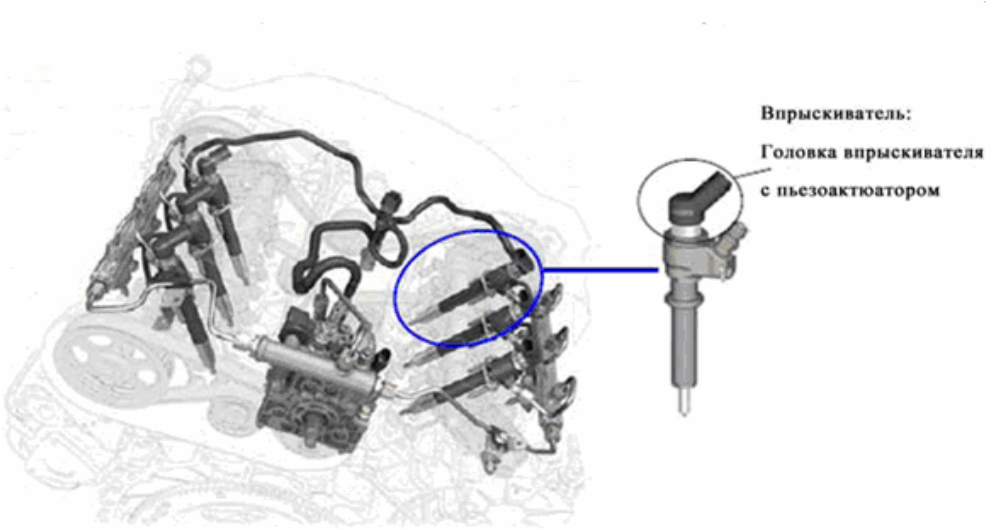
Активное использование пьезокерамики в различных областях началось в середине XX века. Достаточно хорошо были изучены и использованы свойства пьезокерамических датчиков и пьезокерамических преобразователей [1,2,3]. Неоспоримо первенство пьезокерамик в использовании для ультразвуковой диагностики в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефте - газовом комплексе, в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении и т. д. В то же время пьезокерамика еще недостаточно используется для создания генераторов, актюаторов в комбинированных системах.

Если 20-30 лет назад главными потребителями подобных устройств считались только разработчики систем адаптивной оптики для лазерной и космической техники, а также прецизионных оптических инструментов, то

сейчас пьезотехника активно шагнула в станкостроение, автомобилестроение и бытовую технику. Ярким примером комплексного использования пьезокерамических элементов, узлов и деталей на их основе могут послужить совместные разработки американской компании APC International, Ltd. [15] с производителями комплектующих для автомобильной промышленности. Современные, технически сложные автомобили постоянно требуют внедрения дополнительной электроники для повышения надежности, безопасности и комфорта. В настоящее время американские производители автомобильной техники активно используют устройства и узлы на базе пьезоэлектрической керамики. Примерами таких устройств могут служить:

- пьезоактюаторы-клапаны впрыска топлива;
- пьезоактюаторы-клапаны для газораспределительной системы двигателя;
- датчики поворота для определения угла положения дроссельной заслонки;
- датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива;
- пьезоприводы зеркал;
- пьезоприводы регулировки сидений;
- передние ультразвуковые дистанционные датчики (датчики предотвращения столкновений);
- боковые дистанционные датчики;
- задние (парковочные) ультразвуковые дистанционные датчики;
- датчики системы сигнализации и зуммеры оповещения;
- скоростные сенсоры в передней панели для подушек безопасности;
- боковые ударные сенсоры подушек безопасности;
- аварийные датчики-сенсоры подушек безопасности;
- актюаторы системы антиблокировки тормозов;
- пьезоприводы системы подвески;
- датчики угловой скорости и линейные акселерометры малых перегрузок, ориентированные по трем осям автомобиля, предназначенные для автоматизированного управления маршрутом;
- пьезоприводы регулировки фар;
- датчики и актюаторы положения фар, для обеспечения динамического регулирования луча света передних фар в зависимости от профиля дороги и изменения величины полезной нагрузки автомобиля;
- пьезоакустические системы адаптивного регулирования скорости автомобиля.

Инновационные разработки пьезоактюаторов (пьезоприводов) и датчиков обеспечивают решение многих проблем автомобилестроения и улучшает эксплуатационные качества автомобиля, отвечающие жестким эксплуатационным требованиям. Одним из самых перспективных направлений использования составных пьезоактюаторов является управление гидравлическими клапанами. Примером этого могут служить последние разработки пьезокерамических высокоскоростных клапанов как для топливной аппаратуры дизельных двигателей легковых и грузовых автомобилей, так и для газораспределительных систем дизелей и двигателей внутреннего сгорания. В дизельном двигателе (рисунок 1.1) процесс сгорания топлива в цилиндре тесно связан с процессом впрыскивания топлива.



Путем управления периодичностью впрыскивания ее длительностью, качеством топлива и скоростью протекания топлива как функции времени становится возможным эффективно управлять рабочими характеристиками двигателя. К сожалению, параметры единовременного впрыскивания не обеспечивают одновременно минимума выбросов, наилучшей экономии топлива и высокой величины крутящего момента. Автомобильная промышленность за рубежом, в последнее время, усовершенствовала систему впрыска дизельного топлива с помощью пьезоактюаторов. Система общей топливной магистрали (Common Rail)– это система впрыска, которая подает топливо высокого давления в любой момент. Для снижения шума двигателя и

эмиссии необходимо добавить несколько предварительных впрыскиваний в основное впрыскивание в течение рабочего цикла дизельного двигателя.
Основной компонент общей топливной магистрали - это инжектор, в состав которого входит пьезоэлектрический актюатор, который выполняет роль быстродействующего пьезопривода.
Использование пьезоэлектрических актюаторов обеспечивает возможность соответствия стандарту Евро V- VI в будущем, как для дизельных, так и для бензиновых двигателей. Такая система впрыска топлива уменьшает задержку воспламенения топлива за счет:
− очень высокого давления впрыска, что приводит к сверхтонкому распылению топлива;
− быстрого и независимого управления форсунками (длительность одного впрыска 200мкс), что позволяет осуществлять несколько впрысков в один и тот же цилиндр в течение одного цикла;
− дозирования с высокой точностью количества топлива на различных фазах работы двигателя, что увеличивает КПД двигателя, увеличивает срок службы, снижает расходы топлива и улучшает экономичность автотранспорта.
Электронный быстродействующий клапан со встроены пьезоэлектрическим актюатором, позволяет управлять формой и длительностью импульса впрыска, что приводит к улучшению рабочих характеристик и гибкости системы управления впрыска топлива по заданному алгоритму для различных режимов управления:
− экономичный режим, обеспечивающий максимальное КПД и минимальное потребление топлива. Для его реализации, желательно производить сгорание топлива при достижении максимальной температуры в центре зоны (TDC), при этом форма импульса впрыска обеспечивает плавное нарастание и падение скорости протекания топлива;
− режим экологически чистый, обеспечивающий минимальный уровень выброса вредных примесей в атмосферу. Для его реализации, желательно создание в цилиндре профиль скорости инжекции с низкой начальной скоростью инжекции в сочетании с резким снижением температуры и последующим резким фронтом спада.
− режим форсажа, обеспечивающий максимальную тягу. Профиль скорости инжекции характеризуется плавно нарастающим фронтом, за которым следует относительно длительный цикл и далее резким спадом фронта. При длительном цикле достигается максимально высокая температура.

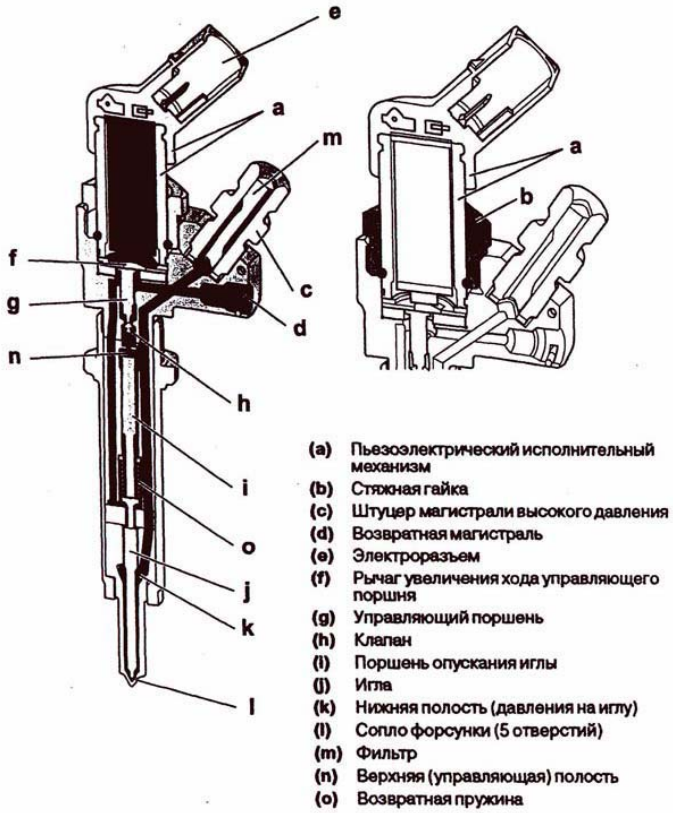


Рисунок 1.2 - Применение пьезокерамического актюатора для впрыска топлива

При работе пьезоэлектрического актюатора в составе форсунки (рисунок 1.2), под действием электрического напряжения, пьезопакеты, из которых состоит актюатор, расширяются в направлении электрического поля, при этом обеспечивая перемещение, пропорциональное управляющему напряжению и длине актюатора, и развиваемое усилие, пропорциональное площади поперечного сечения элемента. Таким образом, движение пьезопакета передается беспрепятственно прямо к игле форсунки без какого-либо механического элемента. Малая инерционность позволяет работать с частотой до 100 Гц (длительность импульса 100-200мс), что позволяет точнее дозировать количество впрыскиваемого топлива, и тем самым сократить количество вредных веществ, возникающих при сгорании.

Другим перспективным направлением их применения является точная настройка станков (нанопозиционирование). Благодаря своей жесткой

структуре пьезоприводы являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки. Прилагая фиксированное напряжение к шаблону в фазе с вращением шпинделя, можно обеспечить высокую точность обработки детали режущим инструментом станка. Кроме того, они используются для подавления (компенсации) вибрации. Нежелательную вибрацию станков можно компенсировать с помощью составных (многослойных) пьезоактюаторов, работающих в противофазе с вибрационными колебаниями. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению качества конечного изделия, а также позволит избежать чрезмерного износа инструмента и существенно снизит уровень шума станка. Компенсаторы вибрации могут найти применение не только в станкостроении, но и в других сферах.

Таким образом, пьезокерамика благодаря своим уникальным свойствам находит все большее применение в различных областях техники и технологии. Многие зарубежные научные центры и производители пьезокерамики, элементов и компонентов на ее базе, пытаясь более полно удовлетворить современные требования рынка, проводят исследования и конструкторские работы с целью улучшения параметров и характеристик керамики и пьезоприводов, на что выделяются значительные финансовые средства. Анализируя этот опыт исследований и разработок элементов и устройств пьезотехники, можно выделить два базовых направления развития. Первое заключается в совершенствовании пьезоматериалов (их свойств и характеристик) с целью обеспечения, в конечном итоге, стабильности параметров пьезоэлектрических устройств на их основе. Второе – нацелено на разработку адаптивных алгоритмов управления пьезоэлектрическими устройствами в условиях постоянно изменяющихся параметров и характеристик пьезоматериалов под действием внешних воздействий (температура, давление, механические воздействия). Результативное проведение комплекса указанных работ позволит уверенно использовать все возможности пьезоэлектрических устройств при создании таких сверхточных приборов как интерферометры, спектрометры, туннельные микроскопы и др., т.е. там, где наряду с малыми диапазонами перемещений требуется высокая точность позиционирования и строгая параллельность смещения оптических элементов и других рабочих органов.

Растет интерес к гибким актюаторам, которые используются в пьезоэлектрических датчиках изгибающего момента, скоростей и ускорений, в устройствах, читающих по методу Брайля в электронных системах для слепых, в качестве электронных переключателей. Создание ленточных актюаторов существенно расширило их использование. Изначально ленточный актюатор был разработан по запросу текстильной промышленности для компьютерных систем подачи нитей в жаккардовых

машинах. Благодаря высокой чувствительности, относительно большой блокирующей силе и величине отклонения новые пьезоэлементы позволяют использовать их в качестве сенсорных выключателей и контакторов, пьезоприводов, бесшумных успокоителей в электронном оборудовании, микрокомпрессоров, закрывающих и открывающих клапанов различного назначения, в том числе для программируемой дозированной подачи лекарств, вакуумных клапанов и т. п.

Активно развиваются сейчас ультразвуковые пьезодвигатели, которые являются современной альтернативой двигателям постоянного тока, они также известны как вибрационные двигатели. Используются в прецизионных микроподвижках, устройствах лентопротяжки, микророботах (рисунок 1.3) и т.д. Преимуществами подобных двигателей являются высокое нанометрическое разрешение, скорость и мощность, несоизмеримая с их размерами. Пьезодвигатели уже доступны на коммерческой основе, а также применяются на некоторых роботах.

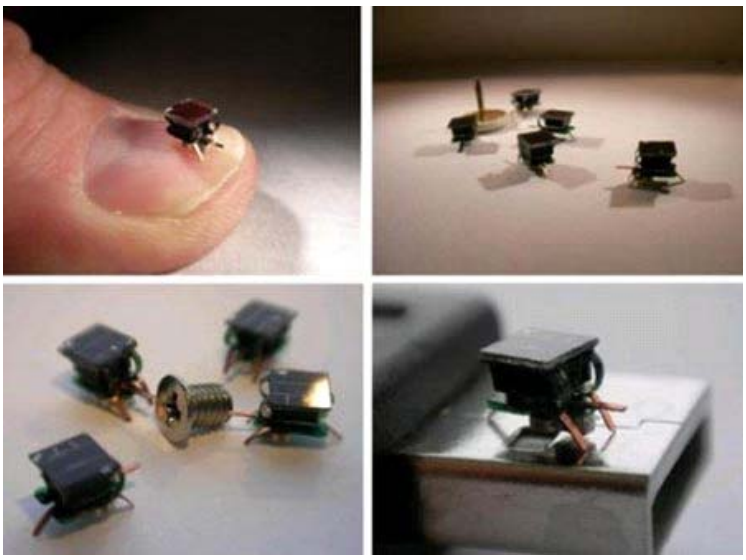


Рисунок 1.3 - Ультразвуковые пьезоэлектрические микророботы

Перспективность развития и использования пьезоэлектричских преобразователей подтверждаются огромным научным интересом к ним многих фирм – производителей в разных странах мира:

- Фирма Keramos, США [17] разработала новую пьезокерамику К12, которая может работать при экстремально высоких температурных условиях до 820°С.
- Piezo Systems,Inc. [18] ведет интенсивные исследования свойств пьезоматериалов, их зависимость от внешних возмущающих воздействий.
- Фирма PI (Великобритания) [19] на своем сайте демонстрирует огромное разнообразие современных конструкций пьезоэлектрических элементов и устройств.
- Ученые шведского Линкопингского университета и университета Вандербильта (США) разработали микророботов на пьезодвигателях, работающих на клеточном уровне (по материалам сайта http://www.scientific.ru
- В России основным разработчиком и производителем пьезоактюаторов является ОАО «ЭЛПА» [13]. В настоящее время с целью удовлетворения современных требований к пьезоактюаторам в ОАО «ЭЛПА» проводятся исследования и разработки новейших типов пьезоактюаторов на базе современных инновационных технологий. Новая конструктивно-технологическая база позволяет выпускать по требованиям заказчика уникальные образцы пьезоактюаторов, в полной мере соответствующих уровню разработок лучших аналогичных зарубежных образцов. Их использование в управляемых приводах микроперемещений позволит достигать самые высокие технические характеристики среди устройств данного класса (диапазон перемещений, чувствительность, линейность характеристик, быстродействие).

1.2 История открытия пьезоэффекта

История развития пьезоэлектричества насчитывает более 120 лет. В 1880 г. Пьер и Жак Кюри обнаружили, что под воздействием силы на поверхности некоторых материалов возникают электрические заряды. Этот эффект впоследствии был назван прямым пьезоэффектом, электричество, вызванное механическим давлением, - пьезоэлектричеством, а материалы, в которых происходит это явление, - пьезоэлектрическими (кварц, турмалин, сегнетова соль и др.) Г. Липман в 1881 г. предсказал, что электрическое

напряжение, приложенное к пьезоэлектрическому материалу, должно вызывать в нем механическое напряжения и упругие деформации, что было доказано экспериментально П. и Ж. Кюри. Это явление было названо обратным пьезоэффектом: слово «пьезо» (piezo) заимствовано из греческого и означает «давлю». Практическое применение пьезоэлектрического эффекта началось с 1917 г., когда французский математик и физик Поль Ланжевен предложил использовать ультразвуковой эхолокационный прибор для обнаружения подводных объектов. В этом приборе в качестве излучателя и приемника ультразвуковых сигналов использовались кварцевые пластинки, вмонтированные между стальными накладками, понижающими резонансную частоту преобразователя. Вначале ультразвуковой локатор Ланжевена использовался в качестве эхолота. Дальнейшее его усовершенствование привело к созданию современных ультразвуковых эхолокаторов, широко применяемых для обнаружения различных подводных препятствий, в том числе и подводных лодок. Вскоре после изобретения Ланжевена появились первые разработки пьезоэлектрических микрофонов, телефонов, звукоснимателей, приборов для звукозаписи, устройств для измерений вибраций, сил и ускорений и т. д. Следующим важным этапом в истории применения пьезоэлектричества было использование пьезоэлектрических пластинок и стержней в качестве элементов, стабилизирующих частоту злектронных высокочастотных генераторов. Это применение основано на сильной зависимости электрического импеданса пьезоэлемента от частоты вблизи механического резонанса, на что впервые обратил внимание У. Кэди в 1922 г. В 1925 г. пьезоэлектрическая пластинка была впервые применена для измерения акустических свойств вещества: Г. Пирс использовал ее в акустическом интерферометре для измерения скорости ультразвука в газах.

Важным этапом применения пьезоэлектричества для практических целей было открытие возможности обнаружения внутренних дефектов в твердых телах при помощи ультразвуковых волн. Следующим шагом в использовании пьезоэлектрических преобразователей в ультраакустических исследованиях веществ было развитие методов измерения скорости и поглощения ультразвука, основанных на эффекте дифракции света на ультразвуковых волнах. Этот эффект открыли в 1932 г. Р. Дебай и Ф. Сирс и независимо от них Р. Люка и П. Бикар. Работы, в которых этот метод использовался для измерения скорости и поглощения ультразвука в жидкостях и твердых телах, начали появляться начиная с 1936 г. В 1944 г. в физическом институте им. Лебедева АН СССР Б. М. Вул и И. П. Гольдман впервые в мире методом синтеза получили пьезокерамический титанат бария ($BaTiO_3$). На основе титаната бария, предварительно поляризованного в сильном электрическом поле, вскоре были разработаны первые

пьезокерамические электроакустические преобразователи, которые сразу привлекли к себе внимание сильно выраженными пьезоэлектрическими свойствами, простотой технологии изготовления преобразователей различных конфигураций и сравнительной дешевизной исходных материалов. Быстрыми темпами расширялись области применения пьезоэлектрических преобразователей в послевоенные годы. Появился целый ряд новых областей, таких как ультразвуковые линии задержки, ультразвуковая медицинская терапия и диагностика, уровнемеры, приборы для непрерывного промышленного контроля физико-химических свойств веществ и другие приборы, в которых широкое применение нашли пьезоэлектрические преобразователи, совершающие продольные колебания по толщине. Вместе с тем актуальной стала разработка более эффективных электроакустических преобразователей. Поэтому во многих странах большое внимание уделялось разработке новых пьезоэлектрических материалов [17,19].

1.3 Явление пьезоэлектрического эффекта

Пьезоэлектрический эффект (сокращенно пьезоэффект) наблюдается в анизотропных диэлектриках, преимущественно в кристаллах некоторых веществ, обладающих определенной, достаточно низкой симметрией. Пьезоэффектом могут обладать кристаллы, не имеющие центра симметрии, а имеющие так называемые полярные направления (оси). Пьезоэффектом могут обладать также некоторые поликристаллические диэлектрики с упорядоченной структурой (текстурой), например керамические материалы и полимеры. Диэлектрики, обладающие пьезоэффектом, называют пьезоэлектриками.

Внешние механические силы, воздействуя в определенных направлениях на пьезоэлектрический кристалл, вызывают в нем не только механические напряжения и деформации (как во всяком твердом теле), но и электрическую поляризацию и, следовательно, появление на его противоположных поверхностях связанных электрических зарядов разных знаков. При изменении направления механических сил на противоположное становятся противоположными направление поляризации и знаки зарядов. Это явление называют прямым пьезоэффектом. Пьезоэффект обратим. При воздействии на пьезоэлектрик, например кристалл, электрического поля соответствующего направления в нем возникают механические напряжения и деформации. При изменении направления электрического поля на противоположное соответственно изменяются на противоположное направления напряжений и деформаций. Это явление получило название обратного пьезоэффекта.

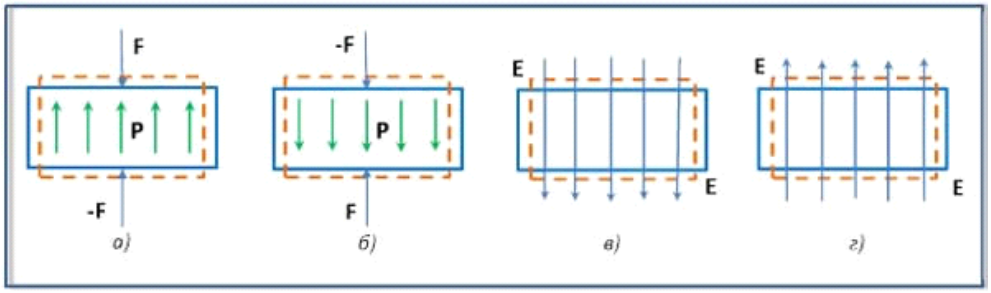


Рисунок 1.4 - Схематичные изображения прямого (а, б) и обратного (в, г) пьезоэффектов

Стрелками P и E изображены внешние воздействия - механическая сила и напряженность электрического поля. Штриховыми линиями показаны контуры пьезоэлектрика до внешнего воздействия, сплошными линиями - контуры деформации пьезоэлектрика (для наглядности во много раз увеличены); P - вектор поляризации. Механизм пьезоэффекта связан с изменением или возникновением суммарного дипольного момента *Рм* при смещении зарядов под действием механических напряжений *T* (прямой пьезоэффект) или изменения средних расстояний *l* между центрами тяжести, образующих диполь зарядов при действии электрического поля напряженностью *E* (обратный пьезоэффект). При этом происходит изменение вектора поляризации *P* в объеме *ΔV:*

$$P = {}^{P_м}\!/_{\Delta V} = \sum_{i=1}^{\infty} q_i l_i / \Delta V \quad или \quad P = \sum_{i=1}^{\infty} q_i / \Delta A \qquad (1.1)$$

где $q_{\sum}$ - заряд на электродах ПЭ; *A*- площадь электрода.

Известно более 1500 соединений, обладающих свойствами пьезоэффекта, и все они не имеют центра симметрии в распределении зарядов, что является необходимым условием существования пьезоэффекта. Если заряд не имеет центра симметрии в отсутствии внешнего поля, то такие соединения обладают спонтанной поляризацией. Известно, что из 32 классов кристаллов только 20 не имеют центра симметрии и являются пьезоэлектриками (из них 10 классов пироэлектрики, в частности, сегнетоэлектрики). Пьезоэффект может иметь естественный (у монокристаллов – кварц и др.) и искусственный характер (у поликристаллических структур – пьезокерамики – за счет поляризации внешним электрическим полем. Пьезоэффектом обладает даже древесина

после механической обработки. Нужно отметить, что деформации под действием внешнего электрического поля возникают у всех диэлектриков, и у тех, что имеют центр симметрии. Это явление называю электрострикцией. Электрострикция - четный эффект, означающий, что деформация не зависит от направления электрического поля, а ее величина пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Обратный пьезоэффект линеен в первом приближении. Порядок деформаций при электрострикции намного меньше, чем при пьезоэффекте (примерно на два порядка). Электрострикция всегда возникает и при пьезоэффекте, но вследствие малости в расчет не принимается. Электрострикция - эффект необратимый.

Прямой и обратный пьезоэффект в первом приближении линейны и описываются линейными зависимостями, связывающими электрическую поляризацию P с механическим напряжением T:

$$P = dT \qquad (1.2)$$

Данную зависимость называют уравнением прямого пьезоэффекта. Коэффициент пропорциональности d называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем), и он служит мерой пьезоэффекта.

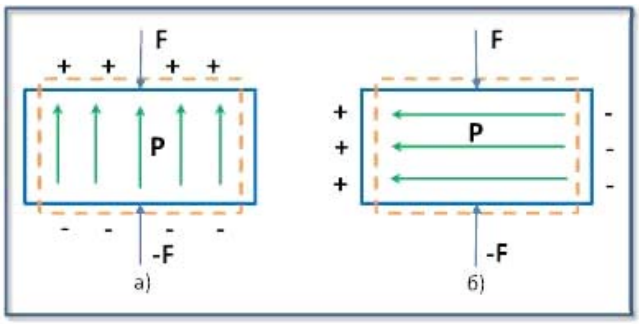
Обратный пьезоэффект описывается зависимостью:

$$S = dE, \qquad (1.3)$$

где S - деформация; E - напряженность электрического поля.
Пьезомодуль d для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

Приведенные выражения даны в элементарной форме только для уяснения качественной стороны пьезоэлектрических явлений. В действительности пьезоэлектрические явления в кристаллах более сложны, что обусловлено анизотропией их упругих и электрических свойств. Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и их характера и направления сил относительно кристаллографических осей кристалла. Пьезоэффект может возникать в результате действия как нормальных, так и касательных напряжений. Существуют направления, для которых пьезоэффект равен нулю. Пьезоэффект описывается несколькими пьезомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла. Направление поляризации может совпадать с направлением механического напряжения или составлять с ним некоторый

угол. При совпадении направлений поляризации и механического напряжения пьезоэффект называют продольным, а при их взаимно



перпендикулярном расположении - поперечным. За направление касательных напряжений принимают нормаль к плоскости, в которой действуют напряжения.

Для более полного математического описания пьезоэлектрических свойств используют: два вектора (*E* – напряженность электрического поля и *D* – индукция или электрическое смещение) и в силу анизотропии материала два тензора второго ранга (*T* – механическое напряжение и *S* – деформация), которые связаны между собой матрицами упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных. Комплекс этих постоянных в наиболее общем случае среды без центра симметрии представляет собой матрицу размерности 9x9, каждый столбец которой связан с одной из независимых переменных напряжения (компоненты упругого напряжения и электрического поля), а каждая строка с одной из зависимых переменных деформации (компоненты деформации или электрической индукции). Данная матрица симметрична и в общем случае содержит 45 коэффициентов (6 – диэлектрических проницаемостей, 21 – упругую податливость, 18 – пьезоэлектрических модулей). При учете симметрии кристаллов происходит уменьшение числа независимых коэффициентов. Матрицы коэффициентов отличаются по структуре для различных классов симметрии пьезоэлектрических кристаллов. Симметрия определяется вектором поляризации. Так, поляризованный по толщине элемент из пьезокерамики (в дальнейшем мы чаще будем иметь дело с такими материалами) имеет единственную ось анизотропии Z (в декартовой системе координат) и принадлежит к кристаллам гексагональной симметрии. При этом его свойства будут характеризоваться 5-ю упругими (c^D или s^E), 3-мя пьезоэлектрическими

Рисунок 1.5 - Схемати
поясняющие продольн
(б) пьезоэ

(h^T или d^E) и двумя диэлектрическими постоянными (β^S или ε^T). Матрица упругих постоянных имеет следующую структуру:

$$\left[c_{ij}^D\right]=\begin{bmatrix} c_{11}^D & c_{12}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^D & c_{11}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^D & c_{13}^D & c_{33}^D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^D \end{bmatrix}. \qquad (1.4)$$

Матрица пьезоэлектрических постоянных:

$$\left[h_{nm}^T\right]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & h_{15}^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{15}^T & 0 & 0 \\ h_{31}^T & h_{31}^T & h_{33}^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (1.5)$$

Матрица обратных диэлектрических проницаемостей:

$$\left[\beta_{nm}^S\right]=\begin{bmatrix} \beta_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33}^S \end{bmatrix}. \qquad (1.6)$$

Основными уравнениями, описывающими электромеханическое поведение предварительно поляризованной керамики, являются уравнения термодинамического состояния Мэзона, которые образуют систему уравнений:

$$\begin{aligned} T_i &= c_{ij}^D S_j + h_{ni} D_n \\ E_m &= -h_{mj} S_j + \beta_{mn}^S D_n \end{aligned}, \qquad (1.7)$$

где E – вектор напряженности электрического поля;
D – вектор электрического смещения (индукция);
T – тензор механического напряжения;
S – тензор деформации;
c_{ij}^D – матрица упругих постоянных;
h_{nm} – матрица пьезоэлектрических постоянных;
β_{mn}^S – матрица обратных диэлектрических проницаемостей.

Данные уравнения (их еще называют уравнениями пьезосреды) получены из нелинейных уравнений электрострикции У. Мэзона путем их линеаризации в предположении, что при электрическом нагружении напряженность приложенного внешнего поля по величине значительно меньше поля предварительной поляризации, а процесс деформирования – адиабатический. В уравнениях не учитываются незначительные (в области частот акустических колебаний) магнитные эффекты, сопровождающие процесс деформирования. Поля начальных механических напряжений и предварительная поляризация учитываются в них косвенным путем через постоянные материала. Считается, что потерями на дипольную релаксацию и внутреннее трение можно пренебречь. В качестве независимых переменных необязательно выбирать *D* и *S*, возможны и другие комбинации [2]:

$$\begin{matrix} T = c^E S - e_t E \\ D = e_t - \varepsilon^S E \end{matrix}; \qquad \begin{matrix} S = s^E T + d_t E \\ D = d_t T + \varepsilon^T E \end{matrix}; \qquad \begin{matrix} S = s^D T + g_t D \\ E = -g_t T + \beta^T D \end{matrix}, \tag{1.8}$$

где g_t, e_t, d_t - пьезоэлектрические постоянные,

β^S, ε^S - диэлектрические постоянные,

s^E, c^E - коэффициенты упругости.

Для перехода от одной системы к другой существуют формулы пересчета постоянных коэффициентов [4].

Для исследования динамических сопряженных электроупругих процессов в пьезокерамических телах приведенные выше уравнения состояния необходимо дополнить уравнениями движения элемента сплошной среды, т.е. уравнениями Ньютона и Максвелла, а также учесть реальные начальные и граничные условия. Уравнения движения сплошной среды без учета объемных сил в декартовых координатах имеют вид:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \lambda_x}{\partial t^2}, \tag{1.9}$$

$$\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \lambda_y}{\partial t^2}, \tag{1.10}$$

$$\frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \lambda_z}{\partial t^2}, \tag{1.11}$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - декартовы составляющие вектора упругих перемещений;

T_x, T_y, T_z - механические напряжения вдоль осей;

T_{xz}, T_{xy}, T_{yx} - сдвиговые механические напряжения;

ρ - плотность пьезоматериала.

Что касается граничных условий, то здесь следует различать условия для механических и электрических составляющих сопряженного поля. Граничные условия для механических составляющих формулируются аналогично условиям в задачах теории упругости, а электрические зависят от характера возбуждения колебаний пьезокерамического тела.

Таким образом, мы получили базовые математические зависимости, с помощью которых можно будет разработать математическую модель любого пьезоэлектрического исполнительного устройства с учетом всех его конструктивных особенностей, наложенных ограничений, принятых допущений и условий управления.

2 Материально-техническая база пьезоэлектрических исполнительных устройств

2.1 Пьезоэлектрические материалы

Пьезоэлектрическими материалами называют кристаллические вещества, в которых под действием механических напряжений возникает спонтанная поляризация – явление прямого пьезоэффекта. Наряду с прямым существует и обратный пьезоэффект, который заключается в том, что внешнее электрическое поле вызывает механические напряжения внутри материала, которые приводят к изменению его геометрических размеров. Указанными свойствами обладают естественные монокристаллические вещества (кварц, сегнетова соль, турмалин и т.д.) и искусственные поликристаллические твердые растворы, структура которых упорядочена предварительной поляризацией в электрическом поле (пьезокерамики – титанат и цирконат свинца, бария и т.д.).

Каждый пьезоэлектрик является электромеханическим преобразователем. Если его поместить в переменное электрическое поле, то амплитуда механических колебаний будет меняться с частотой переменного поля. При совпадении частоты поля с собственной (резонансной) частотой пьезоэлектрика, амплитуда приобретает максимальное значение. Прямой пьезоэффект используют в технике для преобразования механических напряжений или деформаций в электрические сигналы (звукосниматели, датчики деформаций, приемники ультразвука и др.) Обратный пьезоэффект используется для преобразования электрических сигналов в механические (акустические излучатели, генераторы ультразвука, двигатели микроперемещений и др.)

2.1.1 Пьезоэлектрики – монокристаллы

Кварц - широко распространенный в природе минерал, относится к числу наиболее твёрдых веществ, обладает высокой химической стойкостью. Внешние формы природных кристаллов кварца отличаются большим разнообразием. Наиболее обычной формой является комбинация гексагональной призмы и ромбоэдров (пирамидальные грани). Грани призмы расширяются к основанию кристалла и имеют на поверхности горизонтальную штриховку. Годный для использования в пьезоэлектрической аппаратуре кварц встречается в природе в виде кристаллов, их обломков и окатанных галек. Цвет от бесцветно-прозрачного (горный хрусталь) до чёрного (морион). Обычно природные кристаллы кварца содержат в себе различные дефекты, снижающие их ценность. К числу дефектов относятся включение инородных минералов (рутилхлорит), трещины, пузыри, фантомы, голубые иглы, свили и двойники.

В настоящее время наряду с природными используются синтетические кристаллы кварца, выращиваемые в автоклавах при повышенных температуре и давлении из насыщенных диоксидом кремния щелочных растворов.

Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин (пьезометрия).

Турмалин широко распространён в природе, однако в большинстве случаев кристаллы изобилуют трещинами. По химическому составу турмалин представляет собой сложный алюмоборосиликат с примесями магния, железа или щелочных металлов (Na, Li, K). Цвет от чёрного до зелёного, также красный до разового, реже бесцветный. При трении электризуется, обладает сильным пироэлектрическим эффектом. Основным преимуществом турмалина является большее значение частотного коэффициента по сравнению с кварцем. Благодаря этому, а также из-за большей механической прочности турмалина возможно изготовление резонаторов на более высокие частоты. В настоящее время турмалин почти не используется для изготовления пьезоэлектрических резонаторов и имеет ограниченное применение для измерения гидростатического давления.

Сегнетова соль - тетрагидрат двойной натриево-калиевой соли винной кислоты, получаемый из отходов виноделия. У сегнетовой соли впервые были обнаружены своеобразные электрические свойства — самопроизвольная поляризация в определённом интервале температур, причём эта поляризация поддаётся изменению под воздействием достаточно сильного внешнего

электрического поля. Позже вещества с такими свойствами стали называть по имени сегнетовой соли сегнетоэлектриками.

Пьезоэлементы из сегнетовой соли широко использовались в аппаратуре, работающей в сравнительно узком температурном интервале, в частности, в звукоснимателях. Особенно широко это вещество нашло применение во время повышенного спроса на электротехнику в послевоенные годы. По сравнению с другими преобразователями, выходное напряжение сегнетовой соли весьма велико. Однако изготовленные из неё преобразователи не могут храниться в условиях повышенной влажности, поскольку соль из-за своей гигроскопичности постепенно расплывается. Для предохранения от воздействия влаги пьезоэлементы из сегнетовой соли покрывают тонкими пленками лака.

Однако в настоящее время они почти полностью вытеснены керамическими пьезоэлементами.

Дигидрофосфат аммония - искусственно выращиваемый сегнетоэлектрический кристалл, химически стоек, до точки плавления (Тпл = 130 °С) обладает сравнительно сильно выраженным пьезоэффектом и малой плотностью, однако недостаточно механически прочен. Кристаллы представляют собой комбинацию тетрагональной пирамиды и призмы. Пьезоэффект слабее, чем у сегнетовой соли, но значительно устойчивее. При температуре 100° кристаллы начинают разрушаться (выделяется аммиак). Кристаллы дигидрофосфата не содержат кристаллизованной воды и не обезвоживаются. При 93%относительной влажности воздуха кристаллы начинают поглощать влагу и растворятся. Дигидрофосфат аммония плавится при температуре 190 градусов Цельсии, однако выше 100 градусов с поверхности кристалла начинает улетучиваться аммиак. Это ограничивает верхний предел рабочих температур.

В настоящее время вследствие широкого развития пьезоэлектрической керамики применение дигидрофосфата аммония ограничено.

Основные характеристики монокристаллов сведены в таблицу 1.

Таблица 2.1 - Основные характеристики монокристаллов при температуре 16—20 °С

	Плотность, ρ x10^3 *кг/м^3*	Скорость звука, $C_{зв}$, x10^3 *м/сек*	Диэлектрическая проницаемость, ε	Пьезомодуль, d, 10^{12} *к/н*	Тангенс угла диэлектрических потерь, tg d×10^2	Коэффициент электромеханической связи *Кэм*
Кварц	2,6	5,4	4,5	2,31	< 0,5	0,095

Дегидрофосфат аммония (АДР)	1,8	5,27	21,8	24	< 1	0,3
Сульфат лития	2,05	4,7	10,3	18,3	< 1	0,37
Сегнетова соль	1,77	3,9	250	172	> 5	0,67
Турмалин	3,26	7,15	7,5	2,5	< 0,5	0,098

2.1.2 Поликристаллические пьезоэлектрики

Искусственный пьезоэлектрический материал по своим физическим свойствам является поликристаллическим сегнетоэлектриком, представляющим собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов). По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. Пьезоэлектрическая керамика представляет собой твердый, химически инертный материал, совершенно нечувствительный к влажности и другим атмосферным воздействиям. По механическим качествам она подобна керамическим изоляторам. Путем изменения основного соотношения исходных материалов и введения добавок синтезируют разные составы пьезокерамики, обладающие определенными электрофизическими и пьезоэлектрическими характеристиками. Наибольшее распространение получила группа пьезокерамических материалов типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС). Промышленные составы пьезокерамик гостированы ГОСТ 12370-72, ГОСТ 13927-74 “Материалы пьезокерамические”. В последние годы разрабатываются новые пьезокерамические материалы с более высокими техническими характеристиками и широкими возможностями использования. Так, например, разработана и производится группа материалов на основе ниобата свинца, которая уже нашла практическое применение благодаря возможности ее использования в диапазоне частот до 30 и более МГц.

Значительные исследования проводятся по созданию пьезокерамических композитных материалов, а также многослойной керамики. Зарубежные производители в зависимости от пьезоэлектрических свойств делят ее на сегнетожесткую и сегнетомягкую. В отечественной практике существует дополнительное деление на керамику средней сегнетожесткости, а также выделяются высокостабильные, высокотемпературные и т. п. материалы.
Отдельные пьезокерамические материалы полифункциональны, поэтому их можно отнести к нескольким функциональным группам.

- ***сегнетомягкие материалы*** с пониженной, умеренной и повышенной диэлектрической проницаемостью для высокочувствительных приемников звуковых и ультразвуковых колебаний и относительно слабых излучателей и других применений, когда электрические и механические воздействия на пьезоэлементы не слишком велики, а диэлектрические потери не играют существенной роли; к этой группе материалов относят - материалы для актюаторов, различных датчиков и других преобразователей.;
- ***материалы средней сегнетожесткости и сегнетожесткие*** с различной диэлектрической проницаемостью для приемо- передающих ультразвуковых устройств, мощных технологических ультразвуковых устройств, пьезотрансформаторов, пьезодвигателей, других мощных ультразвуковых установок, когда электрические и механические воздействия на пьезоэлементы велики, а диэлектрические потери играют существенную роль;
- ***высокостабильные материалы*** с пониженной и повышенной диэлектрической проницаемостью, повышенной температурной и временной стабильностью упругих констант, повышенной механической добротностью и различными значениями коэффициента электромеханической связи планарных или толщинных колебаний для частотно-селективных устройств на объемных и поверхностных акустических волнах планарной моды колебаний, моды колебаний сжатия-растяжения по толщине, моды колебаний сдвига по толщине(фильтров, резонаторов, гироскопов);
- ***высокотемпературные материалы*** для датчиков и другой аппаратуры, работающих при температурах выше 250 °С;
- ***материалы с повышенной анизотропией коэффициентов электромеханической связи*** и различными сочетаниями других параметров для высокочастотных излучателей и приемников, для датчиков с пониженной боковой чувствительностью, применяемых для дефектоскопии, толщинометрии, уровнеметрии, медицинской диагностической аппаратуре;
- ***пористые материалы*** с широким интервалом рабочих температур применяются в ультразвуковых преобразователях дефектоскопов, толщинометрии, виброметрии, гидроакустике, диагностической и терапевтической медицинской аппаратуре;
- ***композитные материалы*** применяются в пьезоэлектрических преобразователях ультразвуковых дефектоскопов и толщиномеров, в приборах ультразвуковой медицинской диагностической аппаратуры, в

ультразвуковых уровнемерах и расходомерах, в объемочувствительных гидрофонах.

Свойства пьезокерамики характеризуется общепринятыми основными параметрами приведенными в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры пьезокерамики и их условные обозначения.

T_k	Температура точки Кюри
$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$ $\varepsilon^T_{11}/\varepsilon_0$	Относительная диэлектрическая проницаемость;
tg δ	Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при E=25 кВ/м;
$Q_м$	Механическая добротность;
v_1^E	Скорость звука;
σ_p	Планарный коэффициент Пуассона;
Коэффициент электромеханической связи	
k_p	Планарной моды;
k_{15}	Сдвиговой моды;
k_{33}	Моды растяжения-сжатия по толщине;
d_{31}, d_{33}, d_{15}	Пьезоэлектрические модули;
g_{31}, g_{33}	Электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема);
Относительное отклонение частоты(ООЧ) в интервале температур -60...+85°C	
$(ООЧ)_p$	Планарной моды;
$(ООЧ)_{сд}$	Сдвиговой моды;
$(ООЧ)_{сж}$	Моды растяжения-сжатия по толщине;
$T_{раб}$	Рекомендуемая повышенная температура;
ρ_v	Удельное объемное электрическое сопротивление;
ρ	Плотность.

Отечественные и зарубежные пьезоэлементы производят на базе керамики ЦТС (цирконат–титанат–свинца) разных составов, к ним относятся ЦТС–19, ЦТС–22, ЦТБС–1, ПКР (отечественные) и PZT, PIC, PXE (зарубежные). В таблицах 2 и 3 приведены характеристики ряда популярных пьезоэлктрических керамик зарубежных и отечественных производителей. С более широким ассортиментом можно ознакомиться в Приложениях А,Б и В.

Таблица 2.3 − характеристики пьезокерамики фирмы Physik Instrumente (Германия).

Характеристики		PIC 151	PIC 255	PIC 155	PIC 153	PIC 152	PIC 181	PIC 141	PIC 241
Физические и диэлектрические свойства									
ρ(g / sm $^{3)}$		7,80	7,80	7,80	7,60	7,70	7,80	7,80	7,80
T (^{o}C)		250	350	345	185	340	330	295	270
$\varepsilon_{33}{}^{T}/\varepsilon_{0}$		2400	1750	1450	4200	1350	1200	1250	1650
$\varepsilon_{11}{}^{T}/\varepsilon_{0}$		1980	1650	1400			1500	1500	1550
tg δ(10 $^{-3)}$		20	20	20	30	15	3	5	5
Электромеханические свойства									
k_{p}		0,62	0,62	0,62	0,62	0,48	0,56	0,55	0,50
$k_{т}$		0,53	0,47	0,48			0,46	0,48	0,46
k_{31}		0,38	0,35	0,35			0,32	0,31	0,32
k_{33}		0,69	0,69	0,69		0,58	0,66	0,66	0,64
k_{15}			0,66				0,63	0,67	0,63
d_{31}	(10 $^{-2}$ C / N)	-210	-180	-165			-120	-140	-130
d_{33}		500	400	360	600	300	265	310	290
d_{15}			550				475	475	265
g_{31}	(10 ^{3} Vm /N)	-11,5	-11,3	-12,9			-11,2	-13,1	-9,8
g_{33}		22	25	27	16	25	25	29	21
Акустико-механических свойства									
N_{p}	(HZM)	1950	2000	1960	1960	2250	2270	2250	2190
N_{1}		1500	1420	1500			1640	1610	1590
N_{3}		1750		1780			2010	1925	1550
N_{T}		1950	2000	1990	1960	1920	2110	2060	2140
Qm		100	80	80	50	100	2000	1500	1200

Таблица 2.4 – Характеристики некоторых отечественных пьезокерамических материалов.

Характеристики		Сегнетомягкие материалы		Материалы средней сегнетожесткости		Высокотемпературные материалы	
Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19	НЦТС-1	ЦТБС-8	ЦТС-43	ТНВ-1	ЦТС-26
T_k	°С	290	175	290	280	920	350
$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	-	1750	4000	1400	1400	100	1700
$\varepsilon^T_{11}/\varepsilon_0$	-	1450	-	-	-	-	-
tg δ, не более	%	2,5	2,0	0,40	0,6	0.8	2.0
Q_m	-	80	50	1120,0	1100	-	80
v^E_1	10^3м/с	3,0	2,87	3,2	3,2	-	2.9
σ_p	-	0,37	-	-	0,33	0.20	0.36
k_p	-	0,55	0,60	0,56	0,52	-	0.60
k_{15}	-	0,60	-	-	-	-	-
k_{33}	-	0,67	-	0,68	0,64	-	0.68
d_{31}	10^{-12}Кл/Н	-160	-260	-140	-125	-	-170
d_{33}	10^{-12}Кл/Н	350	550	315	280	7	350
d_{15}	10^{-12}Кл/Н	400	-	-	-	-	-
g_{31}	10^{-3}В*м/Н	-10,3	-7,3	-11,3	-10,1	-	-11.3
g_{33}	10^{-3}В*м/Н	22,6	-15,5	25,4	22,6	7.9	
$T_{раб}$	°С	200	100	200	200	700	250
ρ_v, (при 100°С)	10^8, Ом*м	1,0	1,0	5	5	10	1

Сравнительный анализ основных параметров монокристаллов и пьезокерамик приведен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Сравнительная характеристика монокристаллов и керамики

Свойства	Монокристаллы	Керамика
Пьезомодуль, d	невысокий	высокий
Обл. рабочих температур, T_{max}, °С	500-600	200-250
Добротность, Q	высокая	низкая
Температурная стабильность свойств	высокая	старение (располяризация)
Экономичность	низкая	высокая

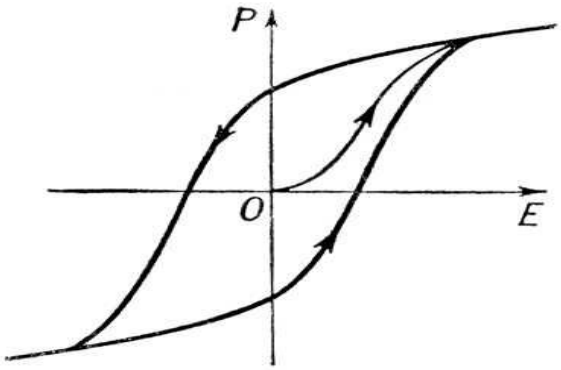
При проектировании исполнительных устройств правильный выбор материала является определяющим фактором основных характеристик и функциональных возможностей пьезоэлементов, пьезоактюаторов и в конечном итоге исполнительных пьезодвигателей. При выборе материала для таких устройств основное внимание уделяют следующим параметрам:

1. *d (d33,d31)* – пьезомодули (по направлению рабочих деформаций) определяют рабочий диапазон перемещений исполнительного устройства.
2. $K_{эм}$ *(k33,k31)* - коэффициенты электромеханической связи характеризуют эффективность преобразования электрической энергии, подводимой к материалу, в механическую. Квадрат коэффициента электромеханической связи равен отношению генерируемой механической энергии к подводимой электрической энергии (в случае обратного пьезоэффекта). Коэффициент электромеханической связи зависит как от свойств материала, так и от направлений, в которых подводится и снимается энергия. Поэтому каждый материал может характеризоваться несколькими такими коэффициентами в зависимости от вида преобразования. Так, например, коэффициент k_{33} характеризует степень преобразования энергии возбуждающего электрического поля, направленного по оси поляризации, в энергию продольной деформации в том же направлении; коэффициент k_{31} характеризует степень

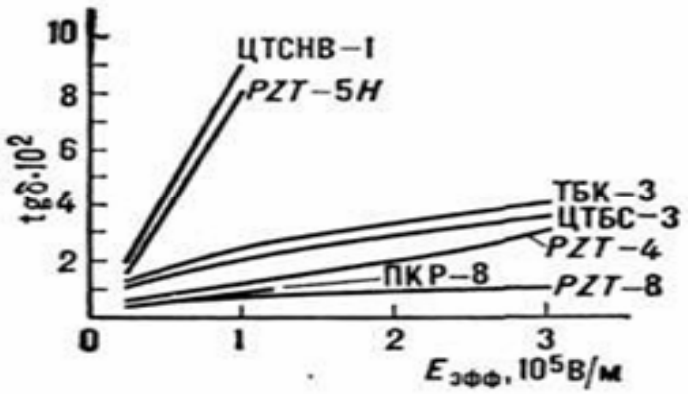
преобразования энергии того же поля в энергию деформации, перпендикулярной направлению поля.

3. Y_{ij} – модуль Юнга определяет упругие и резонансные свойства материала.
4. $Q_м$ – характеризует потери энергии в материале на внутреннее трение, определяет эффективную ширину полосы пропускания, влияет на степень затухания колебательных процессов.
5. ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость определяет полное сопротивление пьезоэлемента, характеризует диэлектрические и в конечном итоге емкостные свойства пьезоэлемента.
6. $tg\ \delta$ и $tg\sigma$ – тангенсы углов диэлектрических и механических потерь характеризует диэлектрические и механические потери в материале.
7. $T_к$ – температура Кюри определяет предельную температуру, при которой наступает область фазового перехода в материале (тепловое движение молекул разрушает дипольную структуру материала и пьезоэлектрические свойства исчезают).
8. ΔT – рекомендуемый рабочий диапазон температур, в котором флуктуации параметров материала будут находится в пределах допустимых значений.

Все пьезоматериалы имеют недостатки, которые в конечном итоге проявляются в работе пьезодвигателей. К ним относятся последействие, гистерезис, нестабильность параметров материала во времени и при изменении температуры окружающей среды. Последействие обусловлено релаксационными процессами в пьезокерамике. Величина деформации последействия пропорциональна изменению
напряжения и может достигать 20% от рабочего диапазона деформаций.



Гистерезис материала возникает из–за наличия диэлектрических и механических потерь, его величина для разных материалов находится в пределах 10–40%. В результате при периодическом изменении напряжения управления зависимость поляризации (а значит и деформации) от напряженности электрического поля описывается двумя криволинейными ветвями, образующими петлю рисунок 2.1. При увеличении электрического поля, приложенного к пьезокерамическому элементу, до максимального значения поляризация материала достигает точки насыщения *Ps* . При снижении поля до нуля поляризация достигает уровня остаточной поляризации *Pr*. При изменении направленности поля поляризация достигает отрицательного насыщения, затем отрицательного остаточного значения поляризации при значении поля равного нулю, далее при изменении направленности поля и его увеличении - поляризация снова достигает



величины своего положительного насыщения. Площадь такой петли может служить мерой потерь энергии в единице объема. Основными видами потерь в керамике являются диэлектрические и механические потери. Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь, который равен отношению активной и реактивной составляющих тока, протекающего через пьезоэлемент. Обычно, для пьезокерамик он имеет порядок 0,01–0,06. На рисунке 2.2 представлена зависимость тангенса угла

диэлектрических потерь от величины возбуждающего электрического поля. Рост диэлектрических потерь наблюдается в области пьезоэлектрического резонанса, на низких частотах до 1000 Гц изменениями диэлектрических потерь пренебрегают. Механические потери проявляются в том, что между приложенным электрическим напряжением и возникающей деформацией имеется сдвиг фаз σ, тогда $tg\sigma$ служит мерой относительных потерь механической энергии за один цикл. Фазовый сдвиг появляется в результате неупругого поведения твердых тел (ползучесть, последействие). Для многих материалов, в том числе и пьезокерамик, экспериментально установлено, что скорость процесса деформирования практически не влияет на очертание ветвей петли гистерезиса. Площадь петли определяется только амплитудой деформации. Особенностью пьезоэлектрических материалов, работающих в режиме обратного пьезоэффекта, является наличие обоих видов потерь, величины которых, примерно, имеют одинаковый порядок. Установлено, что углы диэлектрических и механических потерь на низких частотах одновременно создают общий угол потерь, который может быть определен по формуле:

$$\delta_{общ} = \frac{1 - K_{эм}^2}{1 - K_{эм}}\delta + \frac{0{,}5K_{эм}^2}{1 - K_{эм}^2}\sigma, \qquad (2.1)$$

где $K_{эм}$– коэффициент электромеханической связи.

Очертание петли гистерезиса остается неизменным при изменении частоты управляющего напряжения, а значит, будет постоянным и общий угол сдвига фаз между приложенным напряжением и деформацией при неизменной амплитуде сигнала в достаточном удалении от резонансных частот.

Проблема стабильности параметров пьезоматериалов занимает особое место при разработке и эксплуатации пьезодвигателей. К числу наиболее сильных дестабилизирующих факторов относят изменение величины и характера нагрузки, температуры, временная нестабильность. Воздействия среды, такие, как влажность, изменение давления, различные механические воздействия, излучения также оказывают влияние на стабильность параметров. Влияние каждого такого фактора различно и зависит от свойств пьезоматериала, интенсивности воздействия факторов и других данных. В справочной литературе приводятся данные, регламентированные ГОСТом, снятые на типовых стандартных образцах, при воздействии слабых электрических полей и в нормальных условиях окружающей среды (T=25±10°С, влажность 65±15%, давление 10^5±4·10^3 Па). Однако, в реальных условиях параметры пьезокерамики системы ЦТС нестабильны. Основной причиной нестабильности служат остаточные механические напряжения $T_{ос}$ и связанные с ними процессы доменной реориентации. Напряжения $T_{ос}$

возникают на различных стадиях технологического процесса создания ПК (термической, механической, электрической). Свойства ПК существенно зависят от наличия в них ионов других элементов, в том числе и тех, что содержаться в сырье. Наиболее сильное воздействие оказывают ионы элементов с большей или меньшей валентностью, чем замещаемые ими ионы. В этих случаях, даже при слабых концентрациях данных элементов (в пределах 0,5 – 2 %), керамика может иметь сегнетомягкие (большая валентность) или сегнетожесткие (меньшая валентность) свойства. Параметры ε□ d, tg δ, η - сегнетомягких материалов примерно в 2- 3 раза больше соответствующих параметров сегнетожестких материалов, значения $E_к$, $Q_м$, $\theta_к$, наоборот ниже. Таким образом, если целенаправленно формировать свойства керамики, то следует специально вводить модифицирующие добавки. Так, большую валентность имеют оксиды лантана, неодима, тантала, меньшую – оксиды железа, кобальта, хрома.

В производственных условиях воспроизводимость свойств керамики в большей степени зависит от химического состава и качества исходного материала. Изменение свойств ПК возможно и в ходе технологических процессов их производства (спекание, механическая обработка, нанесение электродов, поляризация). И разброс основных параметров может достигать существенных величин, так упругая податливость и жесткость материала может изменяться в пределах 5%, пьезомодули d – до 10 %, диэлектрическая проницаемость ε до 20 %. Большое влияние на параметры материала может оказывать режим предварительной поляризации (время, форма напряжения и т.д.) колебания величин отдельных параметров могут достигать 20-30 %. Особый интерес для пользователей ПК представляет стабильность ее свойств в процессе эксплуатации. А, как известно, параметры пьезокерамик нестационарны во времени. Например, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла механических потерь, пьезоэлектрические и упругие коэффициенты уменьшаются по логарифмическому закону. Это связано как с необратимыми процессами (временными химическими, структурными изменениями), так и обратимыми (основными) процессами (нестабильностью доменной структуры вследствие частичной временной деполяризации ПК). Нужно сказать, что в целом изменение параметров ПК невелико при старении и составляет не более 5% . Но, в условиях эксплуатации пьезоэлементов с такими характеристиками (в качестве датчиков или исполнительных устройств) суммарный эффект может существенно повлиять на преобразовательную характеристику устройства.

Анализ всех факторов определяющих стабильность параметров ПК показывает, что пьезоматериалы системы ЦТС могут иметь разброс отдельных параметров (на однотипных образцах) до 35-40%, что не противоречит современному Госту на пьезоматериалы.

2.2 Пьезоэлементы

И так, когда выбран материал, можно приступить к выбору пьезоэлемента или пьезоактюатора. В исполнительных устройствах пьезоэлементы как самостоятельные единицы используются редко. Но, для понимания конструктивных особенностей пьезодвигателей их характеристик, потенциальных возможностей, необходимо иметь информацию о базовом элементе.

Базовым элементом любого пьезоэлектрического исполнительного устройства является пьезоэлемент, форма и размеры которого выбираются исходя из конкретной задачи, условий функционирования, требуемых диапазонов перемещений. На сегодняшний день есть большой выбор типоразмеров пьезоэлементов, изготавливаемых из разных пьезоматериалов (см. Приложения Г).

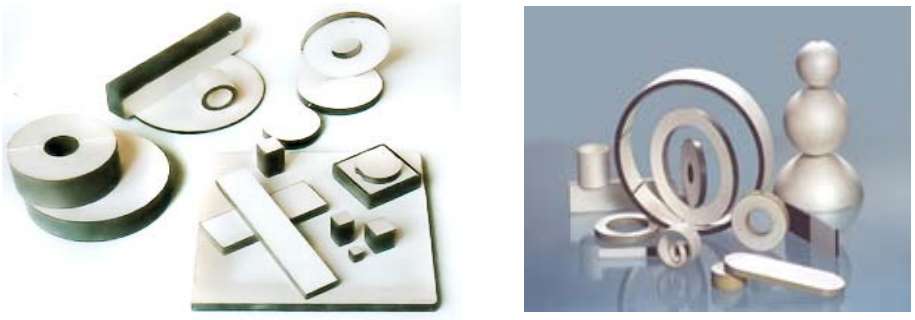


Рисунок 2.3 – Пьезоэлементы отечественных фирм - производителей фирмы Аврора-Элма (г. Волгоград) и ЭЛПА (г.Зеленоград)

Существует общепринятое в нашей и зарубежной практике условное деление типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации: пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring), брусок (bar), стержень (rod), цилиндр (cylinder). Могут быть изготовлены гибкие пьезокерамические

элементы: пластинчатые (plate bender) и дисковые (disc bender), которые, в свою очередь, подразделяются на юниморфы (unimorph), то есть однослойные, и биморфы (bimorph) — двухслойные. Основными поставщиками в России являются фирмы Аврора-Элма (г. Волгоград) и ЭЛПА (г.Зеленоград) рисунок 2.3. За рубежом аналогичную продукцию выпускают такие фирмы как APC International Ltd., PI и Keramos, США.

Разнообразие форм и размеров обеспечивается технологией изготовления, как и у любых других керамических изделий (посуда, изоляторы и др.).

Весь технологический процесс изготовления пьезокерамических изделий можно разбить на 7 этапов:

Синтез материала - получение однородного мелкодисперсного порошка с высоким содержанием требуемого вещества. Исходное сырье - окислы и соли. PbO, TiO_2, ZrO_2, добавки. Их смешивают в определенной пропорции в водной среде, после чего высушивают и размалывают с целью получения однородного состава.

Изготовление заготовок - порошок смешивают с органическими вяжущими катализаторами, прессуют, каландрируют (прокатывают) или формуют с целью получения структурного элемента заданной формы (диск, стержень, пластина и т. п.) методом полусухого прессования, шликерного литья, горячего литья под давлением, экструзии или изостатического прессования при высоком давлении;

Обжиг - «сырые» керамические заготовки подвергаются обжигу при заданных температурных и временных режимах, в результате чего частицы порошка спекаются и материал приобретает плотную керамическую структуру. Обжиг производят в печах в среде кислорода для уменьшения пористости при температуре 1000–1400 градусов по
Цельсию. Спеченные заготовки представляют собой спеченную массу мелких кристаллитов (керамических гранул) со стекловидными прослойками. Обычная пьезокерамика содержит в одном кубическом сантиметре от 10^9 до 10^{12} зерен.
На рисунке 2.5 представлен вид среза керамики под микроскопом высокого разрешения.

При температуре выше критической, так называемой точки Кюри, каждый кристалл имеет простую кубическую симметрию, не обладающую дипольным моментом. При температурах ниже точки Кюри каждый кристалл приобретает (в зависимости от композиции материала) тетрагональную или ромбоэдрическую симметрию с дипольным моментом. Дипольные моменты

различно ориентированы относительно в разных керамических зернах, и даже относительно в разных областях в отдельном зерне.

Области одинаково ориентированных дипольных моментов называются доменами, а каждый домен содержит сеть дипольных моментов. Однако распределение доменов в пьезокерамическом материале носит случайный характер, поэтому керамический элемент не имеет общей поляризации.

Механическая обработка - этап доводки элементов до заданных размеров осуществляется теми же способами, что и обработка металлов:

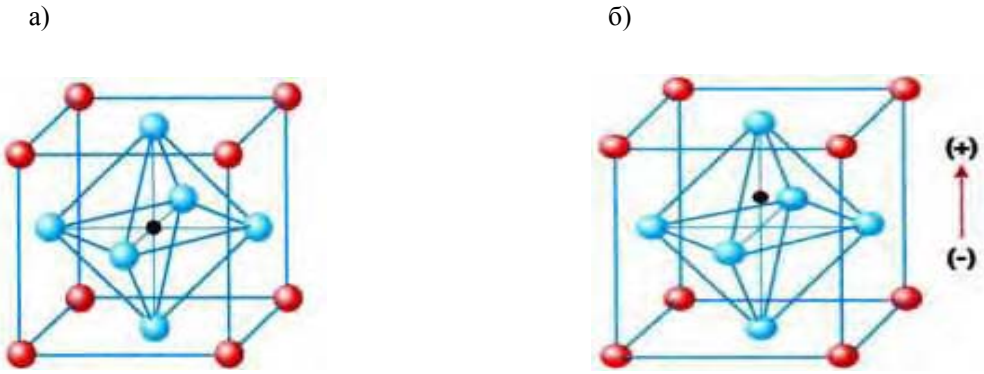


Рисунок 2.4 – Кристаллическая структура пьезоэлектрической керамики а) – температура выше точки Кюри (кубическая решетка, симметричное расположение положительных и отрицательных зарядов), б) – температура ниже точки Кюри (тетрагональная (ромбоэдрическая) решетка, кристалл имеет электрический дипольный момент)

на токарных, фрезерных и сверлильных станках с помощью инструмента из победита с последующим шлифованием и полировкой.

Нанесение электродов - осуществляется вакуумным напылением, вжиганием, осаждением из раствора (химический способ). Материалы для электродов - серебро (обычно), никель, паладий, индий, медь. Наиболее распространенный способ - вжигание серебряной пасты: на обезжиренную поверхность наносят кистью или пульверизатором слой серебряной пасты, сушат при 200°С и вжигают при 750-800°С.

Поляризация - процесс ориентации произвольно направленных доменов вещества в определенном направлении. Способы: масляная и воздушная, высоко- и низко- температурная, в постоянном или импульсном поле динамическим методом. Чаще используется масляная или воздушная в непрерывном постоянном поле при температуре ниже так называемой точки Кюри. Благодаря этому процессу поляризации большинство доменов

принимают ориентацию, практически совпадающую с направлением вектора электрического поля, а керамика удлиняется параллельно оси поляризации. После отключения электрического поля большинство диполей остается ориентированными в направлении, близком к вектору поля поляризации. Это придает материалу постоянную поляризацию, называемую остаточной поляризацией.

Термостабилизация (искусственное старение) - необходима для стабилизации основных параметров пьезокерамики. Без нее все характеристики материала могли «плыть» достаточно долго во времени (месяцы и годы). Поляризованное состояние керамики является неравновесным и метастабильным. Со временем остаточная поляризация постепенно уменьшается по экспоненциальному закону из-за разориентации направлений поляризации и изменения доменной структуры в кристаллитах. Время релаксации у современных сегнетокерамических материалов составляет несколько десятков лет. Эффект изменения параметров пьезокерамического материала со временем известен как старение. В общем случае в керамике со временем могут происходить как необратимые, так и обратимые изменения. Необратимые процессы, которые можно либо полностью исключить, либо свести к минимуму, включают в себя химические

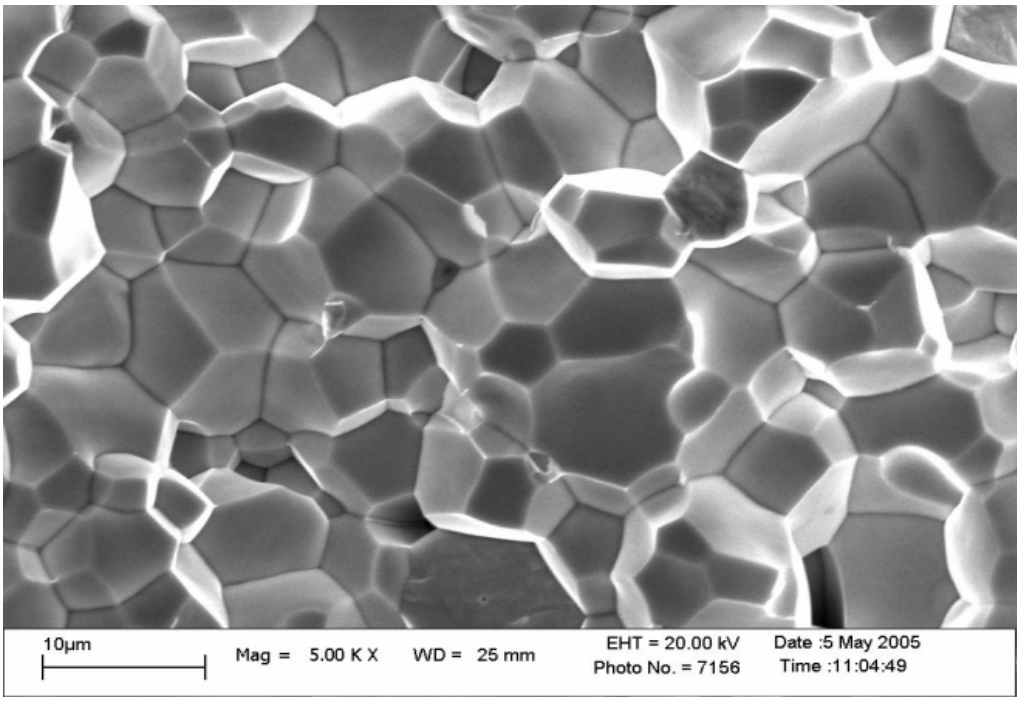
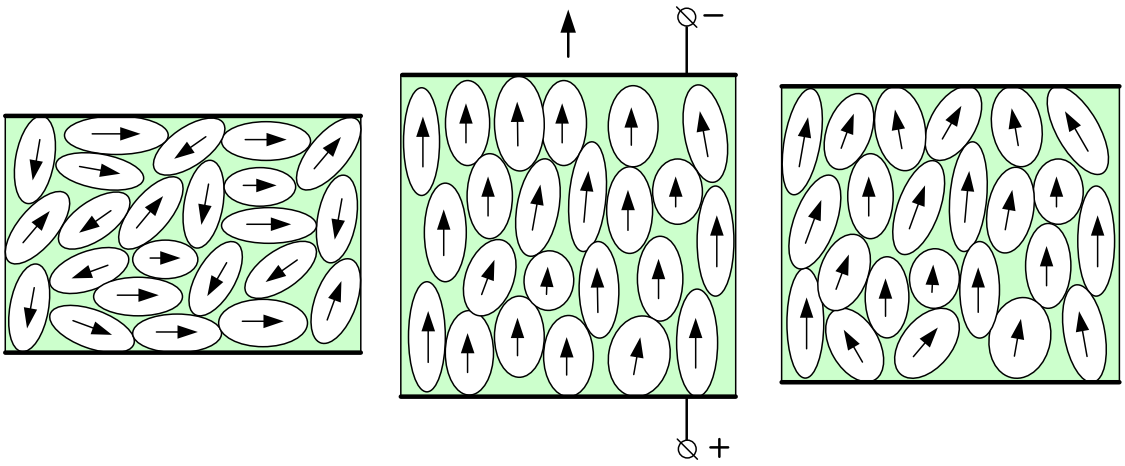


Рисунок 2.5 - Вид среза керамики под микроскопом с высоким разрешением

и структурные изменения диэлектрика со временем. Обратимое или электрическое старение является специфическим свойством сегнетоэлектриков, оно-то в основном и определяет временные изменения параметров пьезокерамики.

Это старение обусловлено изменением со временем доменной структуры сегнетоэлектриков и объясняется перемещением доменных стенок в новые, более равновесные положения и постепенным их закреплением дефектами кристаллической решетки, которые диффузионно перемещаются по образцу и накапливаются на доменных стенках. Подробности механизма старения еще не изучены достаточно хорошо, но известно, что состав материала и термообработка образцов сильно влияют на старение. Легкость перемещения доменных стенок (их подвижность) зависит от остаточных механических напряжений, возникающих при фазовом переходе и в процессе поляризации. В керамике переориентация доменов и кинетика доменных стенок в значительной мере зависят также от размера зерен, присутствия примесей и пор, препятствующих движению доменных стенок, от напряжений,



возникающих при взаимодействии с окружающими зернами, от структуры границ зерен, а также наличия частиц второй фазы. С повышением температуры скорость старения резко возрастает, что связано с облегчением обратных поворотов части доменов в исходное, существующее до поляризации положение и увеличением вклада этого процесса в остаточную поляризацию. В итоге процесс сокращается до нескольких часов, и параметры пьезокерамики становятся стабильными во времени, что очень важно для любых приложений.

а) б)

P

Выходной контроль пьезоэлементов - визуальный осмотр на соответствие чертежу и техническим условиям, контроль поляризации, диэлектрических констант, коэффициента связи.

В результате получается пьезоэлемент, обладающий всеми выше описанными свойствами прямого и обратного пьезоэффектов. Механическое сжатие или растяжение, прикладываемое к поляризованному пьезокерамическому элементу, вызывает изменение дипольного момента, в свою очередь создающего электрическое напряжение. Это проявляется прямой пьезоэффект. Сжатие элемента вдоль оси поляризации или растяжение, прикладываемое в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации, генерирует потенциал той же полярности, что и напряжение поляризации. Если сила растяжения приложена вдоль оси поляризации, или элемент сжимается перпендикулярно оси поляризации, то полярность потенциала противоположна полярности напряжения поляризации. Таким образом, пьезокерамический элемент преобразует механическую энергию растяжения или сжатия в электрическую энергию и, по сути, дела является генератором. Это свойство используется для создания устройств поджига (пьезозажигалки), датчиков усилий, скоростей и ускорений. В данных областях пьезоэлементы имеют самостоятельное значение.

Если приложить к электродам пьезоэлемента электрическое напряжение, то в нем возникает механическое напряжение, которое приводит к его деформации, т.е. электрическая энергия преобразуется в механическую. Это обратный пьезоэффект. Причем, при подаче напряжения с противоположной напряжению поляризации полярностью элемент станет короче и толще, а если к пьезокерамическому элементу приложить напряжение, совпадающее по полярности с напряжением поляризации, то элемент удлиниться и становится тоньше. Если приложить переменное напряжение, то элемент будет удлиняться или укорачиваться циклически в соответствии с частотой приложенного напряжения. Этот эффект и заложен в основу создания пьезокерамических двигателей, звуковых и ультразвуковых генерирующих устройств и других изделий. Пьезоэлементы из керамики могут утратить работоспособность при приложении внешнего поля с напряженностью выше критической в направлении, противоположном вектору предварительной поляризации. В направлении, согласном с направлением предварительной поляризации, допустимая напряженность управляющего поля ограничена лишь конструктивными особенностями и условиями электромеханической прочности. Для управления пьезоэлементами, обычно, требуется создание интенсивного электрического поля с напряженностью $E_{max}=10^6$ В/м. Источник напряжения 300-600 В создает такую напряженность в пластине толщиной

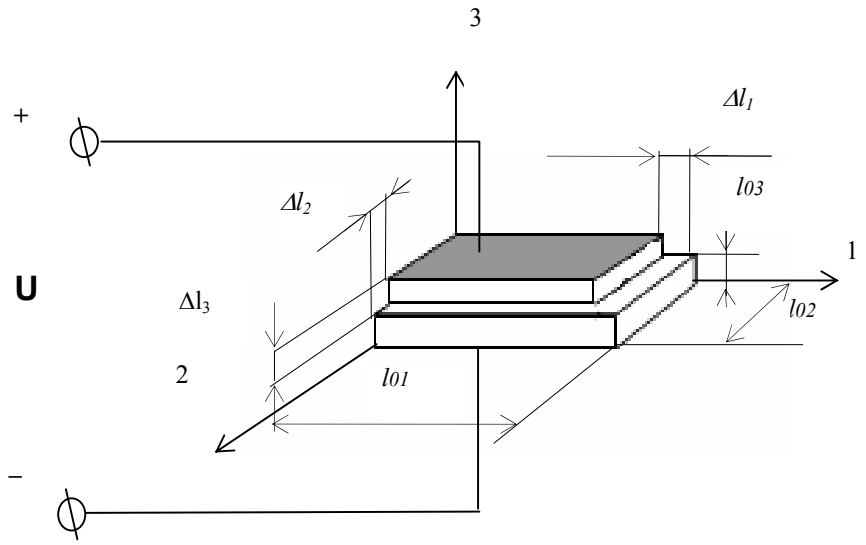


Рисунок 2.7 -Деформация пьезоэлемента под действием электрического поля

0,3 – 1 мм. Абсолютное изменение толщины пластины составит 0,05 – 0,3 мкм.

Рассмотрим связь между деформацией пьезоэлемента и приложенным полем на примере пьезоэлемента, выполненного в виде плоскопараллельной пластины, с размерами $l_1 \; x \; l_2 \; x \; l_3$, на верхней и нижней гранях которой нанесены проводящие электроды, соединенные с внешним источником напряжения U. Считаем поле однородным и направленным вдоль оси 3 согласно с вектором предварительной поляризации P. При этом напряженность электрического поля в этом направлении определяется как

$$E_3 = \frac{U}{l_3}. \qquad (2.2)$$

При воздействии электрического поля происходит деформация пластины по трем координатам. Геометрические размеры элемента изменятся и составят соответственно $l_1 - \Delta l_1$, $l_2 - \Delta l_2$, $l_3 + \Delta l_3$. Можно сделать следующие общие заключения:

1. ***Поле с напряженностью E_i, направленное вдоль оси i, вызывает деформацию пьезоэлемента по всем трем геометрическим осям.***

2. ***Значение деформации в направлении некоторой оси j от действия E_i , направленного вдоль этой же оси (i=j) или другой (i≠j) оси, пропорционально напряженности E_i .***

3. ***Коэффициенты пропорциональности носят название пьезомодулей и обозначаются d_{ij}.***

Кроме того, пьезоэлемент обладает упругими свойствами с анизотропией по геометрическим осям, т.е. имеет разные значения упругой податливости по осям. Модуль упругости Юнга, характеризующий податливость материала имеет соответствующие пьезомодулю обозначения Y_{ij}.

В пьезоэлектрических исполнительных устройствах основные усилия действуют в направлении рабочего перемещения. При этом появляется возможность рассматривать приближенную одномерную модель движения только вдоль интересующего нас направления (например, вдоль оси 3) вне связи с динамикой пьезосреды по другим осям [2,6].

Тогда можно записать уравнение обратного пьезоэффекта для деформации вдоль оси 3

$$\frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_{03}} = -\frac{T_3}{Y_{33}} + d_{33}E_3 \quad , \qquad (2.3)$$

где σ_3 -механическое напряжение в образце, направленное по оси 3.

Зная значение пьезомодуля керамики, из которой изготовлен пьезоэлемент можно определить удлинение образца по оси 3 для случая не зажатого элемента при $\sigma_3=0$:

$$\Delta l_3 = d_{33}El_3 \, . \qquad (2.4)$$

Если же нужно определить удлинение вдоль оси 1, при тех же условиях, то выражение будет выглядеть так

$$\Delta l_1 = d_{31}E_3l_1 \, . \qquad (2.5)$$

В результате появления механических напряжений в пьезоэлементе будет проявляться и прямой пьезоэффект, уравнение которого для наших условий будет выглядеть так

$$P_3 = -d_{33}T_3 + \varepsilon_{33}\varepsilon_0E_3 \, , \qquad (2.6)$$

где P_3 – поляризованность элемента в направлении третьей оси, $\frac{Кл}{м^2}$,

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная,

ε_{33} - диэлектрическая проницаемость вдоль третьей оси.

Кроме величины удлинения или относительной деформации базового элемента в дальнейшем для составления математических моделей пьезодвигателей потребуются и другие параметры, которые определяются на основании приведенных выражений и входящих в них коэффициентов. К ним относятся:

1.Коэффициент упругости элемента K_y, Н/м

вдоль оси 3 : $K_y = \frac{S_0 Y_{33}}{l_3}$, вдоль оси 1 : $K_y = \frac{S_0 Y_{11}}{l_1} = \frac{Y_{11} l_2 l_3}{l_1}$

где S_0 – площадь поверхности элемента перпендикулярной направлению перемещения (оси 3)

2. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов $K_П$ и $K_О$, Н/В

вдоль оси 3 : $K_П = K_О = \frac{S_0 Y_{33} d_{33}}{l_3}$, вдоль оси 1 : $K_П = K_О = Y_{11} d_{31} l_2$

3. Электрическая емкость элемента C_0, Ф

вдоль оси 3 : $C_0 = \frac{\varepsilon_{33}\varepsilon_0 (1 - K^2_{ЭМ\,33}) S_0}{l_3}$, вдоль оси 1 : $C_0 = \frac{\varepsilon_{33}\varepsilon_0 (1 - K^2_{ЭМ\,31}) l_1 l_2}{l_3}$,

где $K_{ЭМ33}$ – коэффициент электромеханической связи, который в свою очередь определяется из выражений

вдоль оси 3 : $K^2_{ЭМ\,33} = \frac{d^2_{33} Y_{33}}{\varepsilon_{33}\varepsilon_0}$, вдоль оси 1 : $K^2_{ЭМ\,31} = \frac{d^2_{31} Y_{11}}{\varepsilon_{33}\varepsilon_0}$.

4. Деформация под действием внешней механической нагрузки

вдоль оси 3 : $\Delta\lambda_{3F} = \frac{F_c l_3}{S_0 Y_{33}}$, вдоль оси 1: $\Delta\lambda_{1F} = \frac{F_c l_1}{S_0 Y_{11}}$

где F_c – вняшнее приложенное усилие вдоль третьей оси.

5. Собственная частота элемента ω_0 (без механической нагрузки), c^{-1}

вдоль оси 3 : $\omega_{o3} = \frac{1{,}58}{l_3}\sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}$, вдоль оси 1: $\omega_{o1} = \frac{1{,}58}{l_1}\sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$,

ρ_M - плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$.

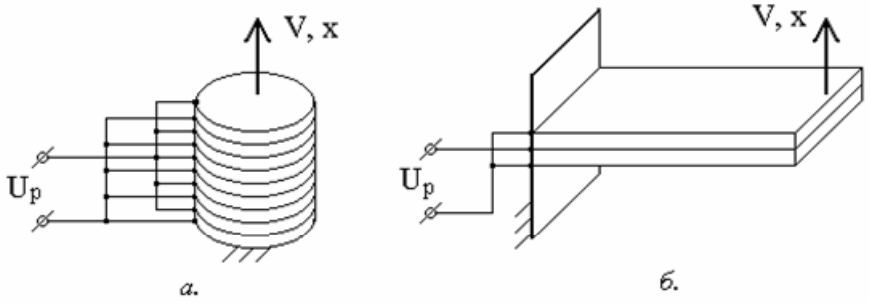
Если к элементу механически подсоединить объект массой m_0, то эквивалентная приведенная масса m_Σ,кг определяется по формуле:

$m_{\Sigma} = m_0 + 0{,}382 m_K$,

где $m_к$ - масса керамики.

2.3 Пьезокерамические актюаторы

Пьезокерамические элементы по отдельности в исполнительных устройствах используются достаточно редко. Керамическая технология изготовления пьезоэлементов не накладывает принципиальных ограничений на их форму и размеры, но один пьезоэлемент может работать в весьма ограниченном диапазоне перемещений (0,01 – 0, 1 мкм). Для расширения функциональных возможностей и, в частности, увеличения диапазона перемещений пьезоэлементы объединяют в более сложные конструкции,



а. *б.*

которые принято называть пьезоэлектрическими актюаторами.

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые (мода *d33*), поперечные (мода *d31*) и гибкие или биморфные (мода *d31*). Осевые и поперечные актюаторы имеют еще общее название — многослойные пакетные (или составные), так как набираются из нескольких пьезоэлементов (дисков, стержней, пластин, цилиндров или брусков) в пакет (Stack Actuators). Максимальные габариты определяются возможностями существующего техпроцесса изготовления пьезокерамических изделий. Пакетные актюаторы могут производиться предприятиями, не связанными с производством пьезокерамики.

2.3.1 Пакетная конструкция

Пакетная конструкция представляет собой набор из отдельных пьезоэлементов с металлизированными поверхностями (шайб, дисков цилиндров), число которых может находиться в пределах от 5 до 200 шт. и определяется требуемым диапазоном перемещений. Материал электродов — серебро и серебряно-палладиевый сплав — наносится методом трафаретной печати или вакуумного напыления на керамическую поверхность (толщина слоя 6–12 мкм). Небольшое перемещение каждого пьезоактивного слоя суммируется в общее перемещение в диапазоне от единиц микрон до десятков микрон при усилии от сотен до нескольких тысяч Ньютонов. Такие актюаторы также называют мощными с ограниченным диапазоном

Рисунок 2.9 – Силовые пакетные актюаторы из колец и дисков

перемещений (см. Приложение Д). [12,13]
Пакет формируют склеиванием либо путем пайки твердым припоем однополярных поверхностей, соединяя их механически последовательно, а электрически параллельно, что позволяет создать достаточно жесткое устройство, обладающее максимальной деформацией. Допустимая напряженность электрического поля пьезокерамики около 1-2 кВ/мм,

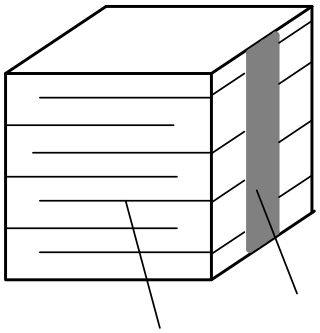
Рисунок 2.10 – Армированный пакет со стягивающей шпилькой

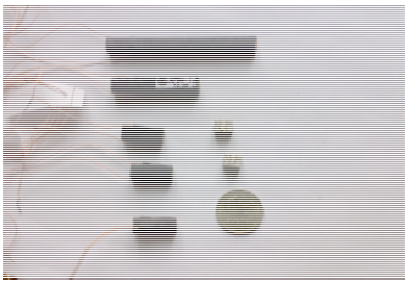
следовательно, для уменьшения управляющего напряжения необходимо уменьшать толщину пьезоэлемента (обычно она находится в пределах от 0,3 до 0,6 мм). При этом максимальное значение напряжения управления составляет 300 - 600 В. В особо ответственных применениях пакеты предварительно сжимают (кольцевые и цилиндрические актюаторы с помощью осевых стягивающих шпилек или болтов, дисковые – с помощью внешнего упругого корпуса), при этом обеспечивается выборка межэлектродных зазоров, снижение величины гистерезиса. Кроме того, предварительное нагружение позволяет работать при подаче положительного и отрицательного напряжения, исключает наклон концевых поверхностей актюатора и обеспечивает их параллельность при установке в изделиях (см. Приложение 3).

В ряде случаев для стабилизации параметров актюаторов используются электрострикционные материалы. Электрострикционный материал (ниобат магнезия 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. Высокие значения пьезомодуля (d_{33} > 2000 нКл/Н) и диэлектрической проницаемости электрострикционного материала (ε_{33} = 15000–20000, тогда как для пьезокерамики ε_{33} = 1500–3000) 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 °С (± 0,5 °С).

В настоящее время в условиях широкого внедрение актюаторов в приборостроении, электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленностях, к ним предъявляются жесткие требования по габаритам, диапазонам перемещений, величинам управляющих напряжений, диапазонам рабочих температур и т.д. Большинство пакетных устройств, разработанных в конце прошлого века, перестали удовлетворять

этим требованиям. Им на смену пришли тонкопленочные многослойные актюаторы [12]. Многослойные актюаторы (рисунок 2.11) состоят из чередующихся тонких слоев пьезокерамики и электродов. Толщина керамического слоя обычно 20–100 мкм, толщина внутренних электродов до 3-4 мкм. В качестве материала для электродов используется сплав серебро-палладий с небольшой добавкой пьезокерамики, что обеспечивает повышенную адгезию – силу сцепления металлического сплава с керамикой. Габариты : сечение и высота актюаторов определяются технологическими возможностями оборудования и, как правило, эти величины варьируются в пределах 2x2 до 20x20 мм, а максимальная высота моноблочной конструкции составляет около 100 мм. Соединение слоев между собой осуществляется путем спекания под давлением внутренних металлических электродов каждого слоя при этом достигается плотность близкая к теоретическому пределу монолитной керамики. В многослойном актюаторе каждый слой соединен с последующим слоем электрически параллельно. Смежные слои пьезокерамики поляризованы во встречном направлении, в результате перемещение, создаваемое структурой, является суммой перемещений всех слоев.





На боковые грани актюатора наносятся внешние электроды из серебра, к которым пайкой подсоединяются провода для подачи управляющего напряжения. Преимущество конструкции заключается в том, что для заданного уровня деформации требуется на порядок меньшее электрическое напряжение, чем у пакетных актюаторов с теми же размерами. Обычно у современных многослойных актюаторов напряжение не превышает 100 вольт. Многослойные актюаторы изготавливают по стандартной технологии многослойных конденсаторов (см. Приложение Ж). 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. Они способны развивать значительные усилия пропорционально площади сечения (сечение 2х2 мм^2 может создать усилие до 1000 Н). К числу недостатков следует отнести большие значения собственной емкости актюаторов, что объясняется наличием большого количества параллельно соединенных слоев керамики малой толщины. Данный недостаток приводит к снижению быстродействия исполнительных пьезоэлектрических приводов с тонкопленочными многослойными актюаторами. Величина емкости увеличивается с ростом амплитуды сигнала управления, при увеличении температуры и величины сжимающего усилия. Данные факторы нужно учитывать при проектировании пьезодвигателей.

В настоящее время основными областями применения многослойных актюаторов являются:

системы впрыска топлива — управление клапанами с быстродействием ~ 1–10 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.

В России основным разработчиком и производителем тонкопленочных 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. В таблице 2.6 представлены характеристики одной из первых серий тонкопленочных многослойных актюаторов фирмы ЭЛПА [12].

Таблица 2.6 – Характеристики актюаторов из пьезокерамики ЦТС-46

Габариты, мм х мм х мм	Масса гр., не более	Статическая ёмкость, нФ, не более	Диапазон рабочих напряжений, В	Максимальное перемещение, мкм, не менее при U=100В	Блок. усилие, Н, не менее	Количество активных слоев
6,0 x 6,5 x 5,5	2,0	925	0 ÷ 100	4,5	1350	100
6,0 x 6,5 x 8,5	2,6	1400	0 ÷ 100	6,5	1350	150
7,5 x 7,5 x 19	6,0	3250	0 ÷ 100	15,0	1350	350
7,5 x 7,5 x 41	13,0	7000	0 ÷ 100	25,0	1350	750
7,5 x 7,5 x 55	20,0	9250	0 ÷ 100	35,0	1350	1000
7,5 x 7,5 x 70	25,0	11600	0 ÷ 100	50,0	1350	1250

Для предварительного расчета пакетных и тонкопленочных многослойных актюаторов без механической нагрузки, состоящих из N элементов, справедливы следующие уравнения [6]:

1. Удлинение пьезоактюатора пакетного типа (из дисков, пластин и колец) по оси 3, и пластин и цилиндров по оси 1

вдоль оси 3 : $\Delta l_3 = N d_{33} E l_3$, вдоль оси 1 : $\Delta l_1 = N d_{31} E_3 l_1$.

2.Коэффициент упругости элемента K_y , Н/м

вдоль оси 3 : $K_y = \frac{S_0 Y_{33}}{N l_3}$, вдоль оси 1 : $K_y = \frac{S_0 Y_{11}}{N l_1} = \frac{Y_{11} l_2 l_3}{N l_1}$

где S_0 – площадь поверхности элемента перпендикулярной направлению перемещения (оси 3)

3. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов $K_П$ и $K_О$, Н/В

вдоль оси 3 : $K_П = K_О = \frac{S_0 Y_{33} d_{33}}{l_3}$, вдоль оси 1 : $K_П = K_О = Y_{11} d_{31} l_2$

4. Электрическая емкость элемента C_0, Ф

вдоль оси 3 : $C_0 = \frac{\varepsilon_{33} \varepsilon_0 (1 - K_{ЭМ}^{2_{33}}) N S_0}{l_3}$, вдоль оси 1: $C_0 = \frac{N \varepsilon_{33} \varepsilon_0 (1 - K_{ЭМ}^{2_{31}}) l_1 l_2}{l_3}$,

где $K_{ЭМ33}$ – коэффициент электромеханической связи, который в свою очередь определяется из выражений

вдоль оси 3 : $K^2_{ЭМ33}=\frac{d^2_{33}Y_{33}}{\varepsilon_{33}\varepsilon_0}$, вдоль оси 1 : $K^2_{ЭМ31}=\frac{d^2_{31}Y_{11}}{\varepsilon_{33}\varepsilon_0}$.

5. Деформация под действием внешней механической нагрузки

вдоль оси 3 : $\Delta\ell_{3F}=\frac{F_c Nl_3}{S_0 Y_{33}}$, вдоль оси 1: $\Delta\ell_{1F}=\frac{F_c Nl_1}{S_0 Y_{11}}$

где F_c – внешнее усилие, приложенное вдоль третьей оси.

6. Собственная частота актюатора ω_0 (без механической нагрузки), c^{-1}

вдоль оси 3 : $\omega_{o3}=\frac{1,58}{l_3}\sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}$, вдоль оси 1:, $\omega_{o3}=\frac{1,58}{l_1}\sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}}$

ρ_M - плотность материала, $\frac{кг}{м^3}$.

Если к актюатору механически подсоединить объект массой m_0 , то эквивалентная приведенная масса m_Σ ,кг определяется по формуле:

$$m_\Sigma = m_0 + 0{,}382 m_к ,$$

где $m_к$ - масса керамики.

2.3.2 Биморфная конструкция

Биморф состоит из двух частей - двух пьезозлементов, соединенных между собой, или пьезоэлемента и металлической пластины, также соединенных между собой с помощью эпоксидного компаунда или легкоплавкого припоя. Биморфные элементы, состоящие из двух пьезозлементов, были названы симметричными. Речь здесь идет о симметрии материала биморфного элемента относительно нейтральной плоскости при его изгибе (см. Приложение Е). Биморфные элементы, состоящие из пьезоэлемента и металлической пластины, по этим же соображениям были названы асимметричными. Известны две схемы соединения пьезозлементов: последовательная и параллельная (рисунок 2.12, а, б соответственно)

Традиционно эти преобразователи изготавливаются из пластин одинаковых размеров и, что очень важно, одинаковой толщины (в соответствии с рисунком 2.13) . Это обеспечивает максимальную чувствительность. Следует, однако, отметить, что при одинаковых размерах пьезоэлементов чувствительность преобразователя по параллельной схеме и его собственное сопротивление в четыре раза меньше соответствующих характеристик преобразователя по последовательной схеме.

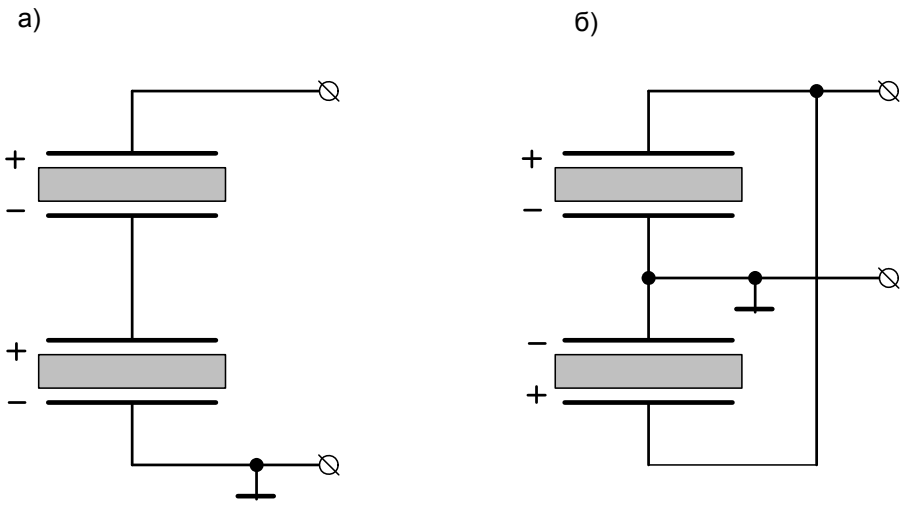
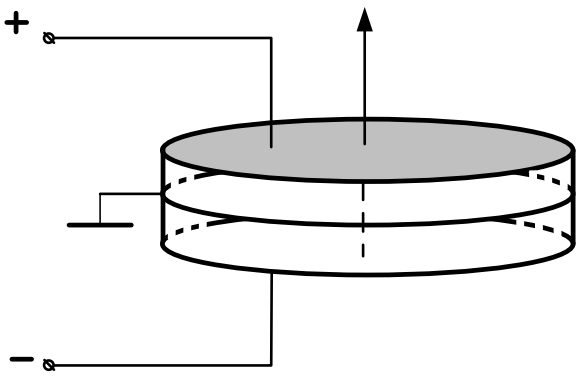


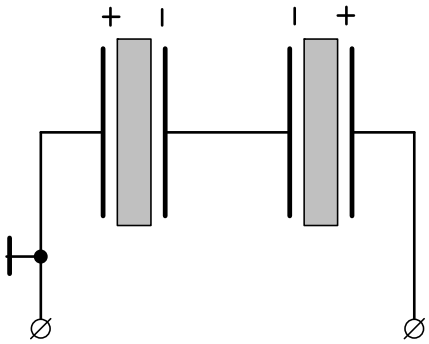
Рисунок 2.12- Схемы соединения пьезоэлементов в симметричном биморфном преобразователе (а -последовательная; б - параллельная)

Количественной мерой эффективности такого согласования для однородных деформаций являются статические коэффициенты электромеханической связи ($К_{эмс}$). В электрическом поле в однослойной пластине с толщиной поляризацией возникает однородная планарная деформация. Статический $К_{эмс}$ для такого типа деформации является табличной величиной, которая имеет различные значения для различных составов пьезокерамики.



Для последовательной схемы и встречного включения при равенстве чувствительностей отдельных элементов суммарная (общая) чувствительность биморфного преобразователя равна нулю. Если же толщины пьеэоэлементов не равны, не равны и чувствительности, тогда

чувствительность биморфного преобразователя будет равна разности чувствительнастей отдельных элементов.



Традиционно биморфная конструкция используется для увеличения диапазона линейных перемещений (до ед. мм) и получения угловых перемещений объектов (до нескольких градусов) небольшой массы до десятков грамм и развивает незначительную блокирующую силу. Так, американская компании APC International Inc. [15] выпустила новый тип пластинчатого биморфа — «ленточный актюатор» (зарегистрированная торговая марка). Ленточный актюатор может обеспечивать блокирующую силу 0,95 Н и величину отклонения 1,2 мм или отклонение до 3 мм и блокирующую силу 0,6 Н. Гибкие актюаторы относятся к группе маломощных.

Простейшая биморфная конструкция (рисунок 2.15) представляет собой две склеенные между собой пьезоэлектрические пластины, напряжение управления на которые подается таким образом, чтобы одна из них сокращалась, а другая расширялась.

Рисунок 2.14 - Эл
схема симметричного
преобразователя

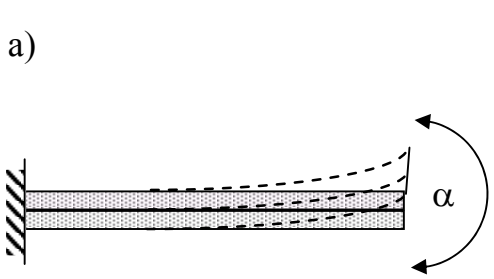


Рисунок 2.15 - Биморфные конструкции

При этом происходит изгиб всей конструкции (по аналогии с биметаллической пластиной). Если конструкция закреплена только с одной стороны рисунок 2.15 а), то свободный конец совершает угловые перемещения, а если с двух сторон рисунок 2.15 б), то центральная ее часть совершает линейные перемещения, равные прогибу всей конструкции.

Возможна компоновка биморфной конструкции, когда один из элементов пьезопассивен т.е. это может быть металлическая пластина или мембрана.

Конструкции с угловым перемещением используются в системах сканирования и пространственного управления оптическим излучением, в литературе их называют дифлекторами. А конструкции с линейным перемещением в системах юстировки и позиционирования различных оптикомеханических систем.

Получены математические выражения для расчета основных параметров биморфов. Так, для расчета параметров биморфной, консольно заделанной пластины (деформация конца консоли), можно использовать следующие выражения:

1. Деформация конца биморфной пластины под действием управляющего поля (напряжения)

$$\Delta\ell_E = \frac{3}{4} d_{31} E \frac{\ell^2}{h} = \frac{3}{4} d_{31} U \frac{\ell^2}{h^2} \ ;$$

2. Деформация под действием внешней механической нагрузки

$$\Delta l = \frac{1}{2} \frac{F_c l^3}{Y_{11} b h^3} ;$$

3. Коэффициент упругости

$$K_y = \frac{2 Y_{11} b h^3}{l^3} ;$$

4. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффекта

$$K_П = K_O = \frac{3}{2} \frac{Y_{11} d_{31} h b}{l_0} \ ;$$

5. Электрическая емкость

$$C_0 \quad \frac{1{,}8\, \varepsilon_{33} \varepsilon_0 b l}{h} \ ;$$

6. Эквивалентная приведенная масса

$$m_{\sum} = m_0 \square 0{,}243 m_K \ ;$$

7. Собственная частота (без нагрузки)

$$\omega_м = 2{,}03\frac{h}{\ell^2}\sqrt{\frac{Y_{31}}{\rho_M}}\ .$$

Большой интерес представляют дисковые биморфы с фиксацией по окружности, у которых при воздействии управляющего поля наблюдается прогиб центральной части. Они используются для получения линейных перемещений малого диапазона. Для их расчета рекомендуются следующие выражения:

1. Прогиб центра диска

$$\Delta l_E = \frac{3}{4}d_{31}E\frac{R^2}{h} = \frac{3}{4}d_{31}U\frac{R^2}{h^2},$$

где R – радиус биморфного диска.

2. Прогиб под действием внешней нагрузки (усилия)

$$\Delta l_F = \frac{0{,}069F_c R^2}{Y_{11}h^3};$$

3. Коэффициент упругости

$$K_y = \frac{14{,}51Y_{11}h^3}{R^2};$$

4. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов

$$K_П = K_o = 10{,}88Y_{11}d_{31}h;$$

5. Электрическая емкость

$$C_O \cong \frac{5{,}65\varepsilon_0\varepsilon_{33}R^2}{h};$$

6. Эквивалентная приведенная масса

$$m_\Sigma = m_0 + 0{,}235m_к;$$

7. Собственная частота без нагрузки

$$\omega_м = 3{,}13\frac{h}{R^2}\sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_м}}.$$

2.4 Пьезоэлектрические двигатели. Особенности конструкций

Пьезодвигатель, в отличии от актюатора, представляет собой полностью завершенное конструктивно и функционально исполнительное устройство, обеспечивающее линейное или угловое перемещение объекта управления. Как правило, пьезодвигатель имеет свой корпус с различными конструктивными элементами, поддерживающими работу одного, а иногда нескольких пьезоактюаторов. Это могут быть элементы, обеспечивающие

предварительное сжатие актюаторов, их тонкую настройку и юстировку, кинематическую связь с объектом управления и др. В конструкцию ПД могут быть встроены различные датчики ускорений, скоростей и перемещений вместе с их вторичными преобразователями. В технической литературе, наряду с термином пьезодвигатель, можно встретить такие названия как пьезокорректор, пьезодвижитель, пьезодефлектор, пьезоподвижка и т.д. По своей сути они обладают всеми перечисленными выше свойствами и характеристиками и поэтому удобнее использовать для всех устройств одно название – пьезодвигатель (ПД).

В настоящее время на практике применяется большое разнообразие пьезоэлектрических двигателей, отличающихся по характеру создаваемых перемещений, конструкции, диапазонам перемещений и т.д. Основным элементом пьезодвигателя всегда остается пьезоактюатор, работающий на обратном пьезоэффекте. Все остальные дополнительные конструктивные элементы выполняют вспомогательные функции. Они обеспечивают жесткость конструкции, ее износоустойчивость, преобразование линейного перемещения в угловое, компенсацию теплового расширения, гистерезиса и последействия и т.д.

Представляется возможным подразделить их на три основные группы:

1. Резонансные (ультразвуковые) двигатели линейных и угловых перемещений (ударного действия)
2. Силовые двигатели с ограниченным диапазоном угловых и линейных перемещений.
3. Шаговые двигатели микроманипуляторы.

2.4.1 Резонансный (ультразвуковой) пьезоэлектрический двигатель

(РПД) – новый тип нанодвигателя, который может быть использован в различных областях науки - медицине, клеточных технологиях, космической технике и многих других. РПД предназначен для формирования непрерывного, шагового или сканирующего режимов, а также точного углового или линейного позиционирования различных объектов. Важным положительным качеством РПД является то, что при снятии напряжения управления фиксируется положение ротора. По сравнению с традиционными электродвигателями, РПД имеет низкую скорость (30…300 об/мин), высокий момент (0.1…100Н*м), высокое угловое разрешение (0.1…1.0 угл.сек).

РПД можно разделить на два типа:

- ударного типа с дискретным перемещением подвижной части;

- волнового типа с непрерывным перемещением подвижной части.

В большинстве конструкций ударного типа реализуется ударное взаимодействие между "статором" и "ротором" в зоне их контакта. Подвижная часть приводится в движение под действием ударных импульсов следующих с частотой равной собственной частоте пьезоэлемента. Частота собственных колебаний может доходить до нескольких Мгц. Двигатели такого типа бывают с пьезоэлектрически активным статором и пассивным ротором, активным ротором и пассивным статором, активными статором и ротором [5]. В них могут быть возбуждены колебания сжатия-растяжения, изгиба, сдвига, крутильные и радиальные; возможно сочетание колебаний двух типов. Все это приводит к большому разнообразию теоретически возможных конструкций двигателей.

Рассмотрим простой пример, иллюстрирующий принцип работы РПД ударного типа (рисунок 2.16).

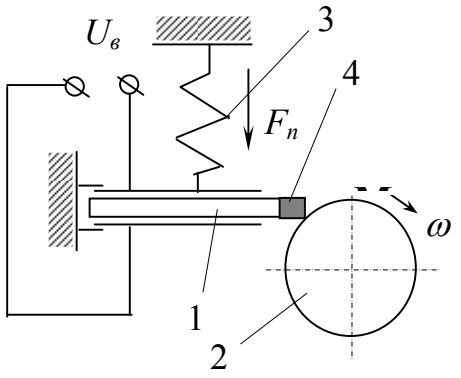


Рисунок 2.16 - Пьезодвигатель ударного действия.

Конструктивно статор 1 (или ротор, или оба совместно) представляют собой пьезорезонатор, преобразующий электрическую энергию в механическую. Статор и ротор 2 прижаты друг к другу силой $F_п$, которая создается упругим предварительно напряженным элементом 3. На статоре в месте соприкосновения с ротором крепится опора из износостойкого материала 4 (например, алунда), акустически согласованная с пьезорезонатором. Геометрическая форма пьзорезонатора может быть разнообразной: пластины, стержни, спирали, диски, полые цилиндры. Пьезорезонаторы крепятся к опорам в точках колебательной скорости с помощью акустически изолирующего материала. Произведение толщины материала на модуль Юнга должно быть не менее, чем в 10 раз меньше

соответствующего значения пьезорезонатора (например, фторопласт, резина, дерево). К электродам пьезорезонатора подводится переменное напряжение возбуждения $U_в$.

Следует отметить, что у двигателей рассматриваемого типа в контактной точке происходит фактически соударение двух поверхностей, поэтому они и названы пьезодвигателями ударного типа. Двигатель, представленный на рисунке 2.16, является нереверсивным, однако при определенном усложнении конструкции возможно создание реверсивной конструкции двигателя. Угловая скорость ротора ω_p может быть определена через линейную скорость ротора ν_p и его диаметр D_p по формуле

$$\omega_p = \frac{2v_p}{D_p}. \qquad (2.7)$$

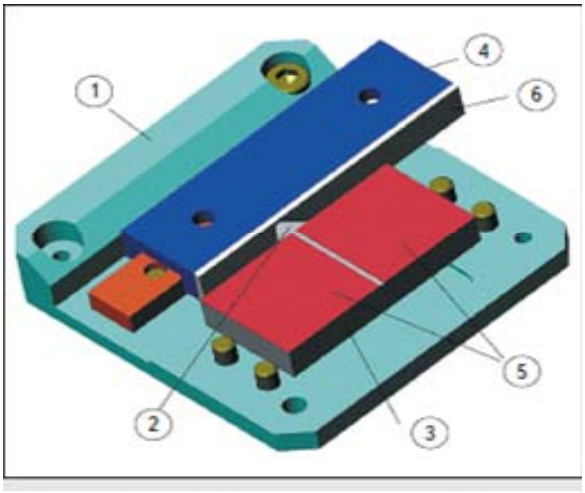
Отсюда частота вращения в оборотах в минуту

$$n = \frac{60V_p}{\pi D_p}. \qquad (2.8)$$

Если диаметр ротора D_P = 0,5 - 5 см, то n = 3000 - 300 об/мин. Таким образом, изменяя только диаметр ротора, можно в широких пределах изменять частоту вращения машины. Линейная скорость ротора зависит от амплитуды и частоты смещения свободного конца вибратора. При увеличении напряжения питания двигателя в довольно широком диапазоне возрастает амплитуда смещения вибратора, соответственно увеличивается линейная и угловая скорость ротора. Максимальная амплитуда смещения осциллятора ограничивается пределом прочности материала или перегревом пьезоэлемента. Перегрев материала свыше критической температуры - температуры Кюри, приводит к потере пьезоэлектрических свойств. Для многих материалов температура Кюри превышает 250^0C, поэтому максимальная амплитуда смещения практически ограничивается пределом прочности материала. С учетом двукратного запаса по прочности принимают V_P = 0,75 м/с. Выполняя двигатели с ротором большого диаметра D_p, можно получать низкую частоту вращения ротора ω_p без применения механических редукторов при сохранении достаточно высокой мощности на валу на единицу массы. У современных двигателей номинальное напряжение питания лежит в диапазоне от десятков вольт до 400 вольт; регулирование напряжения позволяет получать частоты вращения в диапазоне от 20 до 10.000 об/мин. Частота напряжения питания обычно выбирается из условия резонанса

колебаний; у современных вращающихся двигателей номинальная частота порядка 50-80 кГц.

Двигатель аналогичной конструкции может работать и в шаговом режиме при рабочей частоте вращения 0,2-6 об/сек. При подаче одиночного импульса на обкладки пьезоэлемента выполняется дискретный шаг порядка 0,1– 4 угловых секунд. Под действием напряжения пьезорезонатор совершает механические колебания вдоль своей длины (в других конструкциях могут быть использованы изгибные, крутильные и др. колебания) и совершает микроудары по ротору, передавая ему полезный момент.

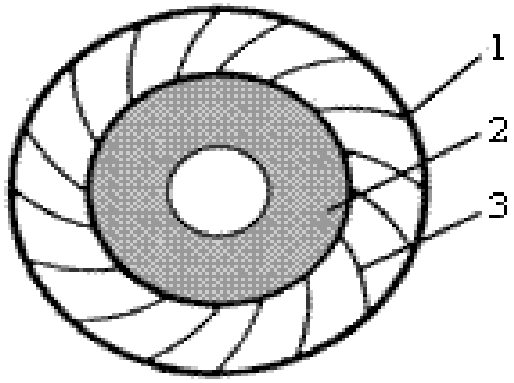


Ротор приводится во вращение. Нужно сказать, что величина полезного момента невелика, кроме того, при контактном сцеплении пьезорезонатора и подвижной части может происходить их проскальзывание относительно друг друга. Это приводит к износу, снижению КПД и точности отработки перемещений. Развиваемая мощность таких двигателей находится в диапазоне от 1 до 10 Вт и по сравнению с микромашинами такой же мощности они имеют ряд преимуществ: более высокие динамические свойства, высокая разрешающая способность по перемещению, в 1,5 - 2 раза лучшие массогабаритные показатели, они имеют высокую равномерность вращения и более широкий частотный диапазон отработки внешних

воздействий. Наиболее перспективной областью их применения являются различные электромеханические системы лентопротяжки.

В РПД волнового типа с «распределенным контактом» осуществляется «непрерывное» фрикционное взаимодействие волнового движения упругого преобразователя и приводимой подвижной части с усреднением волнового поля.

Рассмотрим конструктивную схему двигателя второго типа с активным статором, совершающим *радиальные* колебания, представлена на рисунок 2.18.



Внешний пассивный ротор 1 выполнен в виде тонкостенного цилиндра. Внутри него находится кольцевой цилиндрический статорный пьезоэлемент 2, на торцевых поверхностях которого нанесены электроды, а внутренняя поверхность покрыта акустически изолирующим материалом. По внешней образующей статора закреплены упругие стальные пластины – толкатели 3, установленные под определенным углом к внутренней поверхности ротора и прижатые к нему с некоторым усилием.

Если внешний диаметр пьезоэлемента значительно больше его толщины и высоты, то при подаче переменного напряжения на торцевые электроды внешняя поверхность пьезоэлемента начинает совершать радиальные колебания. При положительной полуволне сигнала диаметр статора увеличивается и толкатели, увеличивая нажатие на ротор, поворачивают его

на некоторый угол. Отрицательная полуволна сигнала вызывает уменьшение диаметра статора, и толкатели проскальзывают по внутренней стороне поворачивающегося ротора.

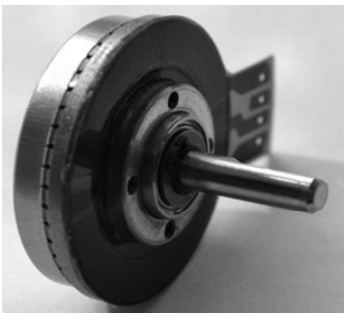
Рассмотренный пьезодвигатель является нереверсивным. Однако совмещение в одном корпусе двух таких комплектов с разворотом толкателей в противоположные стороны позволяет получить реверсивный двигатель.

В таблице 2.7 приведены технические данные таких двигателей, выпущенных в виде опытной серии.

Таблица 2.7

Тип пьезодвигателя	ПД-20	ПД-28	ПД-46	ПД-57
Номинальный момент, Нм	0,08	0,35	0,7	1,2
Максимальный момент, Нм	0,15	0,6	1,5	2,5
Частота вращения, об\мин	100	60	30	20
Напряжение питания, В	40	60	60	60
Ток, А	0,1	0,1	0,2	0,3
Частота напряжения питания, кГц	74 – 78	54 – 58	36 – 38	30 – 34
Размеры нереверсивного двигателя ,мм	D35x12	D50x20	D70x20	D82x20
Размеры реверсивного двигателя ,мм	D37x20	D52x40	D72x40	D90x40

РПД являются уникальными и высокотехнологичными исполнительными устройствами, их конструкции постоянно модернизируются, а характеристики улучшаются. Расширяется и область их применения: от устройств лентопротяжки и сервоприводов в автомобилях (подъемники стекол, устройства управления положением фар и т.д.) до систем, предназначенных для манипуляций с клетками, генной инженерии, репродуктивной биологии и медицины.



2.4.2 Силовые двигатели с ограниченным диапазоном угловых и линейных перемещений

Ко второй группе относятся пьезодвигатели линейных и угловых перемещений, работающие соответственно в субмикрометровом и микрометровом, секундном и минутном диапазонах. Причем, их частотный диапазон ограничен областью до первого электромеханического резонанса (обычно до 1000 Гц). Как правило, это устройства ограниченного диапазона, создающие значительные усилия (до 5000 - 10000 Н). Применяются для перемещения и стабилизации объектов значительной массы от десятков грамм до сотен килограмм. Линейные двигатели традиционно применяются для юстировки различных оптических приборов, где требуются сравнительно большие диапазоны перемещений (до 10^{-4} м) и высокая точность останова ($10^{-8} - 10^{-9}$ м), двигатели угловых перемещений применяются в адаптивной оптике и сканирующих устройствах различного назначения. Рабочий диапазон частот обычно не превышает 100 Гц. Если проанализировать все конструктивные решения таких устройств, то можно выделить некоторые базовые конструкции. Хотелось бы остановится на трех наиболее популярных из них, которые заложены в основу большинства современных пьезодвигателей данной группы. К ним относятся:

1. Составная пакетная конструкция
2. Биморфная конструкция.
3. Дифференциальная конструкция.

Пакетная конструкция строится на основе актюаторов пакетного типа, рассмотренных ранее. Они могут состоять из дисков, колец, цилиндров и т.д. Жесткость таких конструкции позволяет обеспечивать максимально возможные усилия среди всех пьезоэлектрических конструкций.

На рисунке 2.20 представлена простейший вариант конструкция такого двигателя. Пьезопакет 2 состоит из пьезодисков и силопередающих прокладок 4. Он устанавливается в корпусе 1 между винтом 3 и штоком 7. Механический контакт штока и винта с силопередающими прокладками осуществляется через стальные центрирующие шарики. Тарелочная пружина 6 служит для обеспечения предварительного сжатия пакета при повороте винта 3. Такой двигатель может развивать достаточно большие усилия (до 200 Н) и служит для линейных микроперемещений объектов с достаточно большой массой (десятки кг).

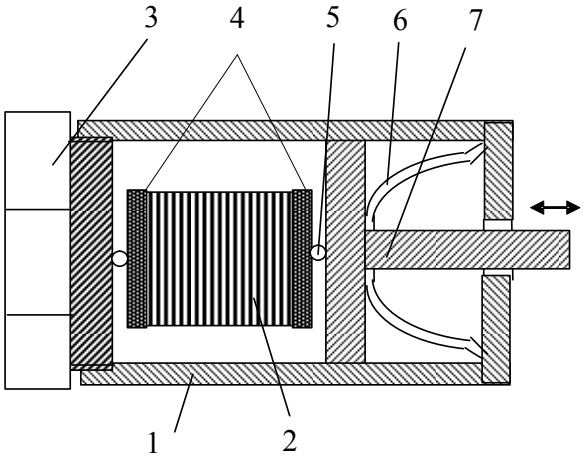
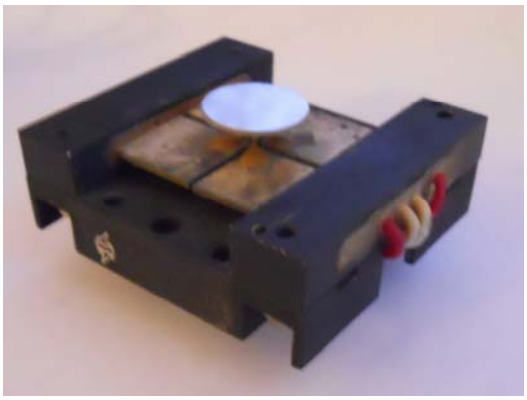


Рисунок 2.20 - Пакетный (составной) пьезодвигатель.

Его частотный диапазон ограничен собственным электромеханическим резонансом (1 кГц), величина которого зависит от массы перемещаемого объекта. Диапазон перемещения от 2 до 50 мкм (зависит от количества элементов и напряжения управления). Статическая характеристика имеет гистерезисный характер, значение которого находится в пределах 10 - 30 % и определяется главным образом свойствами пьезоматериала, степенью предварительного сжатия пакета и величиной управляющего напряжения. Современные составные пьезодвигатели могут иметь встроенные измерительные преобразователи перемещений. На рисунке 2.21 представлен двигатель с встроенным индуктивным датчиком микроперемещений, который обеспечивает обратную связь по положению [7].

Биморфная конструкция используется для увеличения диапазона линейных перемещений (до ед. мм) и получения угловых перемещений (до нескольких градусов) объектов небольшой массы до десятков грамм. Конструктивной основой таких двигателей являются изгибные пьезоактюаторы. В качестве примера можно привести пьезодефлектор ПД-2 (см. Рисунок 2.22) [12], который предназначен для управления оптическим излучением в пространстве, т.е. по двум координатам. Угловое перемещение зеркала обеспечивают две пары биморфных консольно закрепленных пластин, расположенных диагонально. Управляющее напряжение в каждой паре подается так, что одна из пластин прогибается вниз, а другая вверх (для увеличения угла поворота). Форма напряжения управления задает траекторию движения луча (это могут быть линии, окружности, эллипсы и т.д.).

Линейные перемещения могут быть получены при использовании биморфов, выполненных в виде колец или дисков, которые крепятся жестко по окружности. В этом случае конструкция прогибается и ее центр совершает линейное перемещение, которое является рабочим.



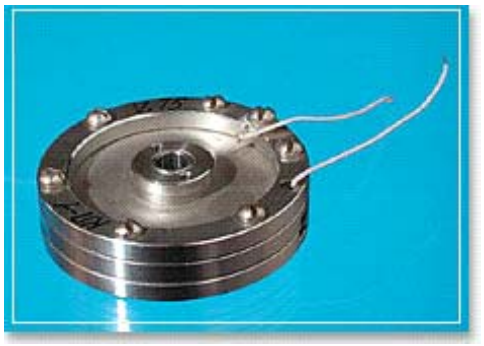


Рисунок 2.22 - Биморфный пьезоэлектрический дифлектор

На таком принципе построен корректор пьезоэлектрический КП-1 (рисунок 2.23) [12], в котором кроме биморфа используются два металлических диска (пьезоэлементы наклеены на один из них с двух сторон), которые обеспечивают высокую жесткость конструкции и параллельность хода центральной части.

Дифференциальная конструкция применяется, когда необходимо компенсировать температурную погрешность (тепловое расширение рабочего элемента) и увеличить диапазон перемещений без существеннного увеличения величины управляющего напряжения и габаритов двигателя. Такая конструкция может быть построена как на элементах пакетного типа, так и на биморфных элементах. На рисунке 2.24 представлена дифференциальная конструкция на элементах пакетного типа. Рабочий элемент 2 состоит из пьезоэлементов , выполненных в виде шайб (дисков), а элемент 3 – из колец. Оба элемента крепятся к подвижному основанию 1, а элемент 3 своим вторым торцом жестко закреплен на неподвижном основании 4. Свободный торец элемента 2 совершает рабочие перемещения. Управляющее напряжение подается одновременно на оба элемента так, что элемент 2 – расширяется, а 3–сжимается.

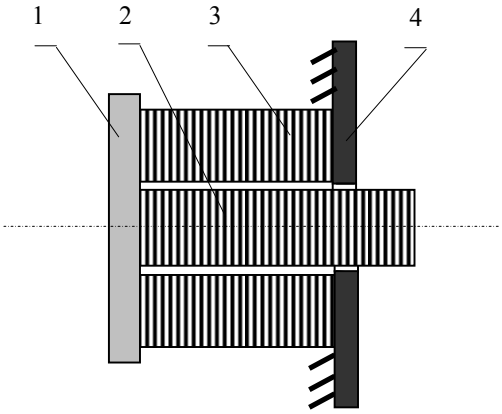


Рисунок 2.24 –
Дифференциальная конструкция
пьезодвигателя

Рабочее перемещение относительно неподвижного основания будет результатом суммирования величин их деформаций. Тепловые деформации будут вычитаться. При точном расчете габаритов пьзоэлементов можно добиться полной компенсации температурной погрешности.

2.4.3 Шаговые двигатели

К третьей группе относятся шаговые двигатели манипуляторы, которые служат для перемещения объектов на плоскости или в пространстве. В основе их конструкций заложены те же принципы построения, что и во второй группе. Т.е. рабочий элемент может быть как биморфным (рисунок 2.25 а), так и пакетным (рисунок 2.25 б). Для обеспечения шагового режима в конструкции, как правило, имеются фиксирующие устройства, различного принципа действия от электромагнитных до электрореологических (измение вязкости вещества под действием электрического поля). Биморфная конструкция рис.10.4,а) отличается тем, что в ней роль фиксирующих и рабочих элементов выполняют пьезоэлектрические элементы. Рабочие 2 и фиксирующие 1 элементы контактируют перемещаемым объектом 5 через фрикционные прокладки 3. Напряжение управления подается сначала на рабочие элементы, которые захватывают объект и перемещают его на один шаг. За тем напряжение подается на фиксирующие элементы, которые фиксируют объект в данном положении. Напряжение управления снимается с рабочего элемента, и он занимает исходное положение.

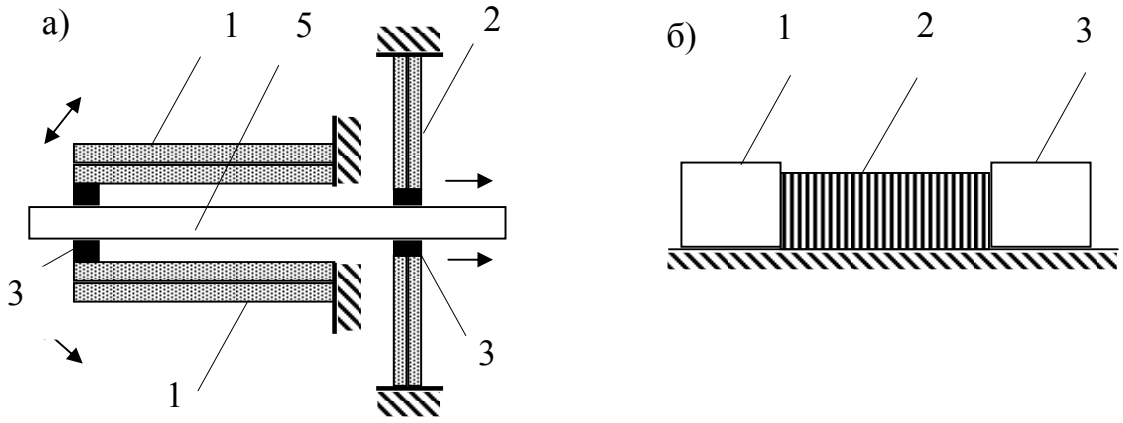


Рисунок 2.25 – Шаговые двигатели (а) – с биморфным активным элементом, б) – с активным элементом пакетного типа)

Такой цикл повторяется, и объект линейно перемещается. Шаговый двигатель (рисунок 2.25 б) имеет два фиксирующих элемента 1 и 3 , например, электромагнитного типа и рабочий пьезопакет 2. Элементы 2 фиксируют положение рабочего пакета относительно горизонтальной поверхности. Рабочий цикл начинается с подачи напряжения на

элемент 1, за тем напряжение управления подается на пакет 2, который удлиняется и перемещает элемент 3 на один шаг, после чего срабатывает элемент 3. напряжение с элемента 1 и пакета 2 снимается. Элемент 1 перемещается на один шаг в том же направлении. При многократном повторе цикла двигатель будет перемещаться по плоскости в заданном направлении. При необходимости двух координатного перемещения в конструкции используют два таких набора, расположенных перпендикулярно друг другу.

Диапазон перемещений таких двигателей ограничен лишь размерами рабочей поверхности. Минимальный шаг пермещения определяется свойствами и размерами пьезоэлементов и величиной управляющего напряжения. Плавность хода зависит от минимального шага и частоты следования управляющих импульсов напряжения.

3 Математическое описание пьезоэлектрических исполнительных устройств

3.1. Математическая модель многослойного тонкопленочного актюатора

Для того чтобы получить математическое описание актюатора необходимо уточнить его конструктивные особенности, условия его работы и принять некоторые допущения.

Рассмотрим тонкопленочный актюатор поперечного сечения S_o, закрепленный одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер l_o которого изменяется под действием электрического поля E в направлении действия поля на значение Δl , и перемещающий объект управления массой m_o , сочлененный с его свободным концом. Кроме объекта управления перемещаются также элементы объема активной части пьезоэлемента, масса которого m_k чаще всего меньше, чем масса исполнительного органа. При этом инерционность перемещающихся элементарных объемов актюатора будет учтена при расчете суммарной приведенной подвижной массы m_Σ, которая будет равна сумме массы m_o и части массы пьезокерамики m_k , так как пьезоэлемент закреплен одним концом и эта его часть не принимает участия в движении. Влиянием внутренних электродов и припоя на упругие свойства актюатора можно пренебречь, учитывая то, что толщина их слоя в 20-30 раз меньше слоя керамики, а возможные межэлектродные зазоры были выбраны начальным сжатием актюатора в ходе технологического процесса его изготовления. Т.е., с точки зрения упругих характеристик, актюатор рассматривается как монолитный блок. Будем считать, что никаких заметных перемещений, за

исключением перемещений по толщине, не существует в силу того, что керамика поляризована по толщине и внешнее поле приложено вдоль направления предварительной поляризации. Деформации во всем объеме будем считать однородными, а в целом, весь актюатор рассматривать как электроупругую систему с одной степенью свободы. В этом случае нижние индексы параметров в уравнениях пьезоэффекта и пьезосреды можно опустить. Кроме того, для того, чтобы остаться в рамках линейных представлений модели устройства, будем считать, что напряженность управляющего поля существенно меньше поля предварительной поляризации (когда напряженности данных полей сравнимы возникают значительные нелинейные искажения, которыми пренебрегать нельзя), а рабочий частотный диапазон находится вдали от первого электромеханического резонанса (верхняя граница диапазона отличается от частоты резонанса не менее чем на порядок).

При соблюдении всех перечисленных условий представляется возможным использование хорошо известной математической модели Никольского А.А. [6] для монолитного пьезоэлемента, который рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами.

Основное динамическое усилие в рассматриваемом случае действует на пьезоактюатор в направлении приложенного поля. Для описания пьезоэффектов воспользуемся уравнениями, где в качестве независимых переменных используются T (механическое напряжение) и E (напряженность электрического поля):

$$\begin{aligned} S &= s^E T + d_n E \\ D &= d_t T + \varepsilon^T E \end{aligned}. \qquad (3.1)$$

Нас интересует уравнение обратного пьезоэффекта. Запишем его с учетом того, что механическое напряжение материала препятствует деформации из-за пьезоэффекта:

$$S = -s^E T + d_n E \qquad (3.2)$$

Теперь запишем это уравнение с учетом принятых обозначений:

$S = \frac{\Delta l}{l}$, $s^E = \frac{1}{Y}$, где Y – модуль Юнга (вдоль выбранной координаты 3).

Умножив все члены уравнения обратного пьезоэффекта на YS_o, получим:

$$\frac{\Delta l}{l_0} YS_0 = d_n YS_0 E - S_0 T . \qquad (3.3)$$

Левая часть выражения описывает усилие упругой деформации:

$$F_y = \frac{YS_0}{l_0} \Delta l = K_y \Delta l . \qquad (3.4)$$

Первое слагаемое правой части определяет усилие, вызванное приложенным электрическим полем:

$$F_э = d_n YS_0 E . \qquad (3.5)$$

Механическое напряжение, входящее во второе слагаемое правой части уравнения определяется статическим усилием F_c, приложенным к ОУ и действующим на актюатор. Кроме того, во время движения ОУ возникают динамическая сила пропорциональная ускорению $F_{дин}$ и демпфирующее усилие пропорциональное скорости смещения ОУ, вызванное процессами, связанными с потерей энергии в актюаторе. Определив все действующие силы, можно составить уравнение равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части актюатора:

$$F_y = F_э + F_c + F_д + F_{дин} , \qquad (3.6)$$

где $F_{дин} = -\frac{m_\Sigma d^2 \Delta l}{dt^2}$, $F_д = -\frac{K_д d\Delta l}{dt}$, $F_y = K_y \Delta l$ - усилие упругой деформации, $K_д$ - коэффициент внутреннего демпфирования.

Воспользуемся выражением для тока смещения в диэлектрике:

$$I_{см} = \frac{C_0 dU}{dt} + K_П V , \qquad (3.7)$$

где $C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 (1 - K_{эм}^2) NS_0}{l_3}$ - емкость актюатора

$K_П = K_y d_n$ - коэффициент прямого пьезоэффекта,

$U = El_3$ - напряжение, приложенное к электродам актюатора,

$V = \frac{d\Delta l}{dt}$ - скорость смещения ОУ.

Далее необходимо определить связь между усилием $F_э$ и электрическим напряжением управления:

$$F_э = \frac{NYS_0 d_n U}{l_3} = N^2 K_o U \,, \qquad (3.8)$$

где K_o – коэффициент обратного пьезоэффекта.

Если заряд актюатора осуществляется от источника ЭДС (усилителя) e_n через его эквивалентное внутреннее сопротивление $R_в$, то для такой цепи справедливо уравнение:

$$\frac{(e_n - U)}{R_в} = I_{см}. \qquad (3.9)$$

Подставим в уравнение (11), получим после некоторых преобразований:

$$e_n = C_0 R_в \frac{dU}{dt} + U + K_П R_в V \,, \qquad (3.10)$$

где $C_0 R_в = T_э$ - электростатическая постоянная времени.

Включим все основные уравнения в систему и запишем их в операторной форме:

$$(T_э p + 1)U(p) + K_П R_в V(p) = e_n(p) \;\; , \qquad (3.11)$$

$$F_э(p) = K_o U(p) \,, \qquad (3.12)$$

$$F_{дин}(p) = F_э(p) + F_c(p) - F_д(p) - F_y(p), \qquad (3.13)$$

где $V(p) = p\Delta l(p)$, $F_д(p) = K_д p\Delta l(p)$, $F_y(p) = K_y \Delta l(p)$.

Используя полученные уравнения можно составить структурную схему модели актюатора, которая приведена на рисунке 3.1.

Используя ту же систему или полученную структурную схему можно записать передаточную функцию актюатора по перемещению:

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} = \frac{K_O / K_y}{T_э \frac{m_\Sigma}{K_y} p^3 + (\frac{m_\Sigma}{K_y} + T_э \frac{K_д}{K_y}) p^2 + (T_э + \frac{K_д}{K_y} + R_в K_П \frac{K_O}{K_y}) p + 1} \,. \qquad (3.14)$$

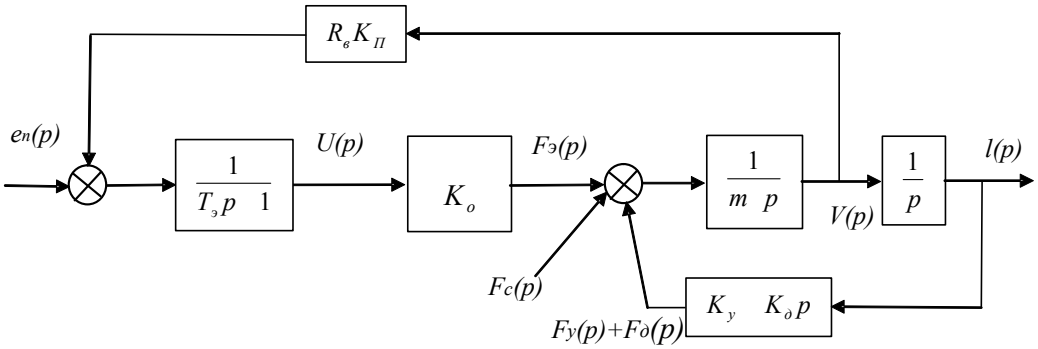


Рисунок 3.1 – Структурная схема модели тонкопленочного многослойного актюатора как объекта с сосредоточенными параметрами при управлении от источника э.д.с.

Различными аппаратными средствами можно добиться минимального влияния прямого пьезоэффекта ($K_П$) и инерционности преобразователя ($T_э$). Так, например, снизить выходное сопротивление усилителя можно, применив мощные выходные транзисторы, а для минимизации влияния прямого пьезоэффекта рекомендуется применять такие меры как организация специальных быстродействующих контуров регулирования управляющего поля и включением в схему усилителя дополнительных диодов, образующих цепи замыкания наведенных токов. Кроме того, влияние внутреннего демпфирования как правило, очень мало и им тоже можно пренебречь. В таких условиях получим существенно упрощенную передаточную функцию актюатора:

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} \approx \frac{K_O / K_y}{\frac{m_\Sigma}{K_y} p^2 + 1}. \qquad (3.15)$$

Полученная модель актюатора (консервативное звено) может рассматриваться как самое грубое первое приближение. Конечно, колебание будут затухать из-за внутренних потерь в керамике и их можно учесть, зная добротность материала, через декремент затухания.

Передаточная функция с учетом потерь будет иметь вид:

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} = \frac{K_O / K_y}{\frac{m_\Sigma}{K_y} p^2 + \frac{K_д}{K_y} p + 1} = \frac{K_O / K_y}{T_м^2 p^2 + 2\xi T_м p + 1}, \qquad (3.16)$$

где $T_м$ - механическая постоянная времени актюатора;

$\xi = \frac{1}{2Q_м}$ - декремент затухания переходного процесса,

Q - механическая добротность материала.

Для многослойных тонкопленочных актюаторов (особенно с большим диапазоном перемещений, более 20 мкм), в силу большого значения собственной емкости, пренебречь электростатической постоянной не всегда удается, тогда вполне приемлема передаточная функция вида:

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_п(p)} = \frac{K_O / K_y}{(T_э p + 1)(T_м^2 p^2 + 2\xi T_м p + 1)}. \qquad (3.17)$$

Нужно еще раз отметить, что расчетные параметры передаточных функций всегда дают весьма приближенные к действительности результаты. Это объясняется отклонением паспортных значений постоянных материала и в целом актюатора от действительных значений. Поэтому, для получения более достоверных результатов, рекомендуется для расчета параметров передаточных функций пользоваться экспериментально определенными значениями следующих величин:

$$m_\Sigma, K_y, K_O, C_0, R_в, \xi .$$

При таком подходе данная модель будет справедлива и для пакетных, и для биморфных пьезоактюаторов.

3.2 Гистерезис, последействие и ползучесть пьезоэлектрических исполнительных устройств

И так, нами была получена линейная динамическая модель пьезоактюатора, в которой влияние потерь на внутреннее трение (механические потери) и дипольную релаксацию (диэлектрические потери) учтено косвенно через параметр затухания, который точнее всего можно определить экспериментально. Другим проявлением указанных потерь являются эффекты последействия (ползучести) и гистерезиса, из-за которых, при периодическом изменении напряжения управления, зависимость перемещения от электрического напряжения описывается двумя криволинейными ветвями, образующими петлю. Площадь такой петли может служить мерой потерь энергии за один цикл в единице объема пьезоматериала.

Дипольная релаксация и внутреннее трение представляют собой очень сложные и многообразные процессы, действующие на молекулярном и даже на

электронном уровне. Подробное их изучение выходит за рамки данного курса. Достаточно отметить лишь некоторые особенности. Диэлектрические потери обычно характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$, который равен отношению активной и реактивной составляющих тока, текущего через пьезоэлемент. Тангенс угла диэлектрических потерь определяет потери электрической энергии в диэлектрике, которые переходят в тепловую энергию. Обычно для пьезокерамик он находится в пределах 0,01 – 0,06. Диэлектрические потери в сильных электрических полях пропорциональны площади петли гистерезиса, их резкий рост наблюдается в области электромеханического резонанса. На низких частотах (до 1000 Гц) изменениями диэлектрических потерь можно с большой долей вероятности пренебречь. Механические потери проявляются в том, что между приложенным напряжением (механическим) и возникающей деформацией имеется фазовый сдвиг σ , а $tg\sigma$ - служит мерой относительных потерь механической энергии за один цикл. Фазовый сдвиг появляется в результате неупругого поведения твердых тел (влияние последействия или ползучести). Для многих материалов, в том числе и пьезокерамик, экспериментально установлено, что скорость процесса деформирования практически не влияет на очертание ветвей петли гистерезиса. Площадь петли, главным образом, определяется амплитудой перемещения. Особенностью пьезоэлектрических устройств, работающих в режиме обратного пьезоэффекта, является наличие обоих видов потерь, величины которых имеют примерно один порядок. Установлено, что углы этих потерь на низких частотах одновременно влияют на общий угол потерь, величину которого можно

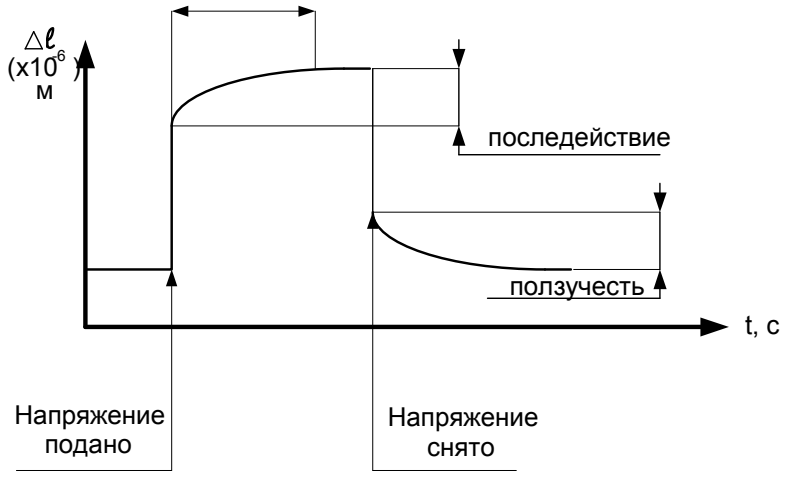


Рисунок 3.2 - Механическая релаксация пьезокерамики

определить по формуле (2.1).

Другим проявлением потерь в материале является ползучесть или последействие, в зарубежной терминологии – creep. При воздействии на пьезоэлемент (пьезоактюатор) электрического поля, он деформируется и при этом у него, как и у многих других твердых тел, наблюдается релаксация, характеризуемая временем перехода в равновесное состояние. Если при чисто механической деформации это связано только с потерями на внутреннее трение, то в нашем случае нужно говорить о совокупном влиянии диэлектрических и механических потерь. Механическая релаксация пьезокерамики и называется последействием (или ползучестью). Эксперименты показывают, что деформация, отставая от приложенного электрического напряжения, происходит как в процессе возрастания напряжения, так и в течение некоторого отрезка времени после прекращения его роста (ползучесть). Величина деформации ползучести для различных пьезоматериалов может находиться в пределах от 4 до 20 % от общего перемещения. Время релаксации также может колебаться от десятых долей секунды до нескольких часов. В отличии от ползучести, последействие представляет собой деформацию пьезоматериала после снятия электрического напряжения и имеет практически такие же численные значения характеристик. Временные зависимости деформаций последействия и ползучести представляются экспоненциальными функциями см. рисунок 3.2.

3.3 Учет влияния гистерезиса и последействия (ползучести) при проектировании и моделировании пьезоэлектрических исполнительных устройств

Последействие (ползучесть) в полной мере проявляются в медленно протекающих процессах (время протекания процесса сравнимо со временем релаксации). Например, при снятии статических характеристик, когда переход от одной точки к другой происходит через некоторое время.
Этим объясняется отсутствие повторяемости статических характеристик снятых в разном темпе. При моделировании пьезоэлектрических устройств, процессы последействия рекомендуется учитывать с помощью апериодических звеньев первого порядка.

Если имеют место быстропротекающие (по сравнению с последействием) периодические процессы, представляется возможным пренебрегать влиянием последействия, так как его вклад в общую деформацию будет пренебрежимо малым, и принимать во внимание только гистерезис статической характеристики. Причем, исходя из выше сказанного, можно утверждать, что очертание петли гистерезиса будет неизменным, по крайней мере, на низких частотах (до 1000

Гц), а значит, будет постоянным и угол сдвига фаз между приложенным электрическим напряжением и деформацией при неизменной амплитуде сигнала управления (максимальное значение рабочей частоты сигнала управления должно быть меньше на порядок частоты электромеханического резонанса). Выражение 2.1 дает лишь приближенное значение угла потерь выбранной пьезокерамики, а в пьезоактюаторе, и тем более в пьезодвигателях, которые являются сложными электромеханическими устройствами, где обязательно присутствуют потери в межэлектродных слоях, упругих элементах корпуса и т.д., определить их теоретически не представляется возможным. Поэтому имеет смысл для практических приложений давать оценку потерь по результатам эксперимента, например, через декремент затухания, который можно вычислить, сняв переходную характеристику устройства по простой формуле:

$$\xi = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad , \tag{3.18}$$

где A_n, A_{n+1} –амплитуды двух последовательных колебаний в переходной характеристике устройства.

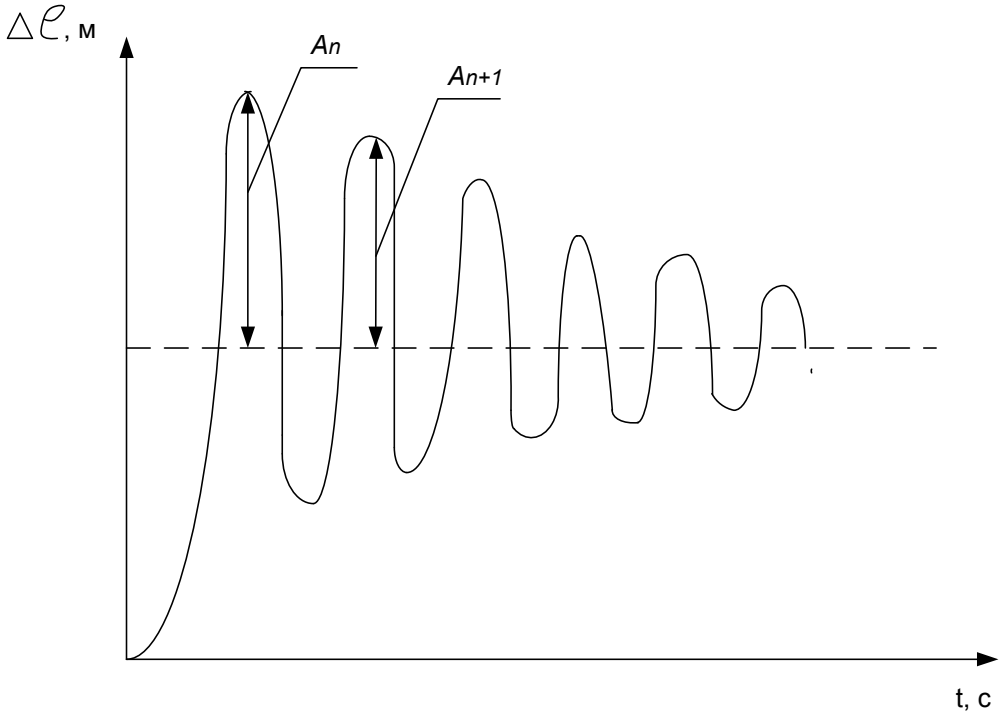


Рисунок 3.3 - Переходная характеристика пьезоэлектрического исполнительного устройства

А вносимый из-за гистерезиса отрицательный фазовый сдвиг можно оценить, сняв статическую характеристику устройства, по формуле:

$$\varphi_{зап} = \arcsin(\frac{\gamma}{100}), \qquad (3.19)$$

где γ - величина гистерезиса в процентах, которая определяется по статической характеристике (рисунок 3.4) устройства, как отношение максимальной ширины петли по координате перемещения к максимальному для данной петли значению перемещения т.е.:

$$\gamma = \frac{h_{\max}}{\Delta l \max} \times 100 \ , \%. \qquad (3.20)$$

Так, если гистерезис меньше или равен 10 %, то вносимое фазовое запаздывание составляет 6 градусов. В реальных условиях такой величиной можно пренебречь. К сожалению, у большинства пьезокерамических устройств гистерезис превышает 20%, а это уже соответствует фазовым сдвигам величиной более 12 градусов и этот фактор уже без внимания оставлять нельзя.

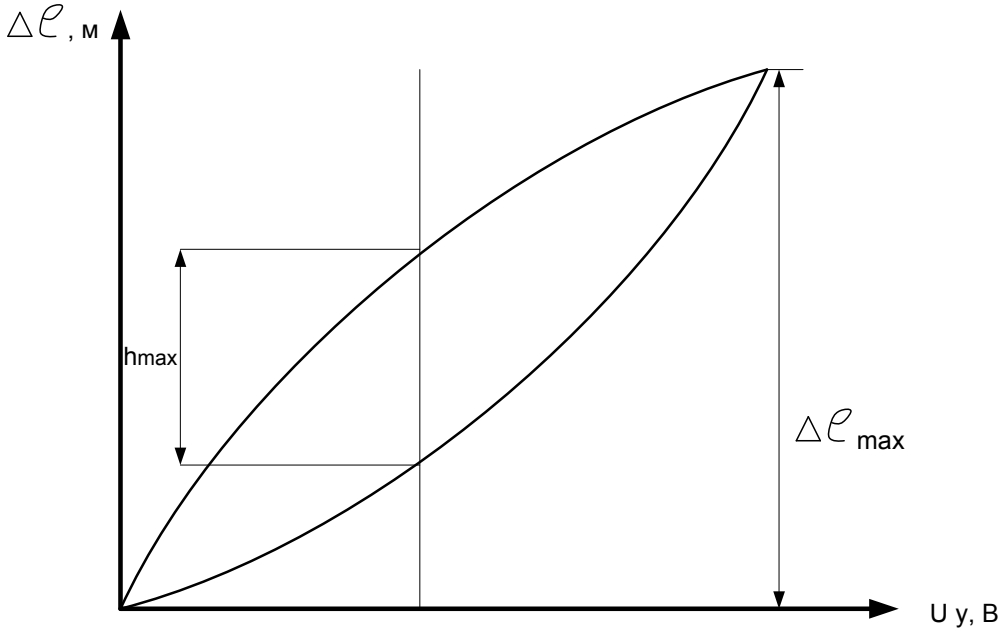


Рисунок 3.4- Статическая характеристика пьезоэлектрического исполнительного устройства

Помимо фазового сдвига, наличие гистерезисной зависимости «выход-вход» у любого устройства приводит к нелинейным искажениям в выходном сигнале. Пьезоэлектрические устройства, как уже отмечалось выше, вносят существенные нелинейные искажения в сильных электрических полях, а точнее, когда их напряженность близка к напряженности поля предварительной поляризации. В этом случае очертания петли гистерезиса приближаются к классическим, имеют явно выраженное насыщение. Исследование различных типов пьезоэлектрических устройств показывает, что при управляющих напряжениях в 5-10 раз меньших по величине напряжения, при котором производилась предварительная поляризация керамики, форма петли гистерезиса близка к эллипсу, спектр выходного сигнала кроме первой гармоники содержит еще одну – две составляющих, амплитуды которых в 40 – 100 раз меньше амплитуды первой гармоники. Т.е. при таких условиях нелинейными искажениями можно пренебречь. Таким образом, если пренебречь нелинейными искажениями в выходной переменной, то единственным проявлением гистерезиса остается отрицательный фазовый сдвиг между перемещением и управляющим напряжением. Его величина в первом приближении не зависит ни от амплитуды управляющего напряжения, ни от частоты, по крайней мере, в интересующем нас диапазоне до 1000 Гц, т.е. остается постоянной. При моделировании пьезоэлектрических устройств, работающих в гармонических режимах, гистерезис можно учитывать с помощью звена чистого запаздывания, которое имеет передаточную функцию вида:

$$W(p) = e^{-\tau p}, \qquad (3.21)$$

где τ - время запаздывания

Нужно, только учитывать, что у звена чистого запаздывания фазовый сдвиг зависит от частоты входного воздействия:

$$\varphi_{зап}(\omega) = -\omega\tau . \qquad (3.22)$$

А это значит, что при моделировании гистерезиса величину τ нужно пересчитывать каждый раз при переходе на другую рабочую частоту.

Более универсальной и удобной для описания в большинстве стандартных режимах является, так называемая, арктангенсная модель гистерезиса, которая имеет вид:

$$\dot{x}(t) = -x(t) + u(t) + \arctan 2x(t) . \qquad (3.23)$$

Такое математическое описание может быть использовано как при гармонических входных воздействиях, так и при любых других

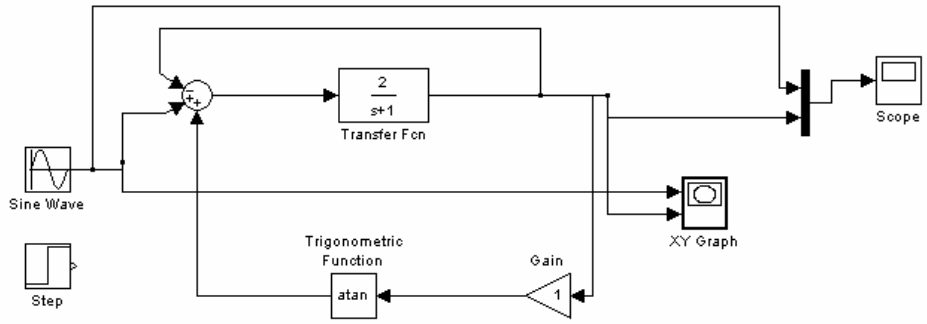


Рисунок 3.5 - Арктангенсная модель гистерезиса в Simulink

воздействиях, характерных для условий работы пьезоэлектрических исполнительных устройств (ступенчатые, линейно возрастающие и убывающие). На рисунке 3.5 представлена схема моделирования в пакете Simulink.

Если на вход модели подать гармонический сигнал единичной амплитуды и частоты, то получаем вполне приемлемый вид зависимости выход-вход, отражающей реальные процессы происходящие в слабых полях (см. рисунок 3.6).

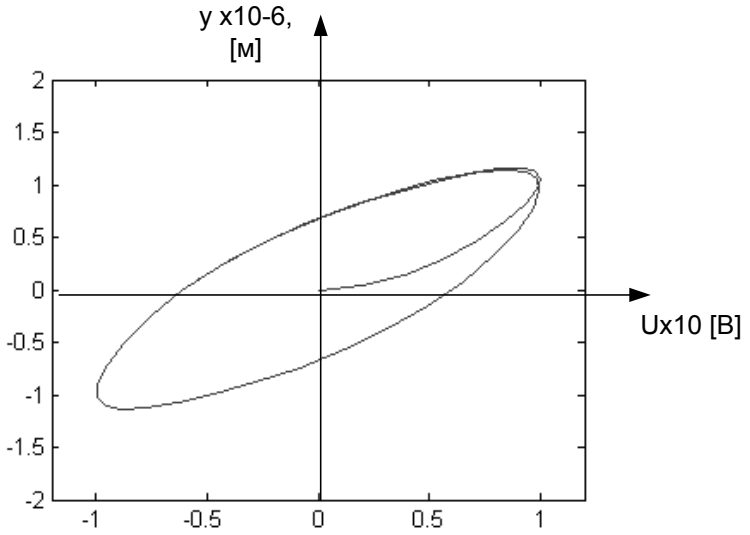
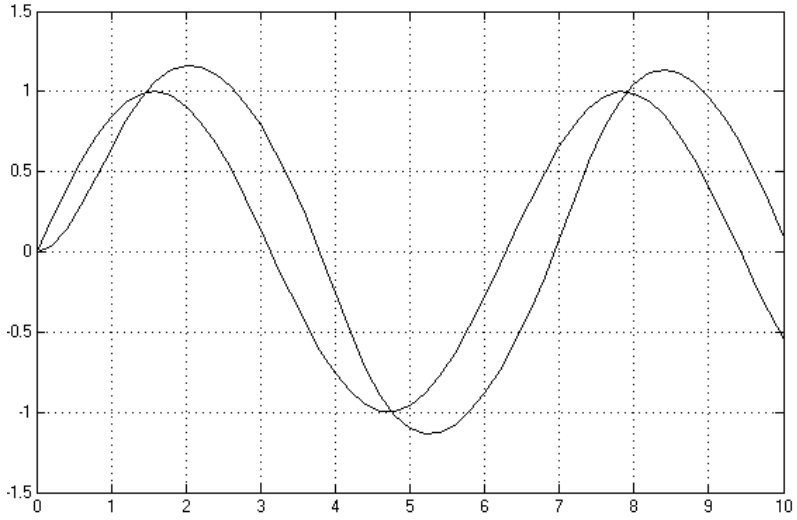
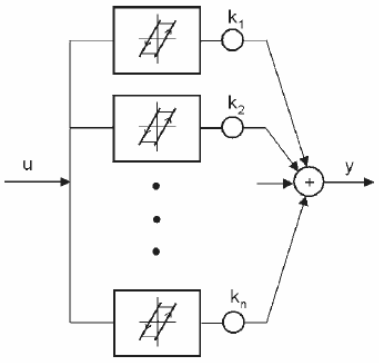


Рисунок 3.6 - Петля гистерезиса при синусоидальном входном сигнале.

Переходная характеристика выглядит, как показано на рисунке 3.7, где можно четко зафиксировать фазовое запаздывание, обусловленное наличием гистерезиса.

Если работа устройства происходит в сильных электрических полях, то форма петли приближается к классической со всеми вытекающими последствиями. В этом случае можно порекомендовать использовать модель Прандтла-Ильшинского. В основе этой модели лежит модель Прейсаха с идеей суммирования частичных нелинейностей в соответствии с рисунком 3.8.





Такой принцип называется блочным. Нелинейность в виде обратного хода (или типа люфта) в соответствии с рисунком 3.9 используется в качестве основного блока модели Прандтла-Ильшинского.

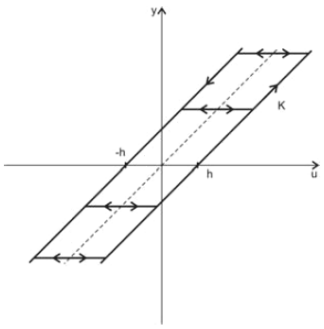


Рисунок 3.9 - Люфт - основной блок модели Прандтла-Ильшинского

Здесь так же используется весовая функция. Выход этой модели получается путем умножения частичных нелинейностей на заданную весовую функцию. Эта модель была позднее усовершенствована, вместо частичной нелинейности типа люфта была использована нелинейность насыщения.

Выход системы для данной модели определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} y(k) &= K(u(k)+h) && \text{для } u(k) < u_- \\ y(k) &= y(k+1) && \text{для } u(k) \in (u_-, u_+) \\ y(k) &= K(u(k)-h) && \text{для } u(k) > u_+ \end{aligned}$$

где $u_- = \dfrac{y(k-1)}{K} - h$ и $u_+ = \dfrac{y(k-1)}{K} + h$ [6],

где $u(k)$ - входное значение k люфтов,

K - средняя высота по оси y,

$h-$ зона нечувствительности люфта.

Зона нечувствительности h выбирается таким образом, чтобы выражение $u(k) < h/2$ не было верным для всех $u(k)$.

Число k определяет порядок системы. Коэффициенты k_i весовое значение люфта в общей сумме, чем оно выше, тем большее влияние оказывает люфт на модель гистерезиса.

Тогда модель гистерезиса будет выглядеть в соответствии с рисунком 3.10.

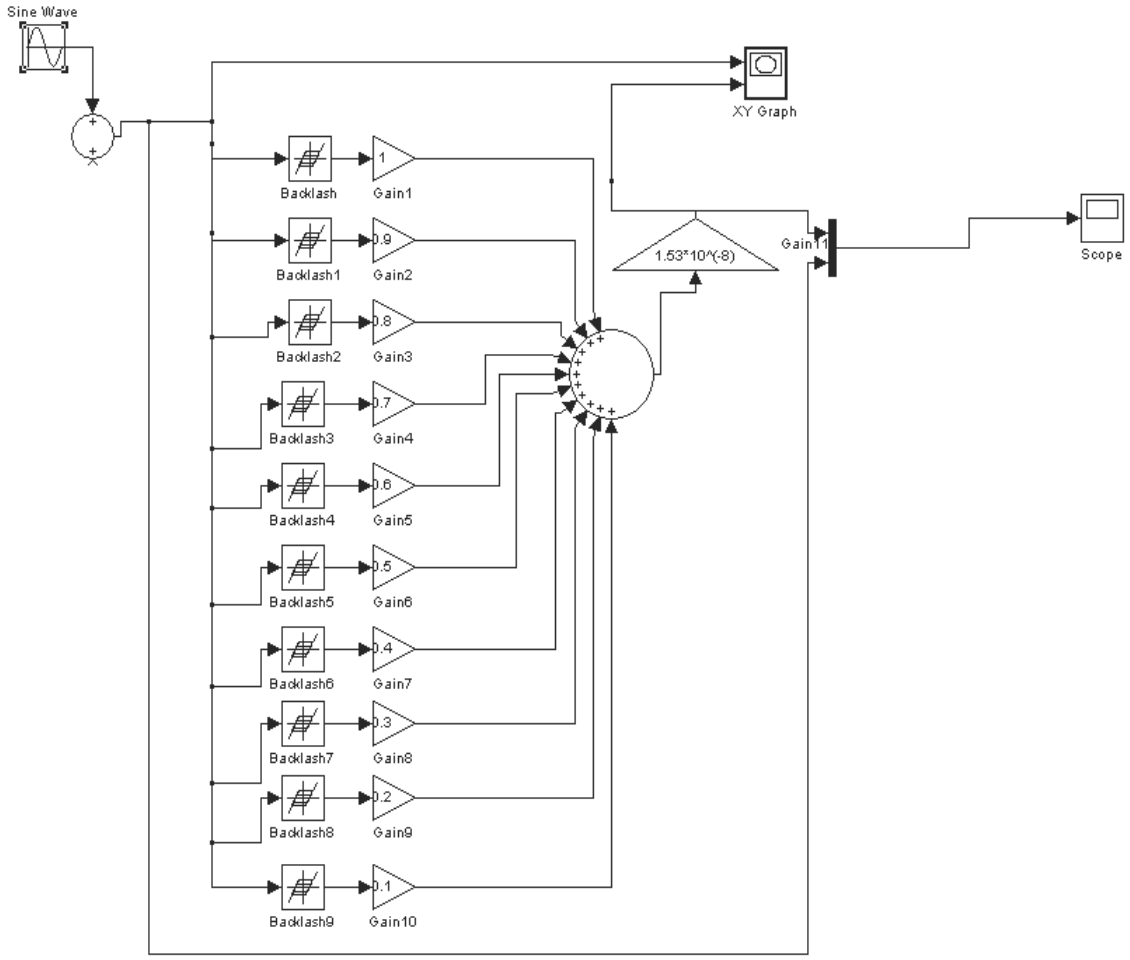


Рисунок 3.10 - Простейшая сумма люфтов.

Петля гистерезиса примет форму, представленную на рисунке 3.11.

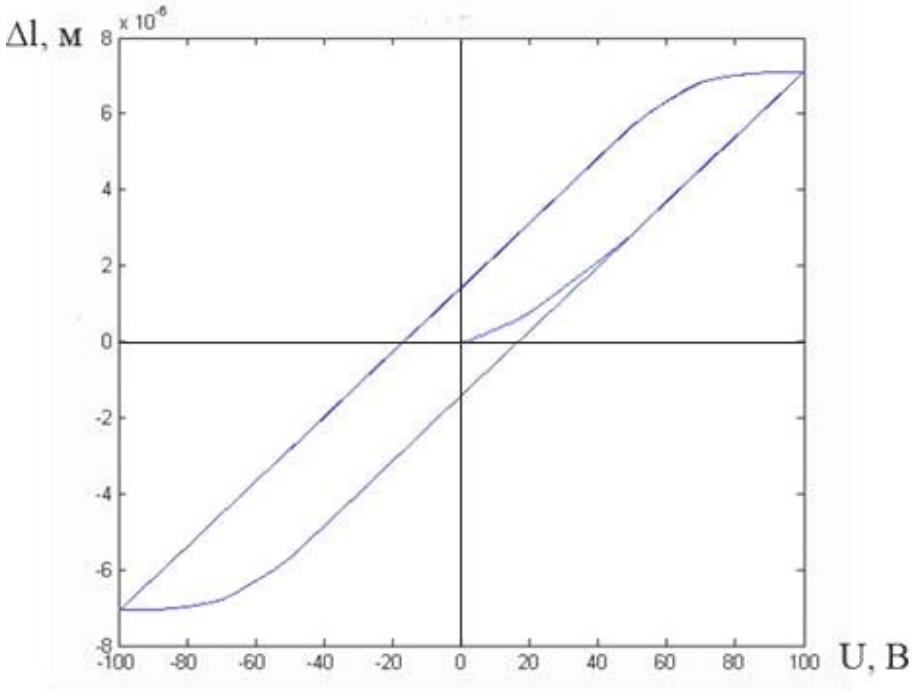


Рисунок 3.11 - Петля гистерезиса при амплитуде синусоидального входного сигнала равной 100 В и перемещении 7 мкм.

4 Цифровой пьезоэлектрический привод

Совершенствование современной элементной базы оптико-механических и фотоэлектрических приборов и систем направлено на повышение их статических, динамических и точностных характеристик, снижение массогабаритных показателей и улучшение эргономических характеристик. Аналоговое управление на сегодняшний день почти полностью себя исчерпало и является сдерживающим фактором развития в силу следующих недостатков:

1. Нестабильность параметров. При изменении внешних воздействий, особенно таких, как температура, влажность, вибрация, давление изменяются параметры аналоговых усилителей, фильтров,

интеграторов и других элементов. Это приводит к изменению основных показателей качества системы управления.

2. Сложность централизованного управления несколькими объектами. Этот недостаток связан с проблемой точной передачи аналоговых сигналов на большие расстояния. При прохождении непрерывных сигналов по кабелям, проводам или радиоканалам они претерпевают искажения за счет ограниченности полосы пропускания канала связи, нелинейности приемопередающего тракта, а также из-за действия разнообразных помех.

3. Сложность серийного производства аналоговых систем управления. Обычно системы управления являются сложными объектами, включающими большое число аналоговых элементов и устройств. При серийном производстве таких систем возникают значительные трудности индивидуальной настройки каждой отдельной системы управления. В итоге все выпускаемые системы отличаются друг от друга параметрами и требуют постоянных довольно сложных и трудоемких регулировок.

Не являются исключением и прецизионные системы управления с пьезоэлектрическими исполнительными устройствами, где до недавнего времени использовались аналоговые устройства с высоковольтными линейными усилителями на выходе, которые имеют высокое энергопотребление и малый коэффициент полезного действия, склонны к самовозбуждению, вследствие наличия обратных связей и нуждаются в индивидуальной настройке для обеспечения устойчивости. Названные и ряд других причин обусловили широкое распространение цифровых систем управления. В цифровых системах информация заключена не в таких параметрах сигналов, как величина напряжения или тока, а в числах, представленных обычно в двоичном коде. Для формирования, передачи и преобразования двоичных сигналов в цифровых системах управления используются отдельные элементы цифровой техники, т.е. регистры, счетчики, логические элементы, а также микропроцессорные комплекты, специализированные или универсальные цифровые вычислительные машины. Применение цифровых систем позволяет устранить основные недостатки аналоговых систем управления. Кроме того, такие неоспоримые преимущества как

- наличие стандартной аппаратуры
- отсутствие дрейфа параметров

- высокое быстродействие
- гибкость, легкость настройки
- возможность реализации сложных законов управления
- возможность адаптации

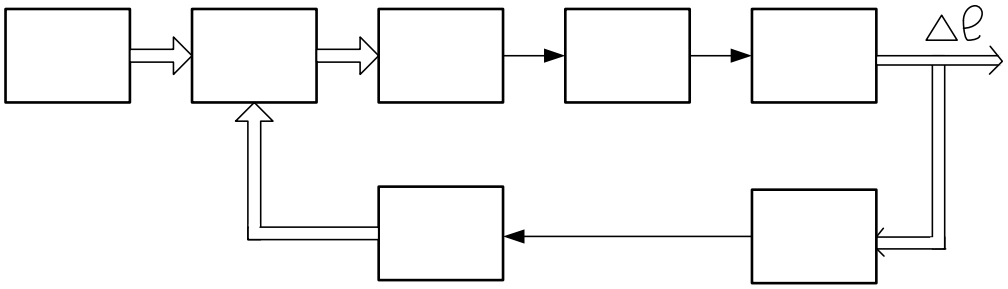
объясняют широкое внедрение микропроцессорной техники в прецизионный пьезоэлектрический привод и системы на его основе. Важным является и то, что математическое описание и анализ большинства современных цифровых систем управления базируются на методах анализа аналоговых систем.

4.1 Пьезоэлектрический привод с регулированием по положению

В настоящее время широкое распространение получили микропроцессорные системы управления (МПС) в том числе и пьезоэлектрическими исполнительными устройствами. В них осуществляется программно-аппаратное управление с помощью программируемых микроконтроллеров, что делает возможным организацию гибкого управления пьезодвигателем и позволяет реализовать сложные законы управления путем соответствующего программирования МПС с компенсацией внешних возмущающих воздействий и нелинейностей, присущих устройствам данного типа. Большая номенклатуры микроконтроллеров, от простейших PIC - контроллеров до сравнительно сложных однокристальных микро-ЭВМ, позволяет реализовывать цифровое управление как одноконтурных приводов, так и более сложных многоконтурных и многоприводных систем и комплексов. Из-за специфики управления пьезоэлектрическими устройствами не всегда удается обойтись без аналоговых устройств, а применение цифровых средств в сочетании с аналоговыми устройствами старого поколения усиливает их недостатки из-за сложности согласования усилительных устройств пьезопривода с микропроцессорными устройствами. Для широкого внедрения цифрового пьезопривода в технических системах необходимо повышение энергетической эффективности высоковольтных электронных устройств управления, обеспечение их устойчивости и упрощение связи с микропроцессорными устройствами. Все поставленные задачи решаются применением современных линейных усилителей и устройств управления с выходными каскадами на высоковольтных транзисторах, работающих в ключевом режиме, т.е. использованием импульсных устройств, а также специализированных драйверов для пьезоэлектрических исполнительных устройств. Все перечисленные устройства просты, экономичны, надежны, устойчивы к самовозбуждению, имеют лучшие массогабаритные показатели

по сравнению с линейными усилителями старых моделей, обеспечивают наиболее оптимальные режимы работы и удобства согласования с управляющими микропроцессорными устройствами. Основные характеристики таких устройств приведены в приложениях М и Н.

На



рисунке 4.1 показана обобщенная функциональная схема цифрового пьезоэлектрического привода, представляющего собой одноконтурную систему регулирования по положению [9]. В ней можно выделить две части: цифровую и аналоговую. В цифровую входят микроконтроллер (МК), устройства связи с микроконтроллером: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и вычислительная машина верхнего уровня (ЭВМ ВУ). Аналоговая часть включает в себя силовой преобразователь (СП), пьезодвигатель (ПД) и датчик положения (ДП).

ЭВМ ВУ - служит для формирования сигнала задания и программирования МК. Связь между ЭВМ ВУ и МК организуется по стандартной линии связи (USB, RS-232, RS-485 и др.).

МК – формирует сигнал управления по заданному алгоритму, принимает и обрабатывает информацию от ДП и ЭВМ ВУ. В современных прецизионных электромеханических системах используют одноплатные и однокристальные микроконтроллеры, в частности, выпускаемые фирмой INTEL контроллеры семейства МК-51, ADuC831 и 841 фирмы Analog devices и микроЭВМ i8XC196MC, имеющие развитую периферию, пригодную для управления пьезоэлектрическими исполнительными устройствами. ADuC831 и ADuC841 предназначены для использования в тех приложениях, где требуются большие объемы памяти и повышенные скорости работы ядра. Чипы ADuC831 и ADuC841 отличает то, что ядро первого имеет максимальную

ЭВМ ВУ МК ЦАП

АЦП

Рисунок 4.1 – Обобщенная функциональ
(ЭВМ ВУ - вычислительная машина верх
ЦАП - цифро-аналоговый преобразовате
преобразователь, СП - силовой преобра
датчик положения)

тактовую частоту 16 МГц, в то время как ADuC841-ядро способно работать на частоте до 16 МГц при напряжении 3 В и на частоте до 25 МГц при напряжении 5. Кроме того, они имеют встроенные 12-разрядные ЦАП и АЦП. АЦП и ЦАП - осуществляют аналого-цифровое преобразование и дискретизацию по времени с периодом Т, они могут представлять самостоятельные устройства или быть встроенными, как в случае с ADuC831 и ADuC841, что значительно повышает помехозащищенность и надежность работы всего устройства. Выбор периода квантования зависит от требований к динамическим свойствам привода в целом и быстродействия цифровой части в частности. Обычно в электромеханических системах период Т составляет от десятых долей до единиц миллисекунд (0,1-5 мс), что предъявляет достаточно высокие требования к производительности МК.

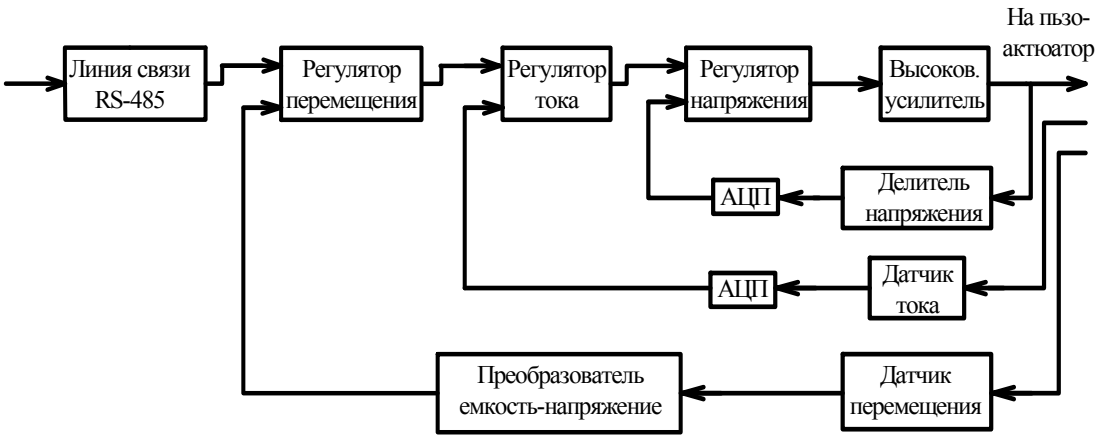
СП – преобразует сигнал управления по форме и величине, необходимым пьезодвигателю. В качестве СП могут быть использованы линейные усилители, специализированные драйверы, каскады высоковольтных транзисторов, работающих в ключевом режиме.

ДП – формирует сигнал обратной связи по положению. В современных системах для этих целей используются емкостные, индуктивный и оптико-электронные преобразователи.

ПД – как исполнительное устройство перемещает некоторый объект на заданную величину. Это может быть любое из ранее рассмотренных устройств.

4.2 Пьезоэлектрический привод с подчиненным регулированием

В ряде случаев весьма положительный результат в цифровом пьезоприводе дает применение подчиненного регулирования. Рассмотрим пьезопривод с двигателем на многослойной керамике. На рисунке 4.2 представлена его функциональная схема.



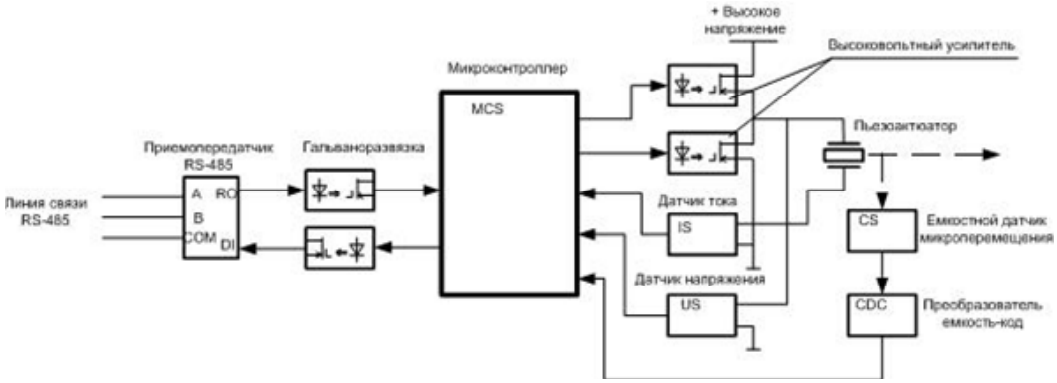


Рисунок 4.3 - Функциональная схема пьезопривода на основе пьезоактюатора из многослойной тонкопленочной керамики

Схема построена по принципу систем с обратной связью и содержит три контура регулирования. Самый быстрый контур – контур управления напряжением. Частота квантования сигналов (информации) в контуре составляет 5 кГц. Этот контур обеспечивает эффективную работу высоковольтного усилителя, включая режим энергосбережения.

Следующим является контур управления током, протекающим через пьезоактюатор. Этот контур также является быстродействующим, частота квантования информации в нем составляет 5 кГц, однако контур тока

Рисунок 4.2 - Функциональная схема ци
регулиро

является дополнительным к контуру управления напряжением. Основная задача контура тока – повысить быстродействие привода.

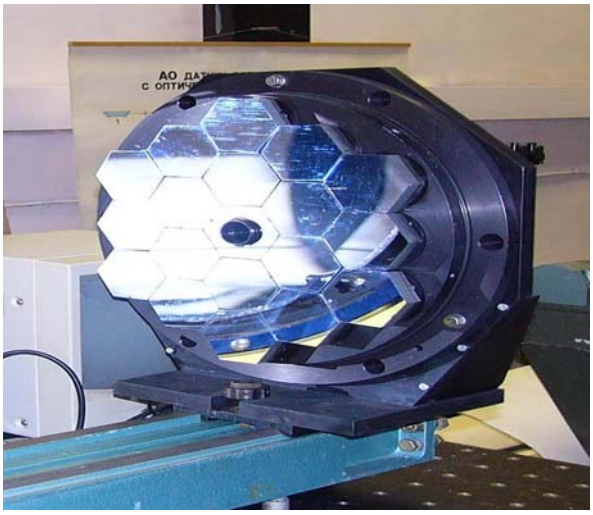
Точностные показатели привода определяются контуром регулирования перемещения. Этот контур является самым медленным. Используемая в приводе элементная база позволяет обеспечить частоту квантования информации в контуре равной 90 Гц. В контуре осуществляется сравнение величин заданного перемещения объекта и достигнутого. Регуляторы перемещения, тока и напряжения реализованы в виде программы работы микроконтроллера, учитывая это и конкретизируя другие устройства привода можно функциональную схему представить, как это показано на рисунке 4.3.

Ядром привода служит микроконтроллер ADuC841 фирмы Analog devices. Требуемое микроперемещение задается дистанционно по цифровой линии связи RS-485. Согласование с линией выполнено на специальной микросхеме приемопередатчика с использованием внешних элементов гальванической развязки. Управление пьезоактюатором осуществляется через высоковольтный усилитель с напряжением питания до 150 В постоянного тока. Величина напряжения, подаваемое на пьезоактюатор, контролируется датчиком напряжения. За счет этого в приводе добавлен режим подкачки заряда, повышающий КПД работы усилителя. Величина микроперемещения контролируется специальным емкостным датчиком, встроенным в конструктив пьезопривода. Для преобразования величины емкости, пропорциональной величине микроперемещения, в цифровой код использована микросхема AD7745 фирмы Analog Devices. Для улучшения динамических свойств электропривода используется дополнительная обратная связь по току пьезоактюатора [7,9].

При перемещении в 100 мкм, которое может быть получено у современных тонкопленочных пьезоактюаторов, привод способен обеспечить разрешение на уровне 0,01 мкм.

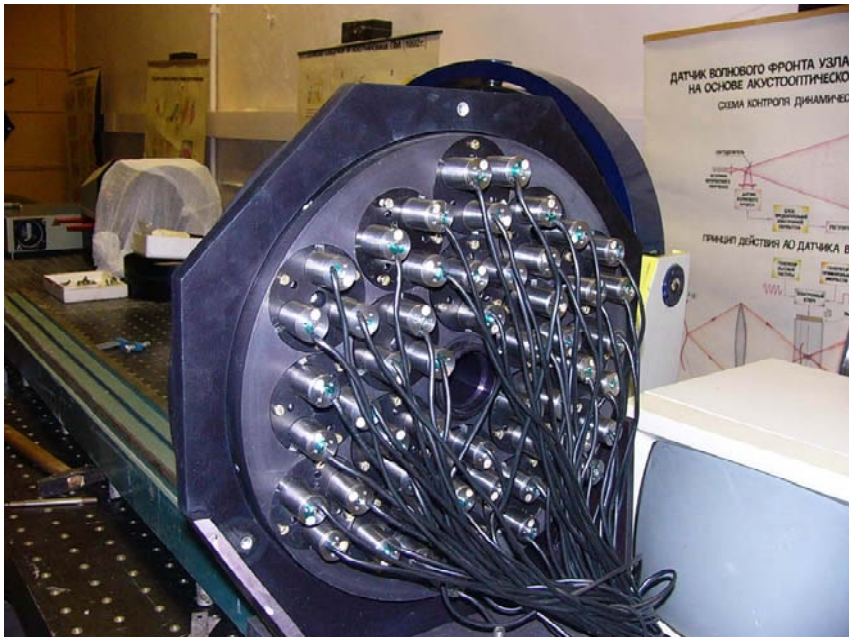
Испытания привода с пьезоактюатором на диапазон 8 мкм показало, что время реакции на единичный скачек составляет 10 мс. Гистерезис пьезоактюатора полностью скомпенсирован, а погрешность работы привода определяется погрешностью работы датчика перемещения.

4.3 Система управления многосегментным адаптивным зеркалом телескопа



Во многих технических задачах несколько цифровых приводов объединяются в одну сложную систему, это и многокоординатные оптико-механические подвижки и системы адаптивной оптики. Рассмотрим некоторые особенности таких систем на примере системы управления многосегментным адаптивным зеркалом телескопа рисунки 4.4 и 4.5. В телескопах адаптивная оптика используется для улучшения разрешения телескопа при наблюдении звезд через турбулентную атмосферу. Кроме того, необходимость разработки многосегментных зеркал возникла в астрономическом приборостроении в связи с тем, что диаметр наземных телескопов достиг некоторой критической величины, превышение которой ведет к большим технологическим сложностям как в изготовлении, так и в эксплуатации. А также, следует учитывать, что стоимость телескопа экспоненциально возрастает с диаметром, в то время как применение составного зеркала телескопа позволяет уменьшить стоимость примерно втрое. Идея составного зеркала позволяет создать телескопы большого эффективного диаметра (>10 м) как наземного, так космического базирования. Наилучшие результаты достигаются, если обеспечивается возможность управления наклоном и линейным перемещением каждого сегмента адаптивного зеркала.

Рисунок 4.4 - Мн
адаптивное зерк



Правда, при этом существенно увеличивается число приводов и усложняется система управления.

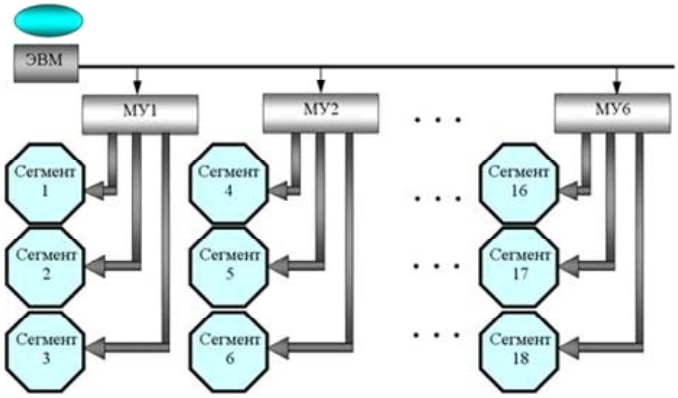


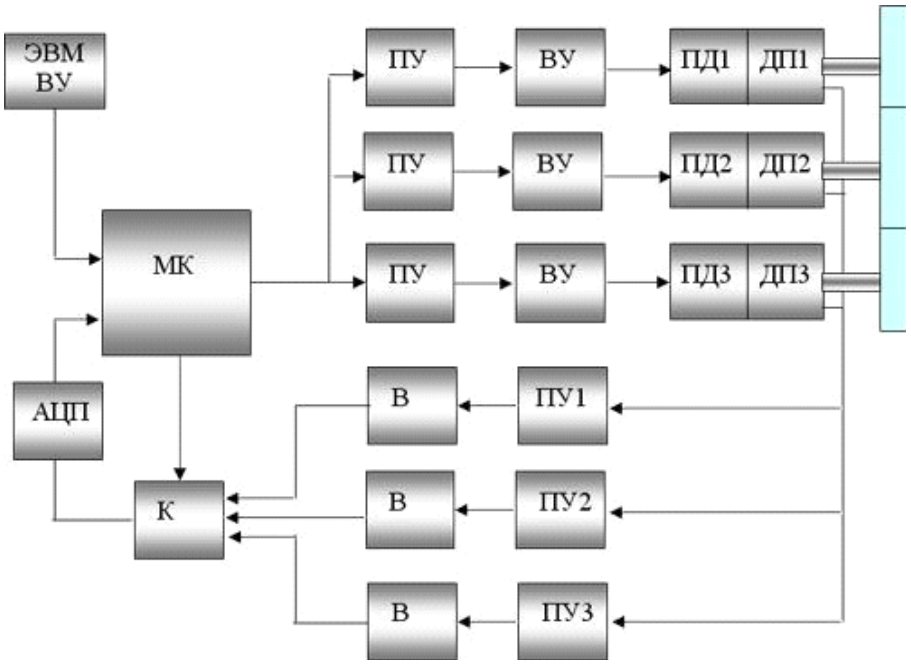
Рисунок 4.5 Система управления м
зеркалом телескопа

Рассмотрим принципы организации управления такой системы [28] на конкретном примере адаптивного зеркала телескопа, состоящего из 19 сегментов, 18 из них управляемых, а один центральный неподвижен. Всего

для управления формой поверхности зеркала используется 54 пьезоэлектрических привода с диапазоном перемещения до 10 мкм каждый, по три на каждый сегмент. Укрупненная функциональная схема системы управления представлена на рисунке 4.6, она состоит из 6 модулей управления с приводами (по 9 на каждый), собственно самих сегментов зеркала и ЭВМ верхнего уровня.

Каждый модуль (рисунок 4.8) управляет положением трех сегментов зеркала, а каждая из трех плат управления тремя исполнительными пьезодвигателями, выполняющими пространственную коррекцию положения одного сегмента. Каждый модуль управления имеет свой преобразователь напряжения питания. В состав платы управления входят: микроконтроллер (МК), три канала управления двигателями с предварительными (ПУ) и высоковольтными (ВУ) усилителями, три канала обработки сигналов датчиков положения с предварительными усилителями ПУ1-3, выпрямителями (В) и коммутатором (К) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Микроконтроллер выполняет следующие функции: связь с ЭВМ верхнего уровня, выбор канала управления, прием и цифровая фильтрация сигналов с датчиков, расчет сигналов управления двигателями в рамках замкнутой по положению цифровой системы. Усилители канала управления формируют сигнал управления требуемого уровня, а устройства канала обработки информации с

Рисунок 4.7 - Модуль управления тр
адаптивного зеркала



датчиков служат для преобразования их сигналов по форме и уровню, удовлетворяющим требованиям АЦП. Особое место в данной разработке занимаю пьезоэлектрические двигатели. Активным элементом двигателя является осевой составной пьезоактюатор, обеспечивающий линейное перемещение штока в диапазоне от 0 до 10 мкм. В корпус двигателя встроен дифференциальный индуктивный датчик линейных микроперемещений с предварительным усилителем, сигнал с которого несет информацию о текущем положении двигателя.

Управляющая ЭВМ верхнего уровня и микроконтроллеры плат управления, соединенные с ней по линии связи RS-485, образуют сеть магистрального типа, что позволяет наращивать количество используемых микроконтроллеров при минимальных аппаратных затратах. Предложенная структура позволяет эффективно управлять формой поверхности зеркала с

Рисунок 4.8 - Функциональная с
одним сегментом адаптивного з
вычислительная машина верхне

высоким быстродействием и заданной точностью. Основные технические характеристики сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики системы управления многосегментным адаптивным зеркалом телескопа

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Количество управляемых сегментов	шт.	18
2	Количество приводов на один сегмент	шт.	3
3	Общее количество приводов	шт.	54
4	Количество модулей управления	шт.	6
5	Тип двигателя		Пьезоэлектрический
6	Диапазон линейных перемещений привода	мкм	1 - 10
7	Тип датчика положения		Индуктивный дифференциальный
8	Разрешающая способность датчика положения	мкм	0,02
9	Максимальное напряжение управления приводом	В	550
10	Напряжение питания модуля управления	В	12
11	Линия связи		RS-485

4.4 Цифровой контрольно-измерительный стенд

Во всех разработках, связанных с прецизионным позиционирование в микрометровом диапазоне с погрешностями в десятки нанометров, центральное место занимают вопросы, связанные с градуировкой датчиков положения, снятием статических и динамических характеристик исполнительных пьезоприводов, настройкой и юстировкой различных оптических элементов. Для их решения, обычно, разрабатываются специализированные контрольно-измерительные стенды с использованием различных измерительных средств повышенного разрешения.

Рассмотрим, в качестве примера, один из вариантов построения такой измерительной системы [10,11].

На

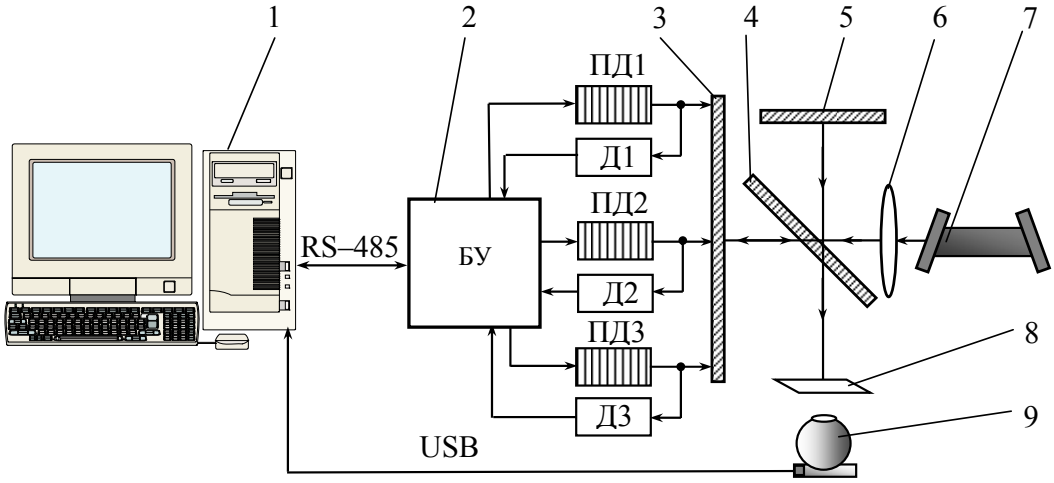
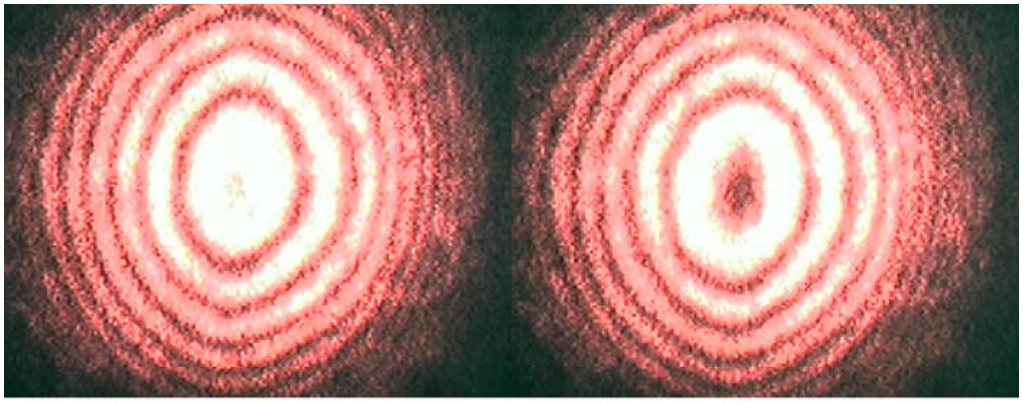


Рисунок 4.9 - Функциональная схема измерительного стенда (1 -ЭВМ верхнего уровня, 2 - блок управления, 3 - управляемое зеркало, 4 - светоделитель, 5 - опорное зеркало, 6 - расширитель пучка, 7 - газовый лазер, 8 - экран, 9 видеокамера)

рисунке 4.9 показана функциональная схема измерительного стенда. Оптическая часть измерительного стенда построена по схеме интерферометра Майкельсона, в состав которого входят: газовый лазер 7, расширитель пучка 6, светоделительная пластина 4, неподвижное опорное зеркало 5, плоское управляемое зеркало 3, экран 8. Зеркало 3 является аналогом сегмента составного зеркала телескопа и перемещается тремя пьезоприводами ПД1-ПД3. В качестве приемника изображения используется цифровая видеокамера 9. Цифровое изображение интерферограммы передается в компьютер 1 через порт USB. Блок управления 2 построен на базе микроконтроллера и осуществляет управление тремя приводами, получая задания на перемещения зеркала от компьютера 1. Таким образом, зеркало с тремя пьезоприводами, блок управления и видеокамера связаны с компьютером 1, образуя единый контрольно-измерительный комплекс.

4.4.1 Принцип действия стенда

Расширитель пучка преобразует квазиплоский волновой фронт волны лазерного излучения в сферический. В результате сложения падающей и отраженной волн на экране 8 наблюдается чередование концентрических колец, соответствующих минимумам и максимумам интенсивности интерференционной картины, как показано на рисунке 4.10.



При продольном перемещении зеркала на величину, равную четверти длины волны лазерного излучения, в центре интерференционной картины наблюдается максимальный размер кольца с минимумом освещенности. При перемещении на величину, равную половине длины волны, в центре интерференционной картины наблюдаем максимальный размер кольца с максимумом освещенности.

Наклон зеркала, вызванный линейным перемещением испытуемого привода, приводит к смещению центра интерференционных колец относительно первоначального положения. Два дополнительных пьезопривода используются для компенсации указанного смещения.

Измерение перемещения штока испытуемого пьезоактюатора выполняется по способу компенсации наклонов зеркала. Для этого после перемещения штока испытуемого пьезоактюатора на некоторую величину выполняется компенсация наклона зеркала посредством контроля интерференционной картины и управляемого перемещения штоков дополнительных приводов. После завершения компенсации наклона величина продольного перемещения зеркала определяется по интерференционной картине и считается равной линейному перемещению штока испытуемого пьезоактюатора.

Рисунок 4.10 – Типовые инт

Использование в измерительном интерферометре дополнительных пьезоприводов позволяет повысить вибрационную устойчивость измерительной схемы.

4.4.2 Структурная схема измерительной системы

Структурная схема измерительной системы представлена на рисунке 4.11. По командам ЭВМ верхнего уровня блок управления формирует

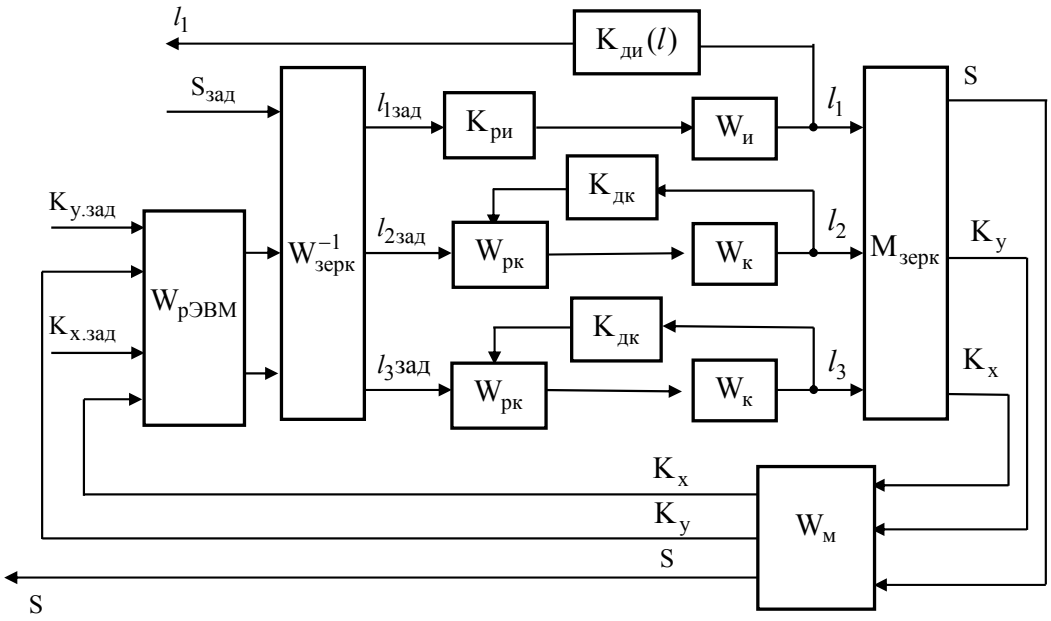
напряжение, которое подается на пьезоактюатор. Пьезоактюатор перемещает управляемое зеркало интерферометра на некоторое расстояние, что приводит к изменениям в интерферограмме, которые фиксируются видеокамерой и передаются в компьютер. По специальной программе рассчитывается линейное перемещение пьезоактюатора, сопоставляемое сигналу датчика микроперемещений. На рисунке 4.11 приняты следующие обозначения:
$W_м$ - передаточная функция преобразователя, $W_и$ - передаточная функция исследуемого пьезоактюатора, $W_к$ - передаточная функция компенсирующего пьезоактюатора, $K_{ди}(l)$ - нелинейная передаточная характеристика исследуемого датчика, $K_{дк}$ - коэффициент передачи датчика микроперемещений, $K_{ри}$ - коэффициент передачи разомкнутого пьезопривода, $W_{рк}$ - передаточная функция регулятора компенсирующего пьезопривода, $W_{рЭВМ}$ - передаточная функция регулятора верхнего уровня,S - параллельное перемещение зеркала, $K_х$, $K_у$ - углы наклона зеркала.

Исследуемый пьезопривод построен по разомкнутой схеме управления. Управление перемещением штока пьезоактюатора выполняется непосредственно по командам компьютера и контролируется по интерферограмме. Параллельно на компьютер поступает оцифрованный сигнал с датчика микроперемещения.

Дополнительные пьезоприводы выполнены как следящие системы с обратной связью. Сигналы обратной связи берутся с датчиков микроперемещений, преобразующих линейное перемещение штока пьезоактюатора в напряжение с коэффициентом передачи $K_{дк}$. Передаточные функции $W_{рк}$ регуляторов пьезоприводов реализованы программным способом на микроконтроллере блока управления.

Таким образом, измерительная система на исполнительном уровне сочетает разомкнутый исследуемый пьезопривод и два следящих пьезопривода для компенсации наклонов зеркала.

Система управления верхнего уровня реализована на базе персонального компьютера. С него на блок управления поступает задание на перемещение штока испытуемого пьезоактюатора и снимается оцифрованный сигнал градуируемого датчика



микроперемещения. С другой стороны, цифровая обработка видеосигнала позволяют получить информацию о истинном перемещении зеркала. По интерференционной картине определяются величина продольного перемещения зеркала и два угла его наклона. Система управления верхнего уровня в автоматическом режиме вырабатывает сигналы задания на дополнительные пьезоприводы, обеспечивая непрерывную компенсацию наклона зеркала.

4.4.3 Математическая модель процесса измерения

Процесс измерения перемещения штока испытуемого пьезоактюатора основан на измерении пространственного перемещения зеркала и связан с определением его передаточной матрицы. Передаточная матрица зеркала M связывает величины линейных перемещений штоков трех пьезоактюаторов (вектор входов X) с величинами пространственного перемещения зеркала (вектор Y) $Y = M*X$, $\dim Y = \dim X = 3$.

Рисунок 4.11 - Структурная схема

Введем обозначение: нумеруем пьезодвигатели: испытуемый - 1, дополнительные - 2 и 3. Параллельное перемещение зеркала при работе трех пьезодвигателей обозначим как ΔL;
перемещения штоков пьезоактюаторов обозначим как L_1, L_2, L_3 соответственно, обозначим как K_{1X}, K_{2X}, K_{3X} коэффициенты передачи зеркала по наклону к оси X, для первого, второго, третьего пьезоактюаторов соответственно; обозначим как $K_{1У}$, $K_{2У}$, $K_{3У}$ коэффициенты передачи зеркала по наклону к оси У для первого, второго, третьего пьезоактюатора соответственно. Тогда передаточная матрица зеркала будет иметь вид:

$$M_{зерк} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{\Delta L} & \frac{L_2}{\Delta L} & \frac{L_3}{\Delta L} \\ \frac{K_{1X}}{L_1} & \frac{K_{2X}}{L_2} & \frac{K_{3X}}{L_3} \\ \frac{K_{1У}}{L_1} & \frac{K_{2У}}{L_2} & \frac{K_{3У}}{L_3} \end{bmatrix}. \qquad (4.1)$$

Знание передаточной матрицы зеркала позволяет по измеренным значения компонент вектора Y перемещения зеркала вычислить неизвестный вектор перемещений штоков пьезоактюаторов X, используя обратную передаточную матрицу зеркала:

$$M^{-1}_{зерк} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{\Delta L} & \frac{L_2}{\Delta L} & \frac{L_3}{\Delta L} \\ \frac{K_{1X}}{L_1} & \frac{K_{2X}}{L_2} & \frac{K_{3X}}{L_3} \\ \frac{K_{1У}}{L_1} & \frac{K_{2У}}{L_2} & \frac{K_{3У}}{L_3} \end{bmatrix}^{-1}. \qquad (4.2)$$

Расчетное уравнение $X=M^{-1}\ Y$ содержит 9 параметров, каждый из которых определен с некоторой погрешностью. Погрешности параметров передаточной матрицы зеркала линейно входят в формулу погрешности вычисления положения зеркала. Применение дополнительных пьезоактюаторов позволяет в ходе измерительного эксперимента сводить практически к нулю углы наклона зеркала. За счет этого число параметров измерительного уравнения сводится до 3, что существенно снижает погрешность вычисления искомого положения зеркала.

Первой задачей по обработке изображения интерферограммы является нахождения центра интерферограммы (центра колец). Так как центр интерферограммы в общем случае не совпадает с энергетическим центром, то для его нахождения используется специальный алгоритм.

Второй задачей является нахождение перемещения пьезоактюатора по наклону зеркала. Для этого составляется матрица преобразования, составленная из коэффициентов пересчета угловых перемещений в линейные в точках контакта зеркала с пьезоактюатором. Полученный результат измерений координат центра умножаются на матрицу преобразования, в итоге получается грубая оценка перемещения пьезоактюатора.

Третья задача заключается в нахождении точного значения перемещения зеркала по площади центрального кольца. По площади центрального кольца оценивается перемещение штока в интервале до половины длины волны. Использование алгоритма подсчета площади сводит временную задачу усреднения с накоплением большого количества измерений к пространственной. В результате при однократном измерении достигается погрешность 0.05 мкм.

Характеристики измерительного стенда. Измерительный стенд на базе интерференционного измерителя положения зеркала с цифровой обработкой изображения на базе компьютера и активными управляемыми пьезоприводами позволяет полностью автоматизировать процесс определения параметров пьезоактюатора и градуировки датчика микроперемещения. Используемые пьезоактюаторы обеспечивают линейное перемещение зеркала до 12 мкм. Центр колец интерференционной картины остается в пределах поля зрения видеокамеры при наклонах зеркала до 2 угл. мин. На стенде уверенно определяются перемещения испытуемого пьезоактюатора с разрешением 0.01 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарапов В.М. , Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006.- 632 с.
2. Джагупов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник.- СПб.: Политехника, 1994.- 608 с.
3. И.А. Глозман Пьезокерамика.- М.: Энергия.- 1972.- 288с.
4. К. Окаузаки Технология керамических диэлектриков.- Нано и микросистемная техника. №3. 2008. стр34-41.
5. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели.- М.: Энергия,1980,.- 110 с.
6. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988.- 160 с.
7. Бобцов А.А., Быстров С.В., Бойков В.И., Бушуев А.Б., Григорьев В.В. Пьезоэлектрический привод.- Патент на полезную модель № 87043 рег.20 сентября 2009.
8. Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьв В.В., Карташев Р.А. Система управления положением сегментов составного зеркала адаптивного телескопа.- Известия ВУЗов Приборостроение, том 47, №8, 2004, с.67-69.
9. Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Обертов Д.Е. Пьезопривод на основе тонкопленочного пакетного пьезоактюатора.- Изв.вузов. Приборостроение. 2009.Т.52, №11.С.72-77.
10. Бобцов А.А., Быстров С.В., Бойков В.И., Бушуев А.Б., Григорьев В.В. Устройство для испытания пьезоэлектрического привода и его элементов. Патент на полезную модель №76138, рег. 10.09.2008.
11. Бойков В.И., Быстров С.В., Коровьяков А.Н., Салмыгин И.П. Экспериментальное исследование характеристик пьезоприводов нового поколения.-Изв.вузов.Приборостроение.2009.Т.52, №11.С.77-82.
12. http://www.avrora-elma.ru – сайт фирмы Аврора-Элма (г. Волгоград)
13. http://www.elpapiezo.ru – сайт фирмы ЭЛПА (г.Зеленоград)
14. http://www.physikinstrumente.com – сайт фирмы Physik Instrumente (Германия).
15. www.americanpiezo.com – сайт фирмы как APC International Ltd.16. 16. www.apexmicrotech.com – сайт компании APEX Microtechnology
17. http://www.keramosinc.com/k12.htm) – сайт фирмы Keramos, США
18. (http://www.piezo.com/) – сайт фирмы Piezo Systems,Inc., США
19. www.pi.ws – сайт фирмы PI (Великобритания

Приложение А
Пьезоэлектрические материалы
производства фирмы «Элпа»
и НИИ физики Ростовского государственного университета

Таблица А.1 - Сегнетомягкие материалы с пониженной, умеренной и повышенной диэлектрической проницаемостью производства фирмы «Элпа»

Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19	ЦТС-26	ЦТС-26м	ЦТС-36	НЦТС-1	НЦТБС-1	ЦТС-45	ЦТС-46
T_k	°С	290	350	350	350	175	140	330	260
$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	-	1750	1700	1700	670	4000	5700	1750	2100
$\varepsilon^T_{11}/\varepsilon_0$	-	1450	-	-	1130	-	-	-	-
tg δ, не более	%	2,5	2,0	2,0	2,5	2,0	2,8	2,0	2,0
Q_m	-	80	70	80	80	50	40	75	70
v^E_1	10^3м/с	3,0	2,9	2,9	3,0	2,87	3,0	2,77	2,9
σ_p	-	0,37	0,36	0,38	0,30	-	0,38	-	0,33
k_p	-	0,55	0,60	0,60	0,57	0,60	0,62	0,61	0,61
k_{15}	-	0,60	-	-	0,73	-	-	-	-
k_{33}	-	0,67	0,68	0,68	0,70	-	-	0,70	0,72
d_{31}	10^{-12}Кл/Н	-160	-170	-160	-90	-260	-310	-180	-190
d_{33}	10^{-12}Кл/Н	350	350	340	220	550	650	380	450

Обозначение	Единица измерения	ЦТС-19	ЦТС-26	ЦТС-26м	ЦТС-36	НЦТС-1	НЦТБС-1	ЦТС-45	ЦТС-46
d_{15}	10^{-12}Кл/Н	400	400	-	440	-	-	-	-
g_{31}	10^{-3}В*м/Н	-10,3	- 11,3	-10,6	-15,2	-7,3	-6,2	-11,6	-10,2
g_{33}	10^{-3}В*м/Н	22,6	23,3	22,6	37,1	-15,5	12,9	24,5	23,1
$(ООЧ)_р$	%	0,8	-	-	3,0	-	-	-	-
$(ООЧ)_{сд}$	%	0,9	-	-	1,1	-	-	-	-
$(ООЧ)_{сж}$	%	1,0	-	-	2,0	-	-	-	-
$T_{раб}$	°С	200	250	250	200	100	85	250	180
ρ_v, не менее	При 100°С, 10^8, Ом*м	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ρ	10^3кг/м^3	7,5	7,6	7,6	7,7	7,4	7,6	7,5	7,5
ТУ, ОСТ	-	ОСТ 11 0444-87	ОСТ 11 0444-87	-	ОСТ 11 0444-87	Щ40.027.012ТУ	Щ40.027.012ТУ	-	ЖКГД.430327.008ТУ

Примечание: Керамика из пьезокерамического материала ЦТС-46 имеет пониженную температуру спекания (ниже +1000°С). ЦТС-46 используется для производства многослойных актюаторов и для изготовления **высокочувствительных** пьезоэлектрических элементов. Условные обозначения: T_k - температура точки Кюри; $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$ $\varepsilon^T_{11}/\varepsilon_0$ - относительная диэлектрическая проницаемость; tg δ -тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при Е=25 кВ/м; $Q_м$ - механическая добротность; v_1^E - скорость звука; σ_p -планарный коэффициент Пуассона; **Коэффициенты электромеханической связи:** k_p,- планарной моды; k_{15} -сдвиговой моды; k_{33} - моды растяжения-сжатия по толщине; d_{31}, d_{33}, d_{15} - пьезоэлектрические модули; g_{31}, g_{33} -электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема); **Относительное отклонение частоты(ООЧ) в интервале температур -60...+85°С** $(ООЧ)_р$ - Планарной моды; $(ООЧ)_{сд}$ - сдвиговой моды; $(ООЧ)_{сж}$ -моды растяжения-сжатия по толщине; $T_{раб}$ - рекомендуемая повышенная температура; ρ_v - удельное объемное электрическое сопротивление; ρ - плотность.

Таблица А.2 – Пьезоматериалы типа ПКР, производства НИИ физики Ростовского государственного университета

Материалы	Симметрия	Электрофизические характеристики						
		$T_К$, °С	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	$K_Р$	$\lvert d_{31}\rvert$, пКл/Н	d_{33}, пКл/Н	$tg\delta \cdot 10^2$ (Е=50 В/см)	$Q_м$
ПКР-78	Т	350	1250	0,60	130		0,30	1000
ПКР-66	≈90%Т+ ≈10%Рэ	208	2800	0,68	245	535	1,20	
ПКР-73	≈20%Т+ ≈80%Рэ	155	6000	0,70	380	860	2,9	30
ПКР-7М	≈50%Т+ ≈50%Рэ	175	5000	0,71	350	760	2,0	60

Приложение Б

Пьезокерамика производства "APC Iternational Ltd."(США)

Таблица Б.1- Характеристики пьезокерамики APC

МАТЕРИАЛ	842/ 840	844/ 841	851/ 850	854/ 855	881/ 880	NA /856
Относительная диэлектрическая проницаемость /Relative Dielectric Constant						
$K^T=\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$	1375/1250	1500/1350	1950/1750	3400/3400	1030/1000	4100
Тангенс угла диэлектрических потерь /Dielectric Dissipation Factor (Dielectric Loss) (%)*						
tanδ	0.45/0,4	0.4/0,35	1.5/1,4	1.7/1,9	0.4/0,35	2,7
Точка Кюри /Curie Point (°C)**						
T_c	325/325	320/320	360/360	180/200	310/310	150
Коэффициент электромеханической связи /Electromechanical Coupling Factor (%)						
k_p	0.65/0,59	0.68/0,60	0.71/0,63	0.77/0,68	0.58/0,50	0,65
k_{33}	0.48/0,72	0.48/0,86	0.51/0,72	0.52/0,76	0.46/0,62	0,73
k_{31}	0.35	0.33	0.36	0.40	0.30	0,36
k_{15}	0.70	0.67	0.68	0.66	0.55	0,65
Пьезоэлектрический модуль / Piezoelectric Charge Constant (10^{-12}C/Nили10^{-12}m/V)						
d_{33}	300/290	300/300	400/400	650/600	260/215	620
$-d_{31}$	125	109	175	276	95	260
d_{15}	480	450	590	720	330	710
Пьезомодули по напряжению (чувствительность) / Piezoelectric Voltage Const.(10^{-3}Vm/Nor $10^{-3}m^2$/C)						
g_{33}	26.3/26,5	24.5/25,5	24,8/26	20.9/21,0	26.7/25	18,5
$-g_{31}$	11	10.5	12.4	9.0	10	8,1
g_{15}	38	35	36	27	28	25
Модули Юнга /Young's Modulus ($10^{10}N/m^2$)						
Y^E_{11}	8.0/8,0	7.6/7,6	6.3/6.3	5.9/5,9	9.0/9,0	5,8
Y^E_{33}	6.8/6,8	6.3/6,3	5.4/5,4	5.1/5,1	7.2/7,2	4,5
Частотные постоянные /Frequency Constants (Hz*милим/s)						
N_L(продольной моды / longitudinal)	1524	1700	1500	1390	1725	-
N_T(толщиной моды /	2050/2005	2050/2005	2040/2032	2040/1785	2050/2110	1800

thickness)						
N_P(радиальной моды / planar)	2230/2130	2250/2055	2080/1980	1980/1920	2300/2120	-
Плотность /Density (g/cm^3)						
ρ	7.6/7,6	7.7/7,6	7.6/7,7	7.6/7,6	7.6/7,6	7,5
Механическая добротность /Mechanical Quality Factor						
Q_m	600/500	1500/1400	80/80	65/65	1000/1000	72
Макс. нагрузка по напряжению на 1мм толщины (V/mm)						
постоянный ток	720	720	600	400	800	400
переменный ток	360	360	320	200	400	200

- Все параметры замерялись через 24 часа после поляризации
- Коэффициент диэлектрических потерь измерялся при нормальной температуре на частоте 1кГц в слабом поле
- Максимальная рабочая температура Траб ≈ Тс / 2

Примечания: вышеуказанные значения получены на тестовых образцах и могут использоваться только справочно. На практике пьезокерамические компоненты показывают отличающиеся параметры в зависимости от толщины, конфигурации, качества и метода обработки поверхности.

Таблица Б.2 - Рекомендации по применению пьезокерамики APC

Применение	**842 (840)**	**844 (841)**	**881 (880)**	**851 (850)**	**854 (855)**	**N/A (856)**
Акселерометры				√	√	√
Двухслойные актюаторы				√	√	√
Криогенные микроскопы			√			
Расходомеры				√	√	√
Зажигалки ударного типа				√	√	√
Зажигалки нажимного типа	√	√				
ВЧ преобразователи	√	√				

Мощные актюаторы	√	√				
Датчики высокого давления	√	√				
Гидрофоны				√	√	√
Уровнемеры				√	√	√
Медицинское УЗИ				√	√	√
Микрофоны				√	√	√
Пьезомоторы, пьезовибраторы	√	√				
Прецизионный контроль перемещения				√	√	√
Датчики давления				√	√	√
Измерители толщины				√	√	√
Трансформаторы	√	√				
УЗ распылители, увлажнители	√	√				
УЗ чистка, мойка и т.п.	√	√				
УЗ микро пайка	√	√				
УЗ диспергаторы,перемешиватели			√			
УЗ хирургия			√			
УЗ сварка			√			
Подводные эхолоты	√	√				

Приложение В
Пьезокерамика фирмы PI
(Великобритания)

Тип материала			**PIC 151**	**PIC 255**	**PIC 155**
Параметр	Обозначение	Единицы измерения			
Физические и диэлектрические свойства					
Плотность	ρ	10^3 кг/м^3	7.80	7.80	7.80
Температура Кюри	Tc	^{0}C	250	350	345
Диэлектрическая проницаемость: в направлении поляризации	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$	1	2400	1750	1450
перпендикулярно	ε ε		1980	1650	1400
Тангенс угла диэлектрических потерь	tanδ		20	20	20
Электромеханические свойства					
Коэффициенты связи	k_p	1	0.62	0.62	0.62
Коэффициент жесткости	k_t		0.53	0.47	0.48
	k_{31}		0.38	0.35	0.35
	k_{33}		0.69	0.69	0.69
	k_{15}			0.66	
Пьезоэлектрические модули	d_{31}	10^{-12}Кл/Н	–210	–180	–165
	d_{33}		500	400	360
	d_{15}			550	
Постоянные пьезоэлектрического напряжения	g_{31}	10^{-12}В*м/Н	–11.5	–11.3	–12.9
	g_{33}		22	25	27
Механико–акустические свойства					
Частотные постоянные	N_p	Гц*м	1950	2000	1960
	N_1		1500	1420	1500
	N_3		1750		1780
	N_t		1950	2000	1990
Упругая податливость	S^E_{11}	10^{-12} м^2/Н	15.0	16.1	15.6
	S^E_{33}		19.0	20.7	19.7
Модуль Юнга	C^D_{33}	10^{10} Н/м^2	10.0		11.1
Коэффициент демпфирования	Q_m	1	100	80	80
Температурная стабильность					
Температурный коэффициент ε_{33} (разброс температуры от –20°C до +125°C)	ТК ε_{33}	10^{-3} /К	6	4	6
Устойчивость против старения (относительное изменение параметров за декаду в %)					
Относительная диэлектрическая постоянная	C	%		–1.0	–2.0
Коэффициент связи	C_K			–1.0	–2.0

Приложение Г

Ряд стандартных пьезоэлементов

производства фирмы «ЭЛПА»

Таблица Г.1 - Пластины пьезокерамические

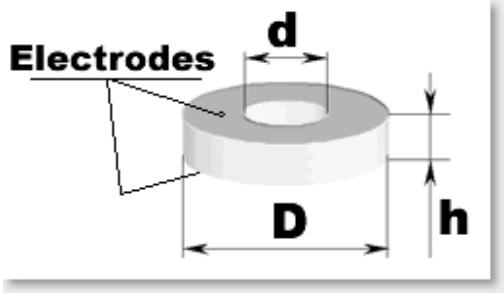
a - длина, b - ширина, h - высота,
Стандартный ряд пьезокерамических пластин

a, mm	b, mm	h, mm
пластина		
2,6	2,6	5,1
4	4	0,2-0,4
5	10	0,4-0,8
5	10	0,8
8	12	0,4
10	2	0,5
10	5	2
10	36	2
16	12	1
16	22	4,8
20	8	0,8
20	12	5
22	15	4,8
23	17	7
40	12	0,78
50	4	0,5

Таблица Г.2 - Диски пьезокерамические

	D - диаметр, мм	h - высота, мм
стандартный ряд пьезокерамических дисков	4	0,2
	6	0,12-0,4
	8	0,4-2
	10	0,4-2
	10	8;10
	12	0,4; 2
	14	0,4
	15	0,72
	18	1-4
	20	0,4-1,3
	23	3,6
	25	0,8
	30	4,5
	35	5; 6,5
	40	3
	43	3

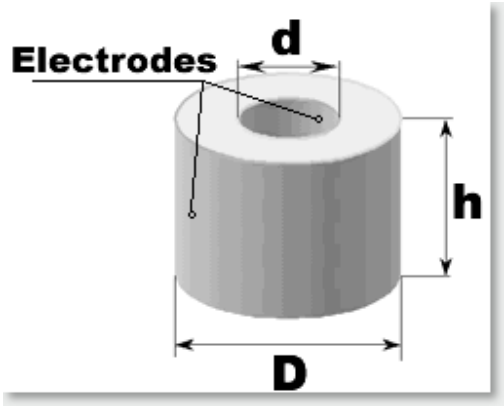
Таблица Г.3 - Пьезокерамические элементы - кольца пьезокерамические



Стандартный ряд пьезокерамических колец

Внешний диаметр, D	**Внутренний диаметр, d**	**Высота, H**
8	3	1
9,5	3,5	0,8
12	6	2
12	6	3
18	10	4
20	8	4
22	13	3,3
24	14	2,4
35	8	3
38	16	5
50	20	6
56	20	6
70	20	4

Таблица Г.4 -Пьезокерамические элементы цилиндры и трубки пьезокерамические



Стандартный ряд пьезокерамических колец

Внешний диаметр, D	Внутренний диаметр,d	Высота, H	Толщина стенки
Цилиндры			
6.35	4.9	6.35	0.725
10	8	10	1
15.5	11.2	18	2.15
19.05	14.81	19.05	2.12
19	16	20	1.5
22	16	20	3
30	26	20	2
38	34	25	2
44	38	30	3
44	40	30	2
55	39	25	8
68	60	25	4
85	77	25	4
Трубки			
9	8	32	0.5
10	8	32	1
10	8.5	32	0.75
12	11	32	0.5

Таблица Г.5 - Сферы, полусферы и мениски пьезокерамические

t - толщина, R - внешний радиус, D - диаметр внешний,

Стандартный ряд пьезокерамических сферических элементов

Сферическая поверхность						
D, mm	t, mm	R, mm	t, mm	D, mm	R, mm	t, mm
Сфера		Полусфера		Мениск		
5	0,5	2,5	0,5	26	27	0,5
10	0,8	5,0	0,8	19	18	0,5
15	1,2	7,5	1,2	30	31,4	2,6
20	1,5	10	1,5			
30	2,5	15	2,5			
50	3,0	25	3,0			

Приложение Д

Пьезокерамические актюаторы пакетного типа

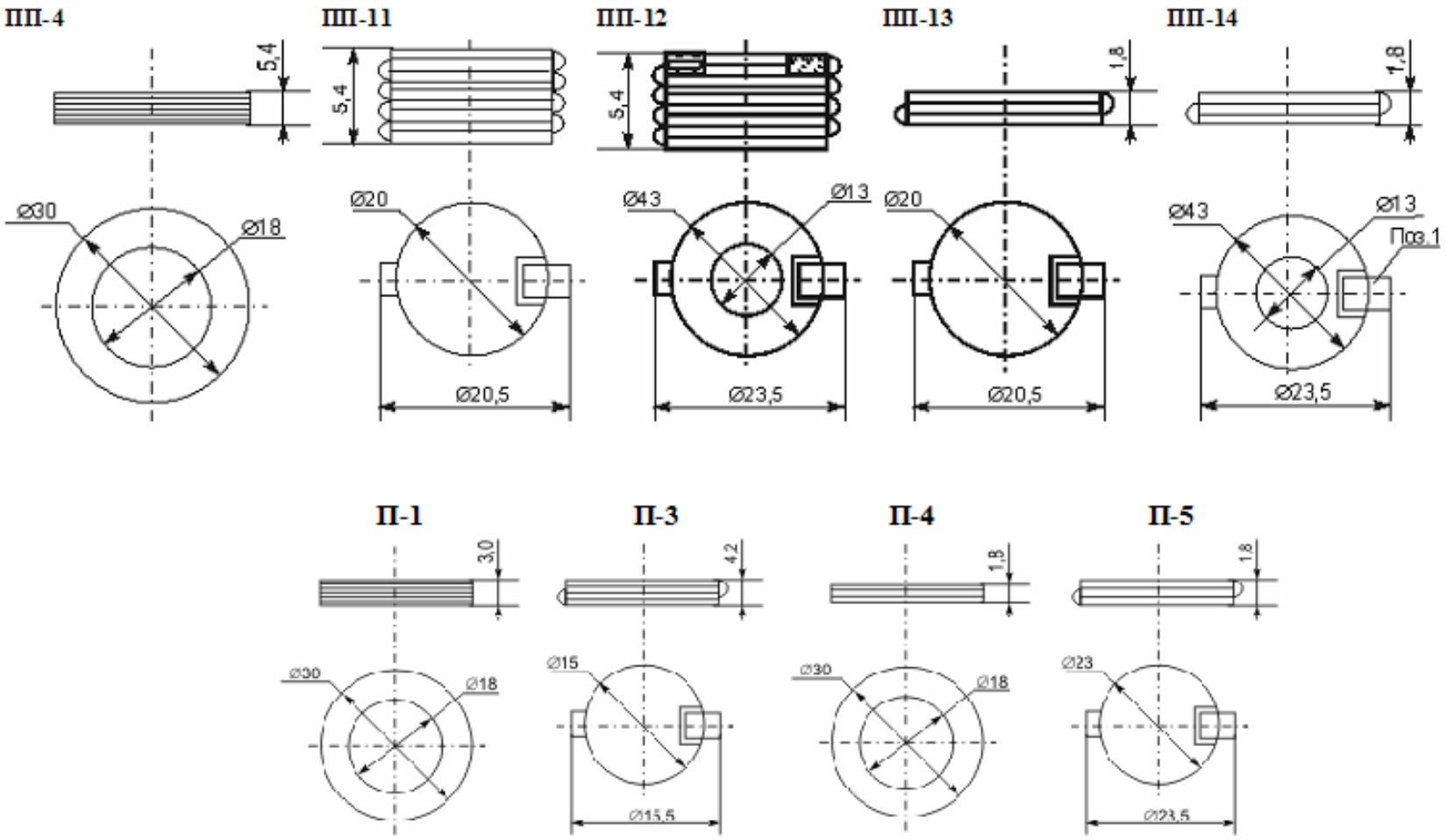
Пьезопакетные актюаторы изготавливаются путем сборки в пакет монолитных многослойных элементов с чередующимися керамическими и электродными слоями, ось пакета является осью линейного перемещения. При подаче напряжения толщина слоя увеличивается и соответственно увеличивается общая длина пакета. **Пакетные актюаторы** представляют собой жесткую структуру с большой емкостью состоящую из большого количества пьезослоев, собранных в монолитный блок при помощи спекания. Небольшое перемещение каждого слоя суммируется в общее перемещение и можно получить перемещения порядка от микрон до десятков микрон при усилии от сотен до тысяч Ньютонов.

Конструкци пьезопакетных актюаторов:

- ✔ в форме кольца
- ✔ в форме диска

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- в фото- и рентгенолитография для точного совмещения шаблонов;
- в медицинской аппаратуре для точной подачи инструмента;
- в оптомеханических приборах для микроперемещений предметного столика (управление газоанализаторами-дозиметрами);
- в устройствах волоконной оптики для управления лучом;
- в системах адаптивной оптики, адаптивных телескопах.
- ПП-4, ПП-5 применяются для автоматической подстройки и поддержания постоянного оптического параметра кольцевых квантовых генераторов.
- П-1 ÷ П-5 предназначены для параллельного перемещения оптических элементов в оптических квантовых генераторах.
- ПП-11 ÷ ПП-14 применяются в пьезоприводах линейного перемещения.



Поз.1 - серебряный фольгированный вывод, к которому подпаиваются провода типа МГТФ-007; НВ-007 для подачи напряжения на пьезопакетный актюатор.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Параметр, ед. измерения	ПП-4	ПП-11	ПП-12	ПП-13	ПП-14	П - 1	П - 3	П - 4	П - 5
Чувствительность мкм/В • 10^{-3}, не менее	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2	3	4,5	4,5
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	20.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50	50	50	50
Статическая емкость, пФ	80000 ±20000	65000 ±12500	52000 ±10000	22000 ±4000	17000 ±3500	0,068	0,037	0,025	0,037
Предельно допустимое напряжение, В	-300 ?+ 500	+100	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600
Масса, г	20.0	15.0	15.0	6.0	6.0	10	6,0	6,0	6,0
Диапазон рабочих температур, ?С	-60 ? +85	-60 ? +65	-60 ? +65	-60 ? +65	-60 ? +65	-60 ? +85	-60 ? +85	-60 ? +85	-60 ? +85
Габаритные размеры, мм	? 30х? 18х 5,4	? 20х5,4	? 23х? 13х 5,4	? 20х1,8	? 23х? 13х 1,8	? 30х? 18 х3	? 15х4,2	? 23х? 13х 1,8	? 23х1,8

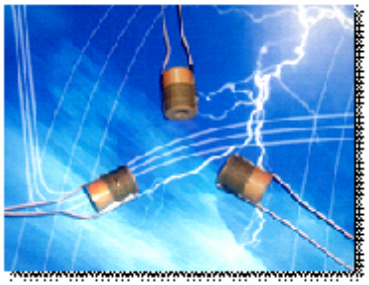
Примечания:

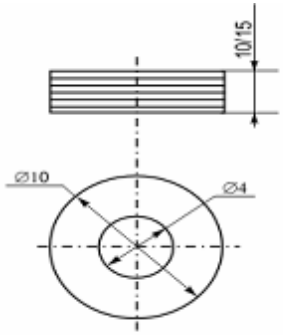
– чувствительность ПП-11, ПП-12, П-1, П-3 определяется по толщинным колебаниям;

– чувствительность ПП-13, ПП-14, П-4, П-5 определяется по радиальным колебаниям.

– чувствительность измеряется при напряжении U = 400В.

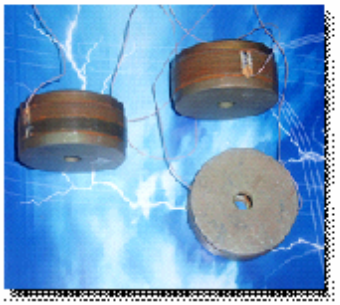
– чувствительность ПП-4 не менее ± 1,2 мкм при напряжении U = ±300В.

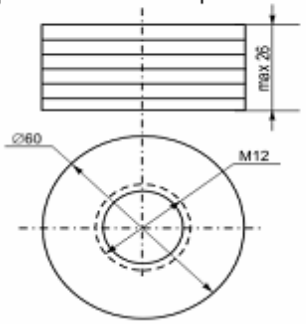




ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Габариты, мм х мм х мм	Масса гр., не более	Статическая ёмкость, нФ, не более	Диапазон рабочих напряжений, В	Максимальное перемещение, мкм, не менее	Резонансная частота, кГц, не менее	Блок. усилие, Н, не менее	Количество активных слоев
10 х 4 х 10	5,5	40	-200 ? 200	± 1,0	125	450	8
10 х 4 х 15	8,5	60	-200 ? 200	± 1,5	115	450	16



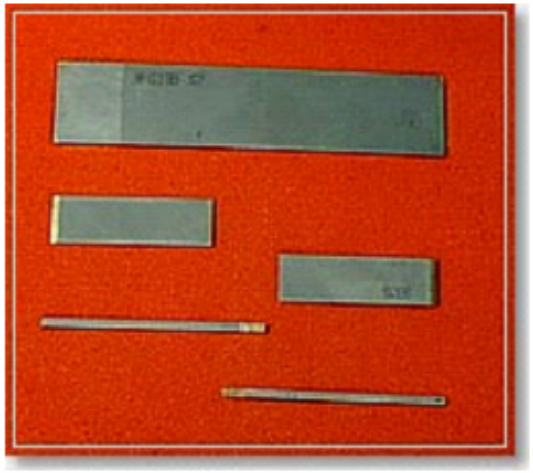


Габариты, мм х мм х мм	Масса гр., не более	Статическая ёмкость, мкФ, не более	Диапазон рабочих напряжений, В	Максимальное перемещение, мкм, не менее	Резонансная частота, кГц, не менее	Количество активных слоев
60 х М12 х 26	550	1	500 ? -500	± 2,0	5	20

Приложение Е

Пьезокерамические актюаторы

пластинчатые изгибного типа

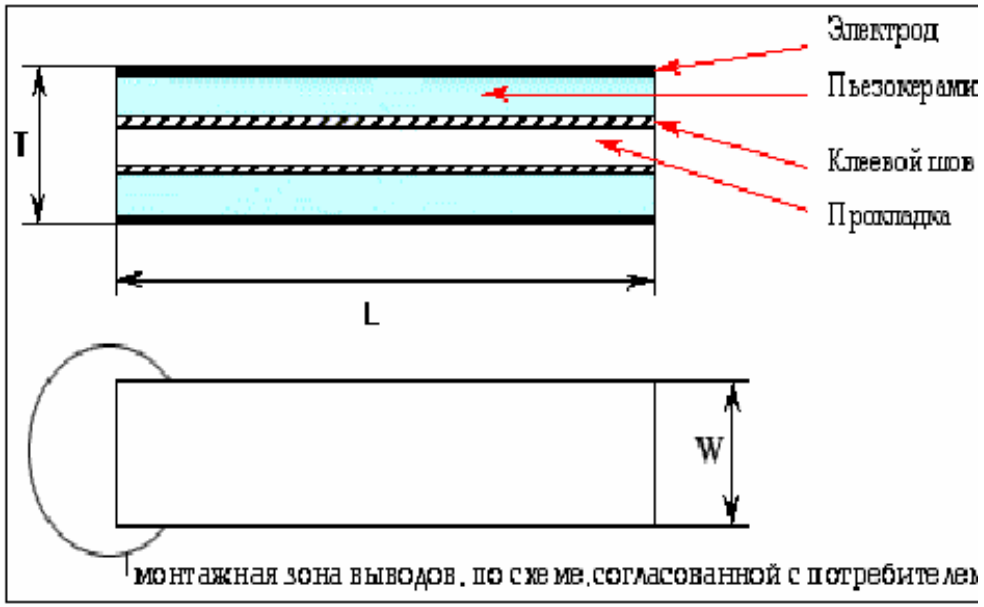


Актюаторы пластинчатые изгибного типа (биморфные), представляют собой двухслойный элемент, один из слоев которого удлиняется, а другой сжимается, в этом случае имеет место изгиб. Пьезобиморфы представляют класс электромеханических преобразователей, обеспечивающих преобразование электрического напряжения в механическое перемещение и наоборот. Величина изгибного перемещения таких актюаторов намного больше , чем планарного, поэтому по сравнению с пакетными актюаторами пьезоэлектрические изгибные (биморфные) элементы имеют больший ход при соответственно меньшем развиваемом усилии и меньшей резонансной частоте

Назначение:

- Сканирующие системы в лазерной технике;
- Устройства микроперемещений игл в ткацком производстве и в аппаратах чтения шрифта для слепых по системе Брайля;
- Медицинские датчики;
- Вентиляторы для локального охлаждения узлов электронных схем;
- Переключающие устройства - сенсорные переключатели - устройства замыкания/размыкания электрического контакта;

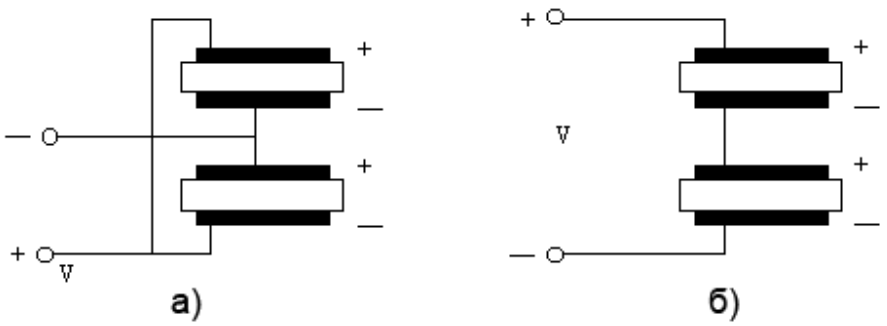
Конструкция пьезобиморфа:



Габаритные размеры пьезобиморфа:

Тип пьезобиморфа	Размеры, мм			Масса, г
	Длина, L	Ширина, W	Толщина, T	
ЭП-9-47-ПлБ-001	40	12	0,6	1,8
ЭП-9-47-ПлБ-002	55	2	0,75	6,0
ЭП-9-47-ПлБ-004	35	2,5	0,6	0,5
ЭП-9-47-ПлБ-004-01	35	2,5	0,6	0,5
ЭП-9-47-ПлБ-006	100	22	1,0	17,0

Схема подключения пьезобиморфа:



а) при параллельном подключении пластин пьезобиморфа
б) при последовательном соединении пластин пьезобиморфа.
(Пьезобиморфы с последовательным соединением изготавливаются по отдельным заказам)

Основные параметры актюаторов с параллельным соединением пластин

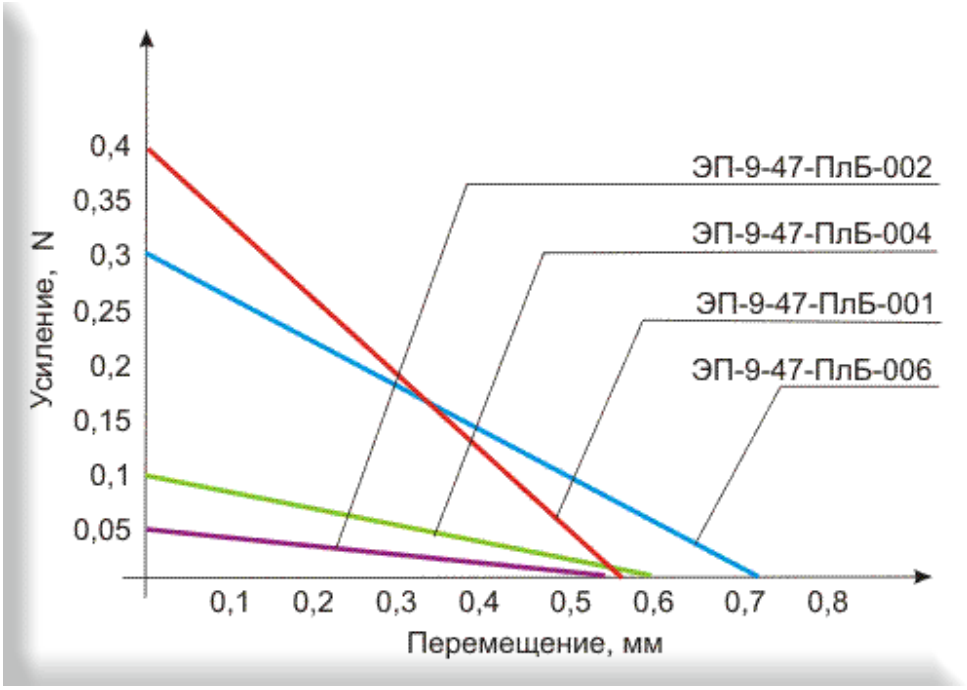
Тип пьезобиморфа	Емкость, нФ	Управляющее напряжение, В	Свободный прогиб, мм	Рабочая длина, мм	Блокирующее усилие, N
ЭП-9-47-ПлБ-001	27-35	±80	±0,55	35	0,35
ЭП-9-47-ПлБ-002	4,4-5,2	±200	±0,5	48	0,02
ЭП-9-47-ПлБ-004	3-4	±150	±0,58	28,5	0,12
ЭП-9-47-ПлБ-004-01	3-4	±150		28,5	
ЭП-9-47-ПлБ-006	65-80	±80	±0,7	85	0,3

Емкость пьезобиморфов указана при измерении между внешними электродами.
Параметры пьезобиморфа ЭП-9-47-ПлБ-002 соответствуют частичному включению

Примечание:
1. В пьезобиморфах ЭП-9-47-ПлБ-004 и ЭП-9-47-ПлБ-004-01 прокладка отсутствует.
2. Пьезобиморфы ЭП-9-47-ПлБ-004-01 имеют луженые контактные площадки. Измерения свободного перемещения и блокирующего усилия при поставке на этом типе пьезобиморфов не проводятся.

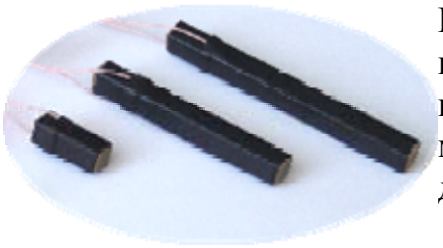
При последовательном соединении пластин емкость актюаторов уменьшается в 4 раза, для получения остальных параметров, указанных в таблице, управляющее напряжение необходимо увеличить в 2 раза.

Типовая зависимость усиления, развиваемого пьезобиморфом от величины перемещения.



Приложение Ж

Многослойные пьезоактюаторы



Впервые в России разработан и осуществлен выпуск многослойных актюаторов с применением вместо дорогих электродных материалов (платина-палладий) относительно дешевых (палладий-серебро).

Для реализации технологии изготовления многослойных (толщина слоя 25 мкм) актюаторов с электродами (палладий-серебро) ОАО "ЭЛПА" разработан специальный пьезокерамический материал ЦТС-46 с низкой температурой спекания.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

 Оптико-механические устройства с системой стабилизации;

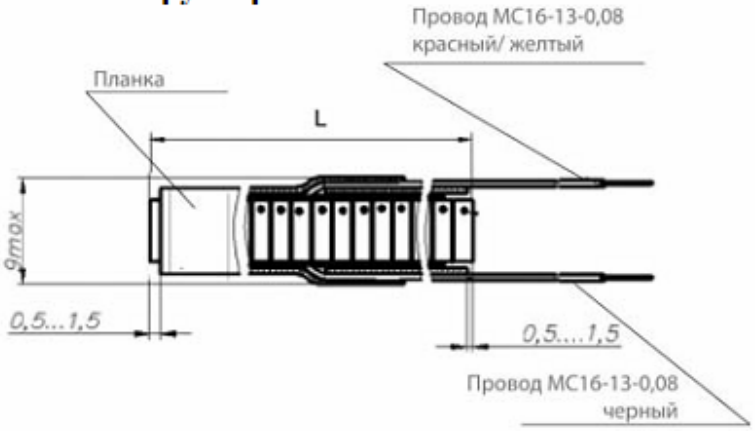
 Системы автоюстировки и настройки лазеров, оптических устройств, включая интерферометры;

 Приводы для адаптивных оптических систем и оптических фазовых модуляторов;

 Юстировка волоконно-оптических систем передачи и приема информации.

Габаритные и присоединительные размеры актюатора

Конструкторское исполнение АПМ-2-N



Конструкторское исполнение АПМ-2-N-М

Положительный вывод отмечен узелком (при выводах одного цвета), красный или желтый (при выводах разного цвета).

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Тип актюатора			
	АПМ-2-7; АПМ-2-7-М	АПМ-2-11; АПМ-2-11-М	АПМ-2-15; АПМ-2-15-М	АПМ-2-22; АПМ-2-22-М
Масса, г,не более	6,5	9,6	12,7	18,8
Кол-во элементов, N *	7	11	15	22
L, мм	20	31	41	61
Максимальное перемещение при напряжении 100 В, мкм	14±15%	22±15%	30±15%	44±15%

Статическая ёмкость, мкФ Сопротивление изоляции, МОм, не менее	3,0±20% 5,0	6,0±20% 2,0	7,0±20% 1,5	10,0±20% 1,0
Тангенс угла диэлектрических потерь, отн. ед., не более	0,04	0,04	0,04	0,04
Воздействие внешних факторов				
Рабочий диапазон температур, ℃	от минус 30 до +85			
Изменение температуры среды, ℃	от минус 40 до +85			
Синусоидальная вибрация	Диапазон частот: 1-200 Гц; Амплитуда ускорения: 50(5)м/с^2			
Механический одиночный удар	Длительность действия ударного ускорения: 5-10 мс; Амплитуда ускорения: 50 (5) м/с^2			
Срок службы, лет	10			
Наработка на отказ (в типовом режиме эксплуатации), циклов	1·10^9			

Статическая ёмкость, мкФ	3,0±20%	6,0±20%	7,0±20%	10,0±20%
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	5,0	2,0	1,5	1,0
Тангенс угла диэлектрических потерь, отн. ед., не более	0,04	0,04	0,04	0,04
Воздействие внешних факторов				
Рабочий диапазон температур, ℃	от минус 30 до +85			
Изменение температуры среды, ℃	от минус 40 до +85			
Синусоидальная вибрация	Диапазон частот: 1-200 Гц; Амплитуда ускорения: 50(5)м/с^2			
Механический одиночный удар	Длительность действия ударного ускорения: 5-10 мс; Амплитуда ускорения: 50 (5) м/с^2			
Срок службы, лет	10			
Наработка на отказ (в типовом режиме эксплуатации), циклов	1·10^9			

Приложение 3

Армированные актюаторы

продольного типа ППУ-1 … ППУ-8

Актюаторы армированные продольного типа представляют собой конструкцию из набора пьезопакетов, армированных шпилькой или корпусной пружиной с усилием 250± 30 кгс. Эта конструкция обеспечивает прецизионную точность позицирования. Важным свойством является возможность перемещения как при сжатии, так и растяжении актюатора.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Высококачественные надежные пьезоактюаторы предназначены для микроперемещений, контроля вибраций, создания больших усилий, применяемые:

- в автоматике точной дозировки жидкостей и газов, натекателях;
- в прецизионных металлорежущих станках;
- в фото- и рентгенолитографии для точного совмещения шаблонов;
- в медицинской аппаратуре (например, для точной подачи инструмента при микрохирургических и глазных операциях);
- в ускорителях элементарных частиц для юстировки магнитных секций, задающих траектории частиц;
- оптической и электронной микроскопии для микроперемещений предметного столика (управление газоанализаторами-дозиметрами);
- лазерной технике, системах адаптивной оптики;
- системах впрыска топлива для двигателей внутреннего сгорания, дизелей

Приложение И

Пьезокерамические актюаторы цилиндрические армированного типа

Конструкция цилиндрического актюатора состоит из одного или нескольких пьезотрубок армированныхсборной стяжкой с усилием 5 кгс.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

 в фото- и рентгенолитографии для точного совмещения шаблонов;

 в медицинской аппаратуре (например, для точной подачи инструмента при микрохирургических и глазных операциях);
 в оптической и электронной микроскопии для микроперемещений предметного столика;
 в лазерной технике.

Актюаторы обладают большим быстродействием, безынерционностью, малой потребляемой мощностью.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

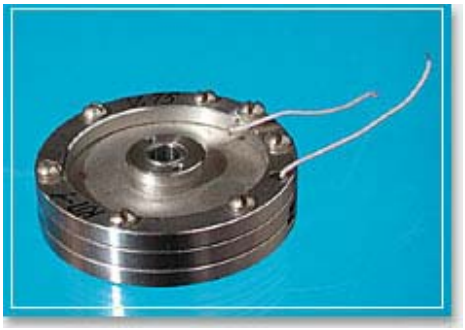
Параметр	**Марка пьезопривода**					
	ППУ-9	ППУ-10	ППУ-11	ППУ-12	ППУ-13	ППУ-14
Перемещение, мкм	± 3	± 4	± 5	± 7	± 9	± 12
Статическая емкость, нФ, не более	20	25	40	50	60	80
Рабочее электронапряжение, В	± 500	± 500	± 500	± 500	± 500	± 500
Предельно допустимое напряжение, В	± 600	± 600	± 600	± 600	± 600	± 600
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	50	50	50	50	50	50
Габаритные размеры, мм	ø15xø13x55,2		ø15xø13x87,2		ø15xø13x119,2	
Масса, г, не более	33	30	40	36	50	45

УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Интервал рабочих температур, °С	- 50 ÷ +50
Относительная влажность при 25 °С, %	до 98
Атмосферное давление в диапазоне, мм рт.ст.	90 ÷ 450

Приложение К

Корректор пьезоэлектрический КП-1



Корректор пьезоэлектрический микроперемещений обладает большим быстродействием, безинерционностью, малой потребляемой мощностью

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

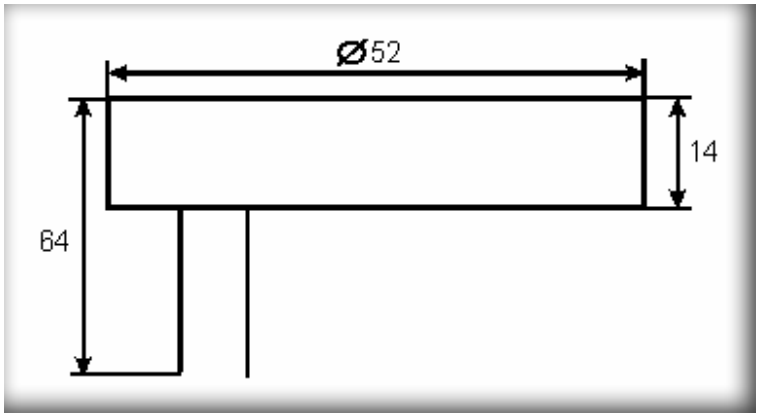
Пьезоэлектрический корректор применяется для обеспечения прецизионного перемещения с точностью **до тысячных долей мкм:**

- в фото-, рентгено- и электронолитографии для точного совмещения шаблонов в оборудовании;
- в медицинской техники для точной подачи инструмента;
- в лазерной аппаратуре для управления мощностью излучения, расходимостью пучка;
- в системах сканирования оптического луча в пространстве и других прецизионных устройствах.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Единица измерения	Значение
Линейное изменение длины при положительном или отрицательном напряжении не более 230 В, не менее	мкм	5
Статическая емкость, не более	мкФ	0,05
Сопротивление изоляции, не менее	МОм	20
Допустимое рабочее электрическое напряжение, не более	В	+250
Рабочий диапазон частот	Гц	5…1000
Масса, не более	г	150

Геометрические размеры



УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Интервал рабочих температур, °С	-60…+70
Диапазон частот, Гц	10…60
Ускорение, м/с^2 (g)	19,6 (2)

Приложение Л
Актюаторы пьезокерамические АП
ОАО "ВЗРД "Монолит", Серийные

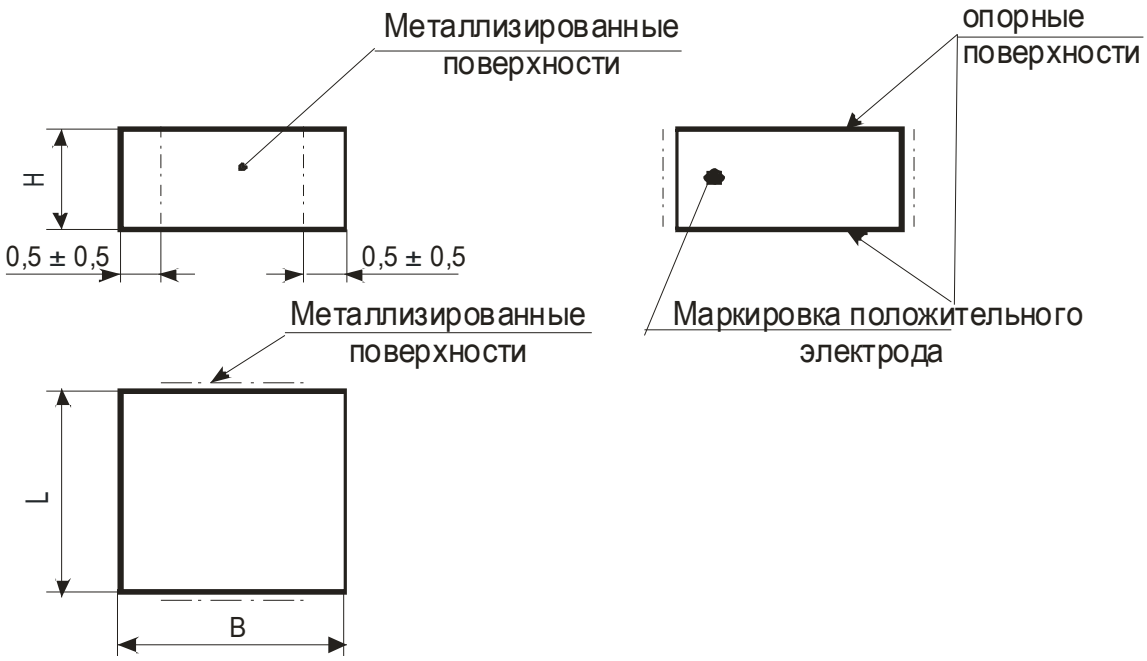
Актюаторы пьезокерамические АП предназначены для создания на их основе механизмов, обеспечивающих линейные перемещения. Актюаторы изготавливают в соответствии с ТУ BY 300050407.087-2008.

АП-Б – актюаторы пьезокерамические безвыводные незащищенные.

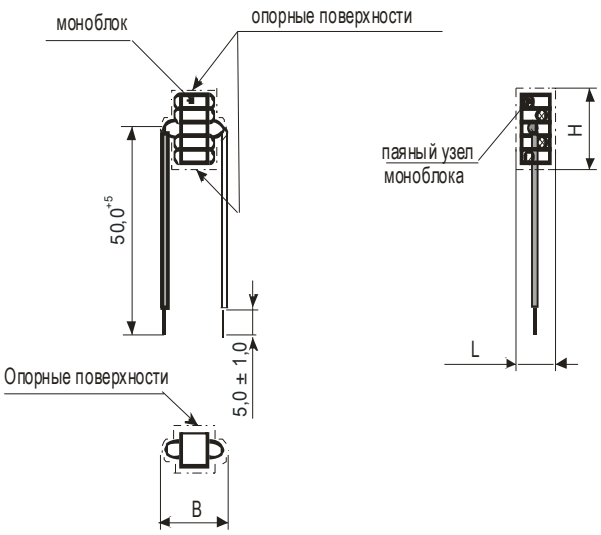
АП-В – актюаторы пьезокерамические неизолированные защищенные, с влагостойким покрытием, исполнение УХЛ.

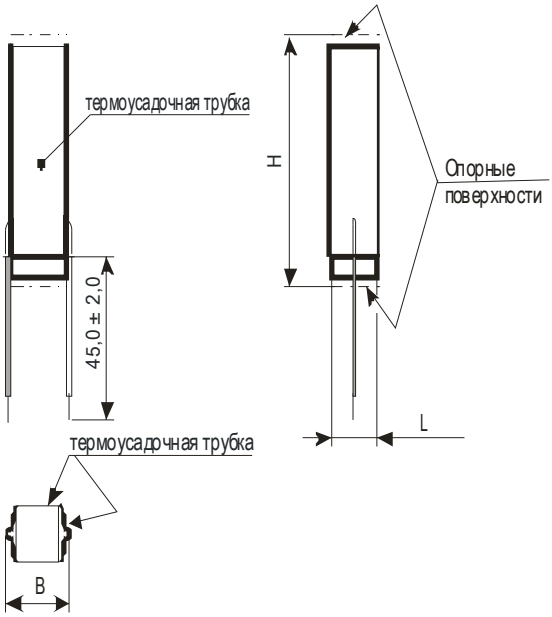
АП-Т – актюаторы пьезокерамические неизолированные защищенные, с влагостойким покрытием в термоусадочной трубке, исполнение УХЛ.

АП-К – актюаторы пьезокерамические неизолированные защищенные, с влагостойким покрытием в металлическом корпусе, исполнение УХЛ.



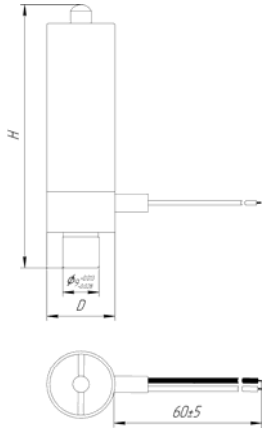
Актюаторы АП-Б

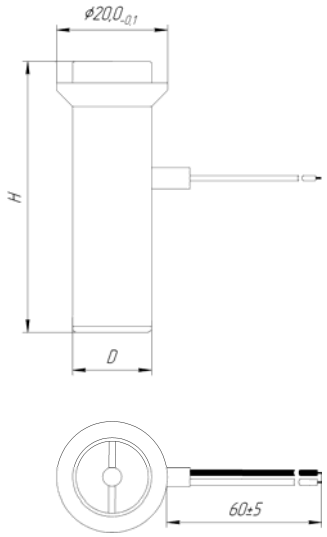




Актюаторы АП-В **Актюаторы АП-Т**

Отрицательной полярности соответствует белый вывод, положительной – цветной.





Актюаторы АП-К 14/01 и 20/02 **Актюаторы АП-К 20/03**

Допускается по согласованию с потребителем поставка актюаторов без заливки компаундом.

Параметры и характеристики

Вид актюаторов, значения минимального перемещения S_{33}, мкм и конструктивное исполнение	Перемещение при управляющем напряжении $U_{упр}$ постоянного тока 100 В, S_{33}, мкм, не менее	Блокирующая сила, $F_{блок}$, Н, не менее	Емкость, C_0		Тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, не более	Сопротивление изоляции $R_{из}$, МОм, не менее, при измерительном напряжении $U_{изм}$=100 В	Н, мм, не более	L x B, или D, мм, не более	Масса, г, не более
			номин., нФ	пред. откл., %					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АП-Б 1,0/01	1,0	1000	240	±30	0,03	45	1,7	6,15 x 6,15	0,5
АП-Б 1,0/02	1,0	500	120				1,7	3,1 x 6,15	0,25
АП-Б 1,6/03	1,6	1000	385				2,9	6,15 x 6,15	0,8
АП-Б 1,6/04	1,6	500	190				2,75	3,1 x 6,15	0,4
АП-В 2,5/01	2,5	1000	900			20	6,1	6,2 x 8,0	4,0
АП-В 20/02	20,0		6750		0,04	3	42,5		14,0
АП-В 25/03	25,0		9000		0,05	2	56,0		20,0
АП-Т 20/01	20,0		6750		0,04	3	42,5	7,2 x 10,0	15,0
АП-Т 25/02	25,0		9000		0,05	2	56,0		21,0
АП-К 14/01	14,0		5850		0,04	2,4	64,6	14,0	52
АП-К 20/02	20,0		8550			1,6	80,8		64
АП-К 20/03	20,0		5850			2,4	54,0		50

Климатическая категория -40/110/2 для АП-Б, АП-В и АП-Т
-45/110/2 для АП-К

Пример условного обозначения

Актюатор	АП-Б	1,0/01	240 нФ	ТУ BY 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)

Актюатор	АП-В	2,5/01	900 нФ	ТУ BY 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)
Актюатор	АП-Т	20/01	6750 нФ	ТУ BY 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)
Актюатор	АП-К	14/01	5850 нФ	ТУ BY 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)

Приложение М

Высоковольтные линейные усилители

фирмы APEX Microtechnology

PA78, PA86 и PA69 - высоковольтные, быстродействующие прецизионные операционные усилители с уникальными характеристиками, которые впервые реализованы в операционных усилителях. Оригинальная конструкция входного каскада этих усилителей обеспечивает чрезвычайно высокую скорость нарастания входного напряжения в импульсных схемах, в то время, как значение тока потребления поддерживается на уровне менее 1 мА. Выходной каскад хорошо защищен схемой ограничения тока, пороговое значение которого может задаваться пользователем. PA78, PA86 и PA69 найдут обширное применение в промышленных устройствах струйной печати, медицинских приборах и в других промышленных применениях.

Применение:

- **Управление пьезоэлектрическими преобразователями**
- **Магнитное отклонение**
- **Приводы деформируемых зеркал**
- **Пропорциональное управление клапанами**

POWER, PERFORMANCE, VALUE Precision ICs	**Напряжение на Выходе**	**Ток на Выходе**	**Скорость Нарастания Напряжения**	**Полоса Пропускания по Мощности**
Модель	**В**	**мА**	**В/мкс**	**кГц**
PA69	+/-100	50	200	200
PA86	+/-100	100	350	300
PA78	+/-175	150	350	200

Приложение Н
Драйвер управления пьезодвигателем
фирмы Linear Technology

16/08/2008

LT3572 - новая микросхема драйвер пьезодвигателей от компании Linear Technology

Сдвоенный мостовой драйвер пьезодвигателя идеально подходит как для стабилизации изображений по двум координатам, так и для управления моторами авто-фокуса и зума в цифровых фотоаппаратах и видеокамерах.

Микросхема LT3572, представленная компанией Linear Technology является высоко интегрированным сдвоенным мостовым драйвером пьезодвигателя, способным управлять двумя пьезодвигателями при напряжении до 40В. Каждый драйвер пьезодвигателя, также как и каждый повышающий преобразователь микросхемы может быть включен или выключен независимо от других.

Такого сорта топология делает микросхему LT3572 идеальной как для стабилизации изображений по двум координатам, так и для управления моторами авто-фокуса и зума в цифровых фотоаппаратах и видеокамерах. Допустимое напряжение питание в диапазоне от 2,7 до 10В позволяет использовать данную микросхему в цифровых камерах, питающихся как одного, так и от двух Li-ion аккумуляторов.

Микросхема LT3572s оснащена 900-миллиамперным повышающим преобразователем, который может отдавать ток до 50 мА при выходном напряжении 30В при питании от одного Li-ion аккумулятора. Его частота преобразования, с целью уменьшения внешних помех, может быть запрограммирована в диапазоне от 500 кГц до 2,25 МГц. Представленная в корпусе QFN размером 4х4мм, микросхема позволяет получать очень компактные, в плане занимаемой площади, решения.

Контрольный вывод указывает момент, когда выход повышающего преобразователя переходит в состояние готовности, разрешая драйверу начинать управление пьезодвигателем. Другие особенности микросхемы включают в себя мягкий старт и возможность внешней синхронизации.