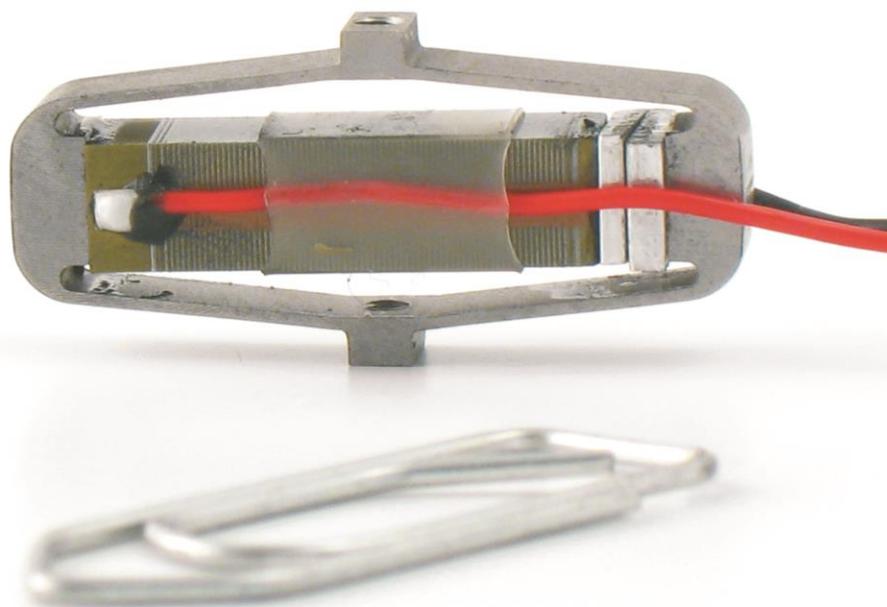


**А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров,  
В.В. Григорьев, П.В. Карев**

**ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
И СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ**



**Санкт-Петербург  
2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров,**

**В.В. Григорьев, П.В. Карев**

**ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
И СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

**Учебное пособие**



**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2017**

А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, П.В. Карев  
Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб:  
Университет ИТМО, 2017. – 134 с.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с разработкой, исследованием и применением исполнительных пьезоэлектрических преобразователей. В первом разделе 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. В третьем разделе рассматривается подход к составлению модели пьезодвигателя на примере многослойного пьезоактюатора с нагрузкой, 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 пьезопроводов, рассматриваются часто встречающиеся варианты с регулированием по выходу и подчиненным регулированием. В качестве примеров приводятся системы и приводы, разработанные авторами в последние годы.

Учебное пособие адресовано магистрантам, обучающимся по следующим направлениям подготовки: 27.04.03 «Системный анализ и управление» и 27.04.04 «Управление в технических системах».

Рекомендовано к печати Учёным советом Факультета СУиР, 21.02.2017, протокол №2.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, П.В. Карев, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Пьезопреобразователи, тенденции развития, принцип действия.....	7
1.1 Тенденции развития и использования пьезоэлектрических исполнительных устройств.....	7
1.2 История открытия пьезоэффекта.....	14
1.3 Явление пьезоэлектрического эффекта.....	15
2. Материально-техническая база пьезоэлектрических исполнительных устройств.....	21
2.1 Пьезоэлектрические материалы.....	21
2.1.1 Пьезоэлектрики – монокристаллы.....	21
2.1.2 Поликристаллические пьезоэлектрики.....	23
2.2 Пьезоэлементы.....	34
2.3 Пьезокерамические актюаторы.....	41
2.3.1 Пакетная конструкция.....	42
2.3.2 Биморфная конструкция.....	46
2.4 Пьезоэлектрические двигатели. Особенности конструкций.....	50
2.4.1 Резонансный (ультразвуковой) пьезоэлектрический двигатель (РПД).....	51
2.4.2 Силовые двигатели с ограниченным диапазоном угловых и линейных перемещений.....	56
2.4.3 Шаговые двигатели.....	61
3. Математическое описание пьезоэлектрических исполнительных устройств.....	63
3.1 Математическая модель многослойного тонкопленочного актюатора.....	63
3.2 Гистерезис, последствие и ползучесть пьезоэлектрических исполнительных устройств.....	67
3.3 Учет влияния гистерезиса и последствия (ползучести) при проектировании и моделировании пьезоэлектрических исполнительных устройств.....	69
4. Цифровой пьезоэлектрический привод.....	76
4.1 Пьезоэлектрический привод с регулированием по положению.....	76
4.2 Пьезоэлектрический привод с подчиненным регулированием.....	79
4.3 Особенности широтно-импульсного управления пьезоприводом.....	80
4.3.1 Импульсное управление пьезоактюатором.....	80
4.3.2 Моделирование пьезопривода с ШИМ-Управлением.....	82

4.4	Система управления многосегментным адаптивным зеркалом телескопа.....	85
4.5	Цифровой контрольно-измерительный стенд.....	89
4.5.1	Функциональная схема измерительного стенда.....	89
4.5.2	Принцип действия стенда.....	90
4.5.3	Структурная схема измерительной системы.....	92
4.5.4	Математическая модель процесса измерения.....	93
	Литература.....	96
	Приложение А.....	98
	Приложение Б.....	101
	Приложение В.....	103
	Приложение Г.....	104
	Приложение Д.....	109
	Приложение Е.....	110
	Приложение Ж.....	114
	Приложение З.....	117
	Приложение И.....	120
	Приложение К.....	122
	Приложение Л.....	123
	Приложение М.....	124
	Приложение Н.....	127
	Приложение О.....	128

## 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, требуются совершенно новые технологии и технические средства.

Самой актуальной проблемой является повышение точности позиционирования. Субмикронный диапазон погрешностей линейного позиционирования и секунднй 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 шариковинтовых 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.

Авторы благодарят магистрантов О.А. Малофееву, О.Б. Дмитриеву за помощь в обработке и подготовке материалов учебного пособия.

# 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 XXI века. 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°C, а на основе кобальта способны выдерживать температуру равную и более 700°C. 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 воздействиям. 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 обеспечивают 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 [1–3]. Неоспоримо первенство пьезокерамики в использовании для ультразвуковой диагностики в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе, в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении. 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 улучшают эксплуатационные качества автомобиля, отвечающие жестким эксплуатационным требованиям. Одним из самых перспективных направлений использования составных пьезоактюаторов является управление гидравлическими клапанами. Примерами 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.

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.

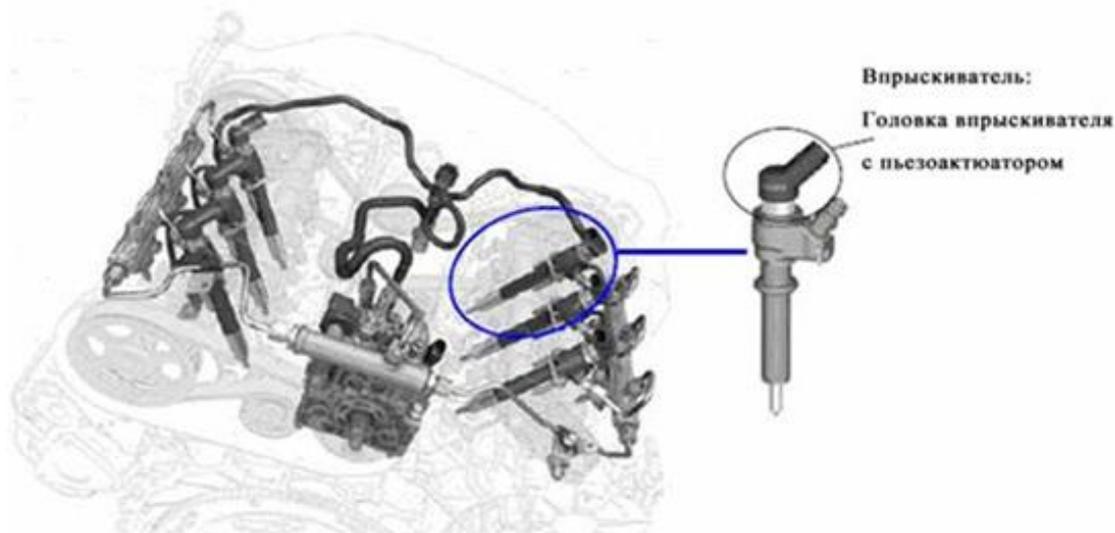


Рисунок 1.1 – Дизельный двигатель

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 200 мкс), 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 встроенным 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 профиля 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 инъекции характеризуется плавно нарастающим фронтом, за которым следует относительно длительный цикл и далее резкий спад фронта. При длительном цикле достигается максимально высокая температура.

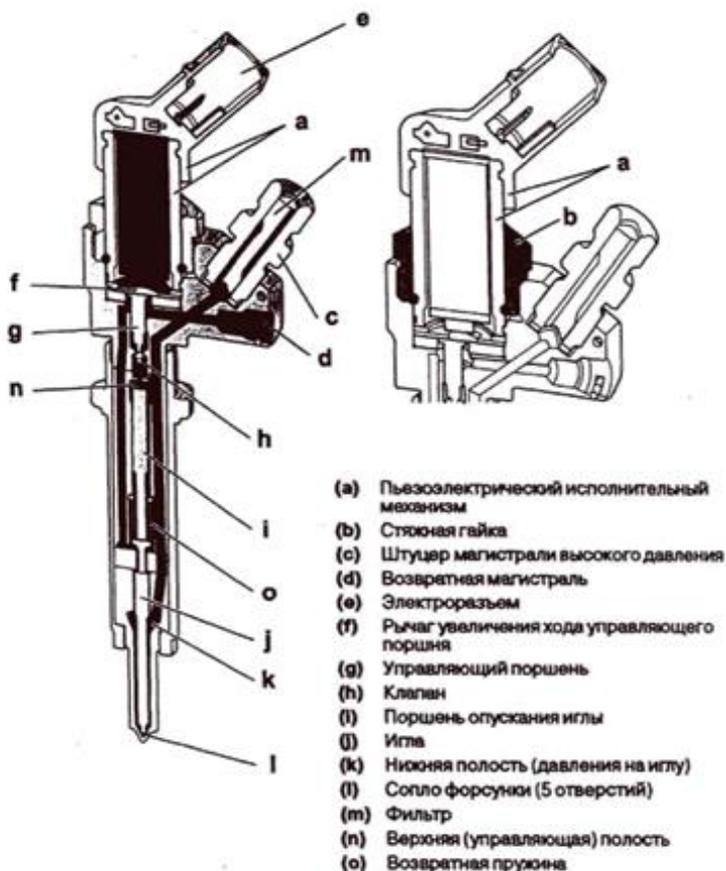


Рисунок 1.2 – Применение пьезокерамического актюатора для впрыска топлива

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 100–200 мс), 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.

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). 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.

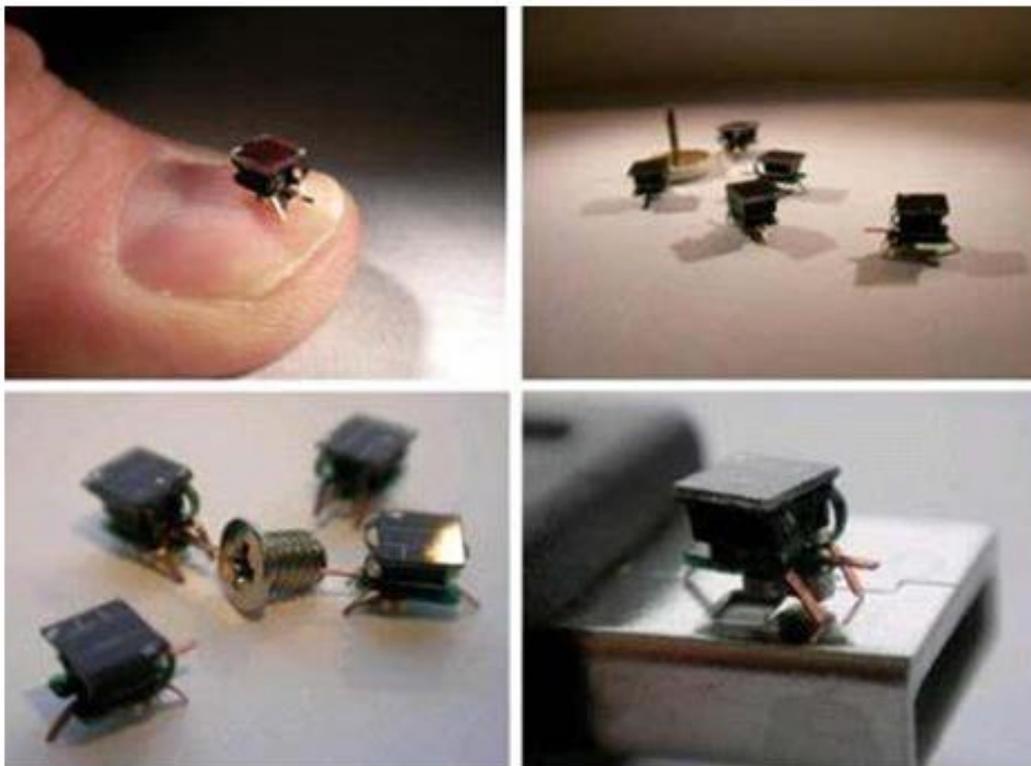


Рисунок 1.3 – Ультразвуковые пьезоэлектрические микророботы

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

- Фирма *Keramos*, США [17] разработала новую пьезокерамику K12, которая может работать при экстремально высоких температурных условиях до 820°C.
- *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 «пьеzo» (*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 эхолотационный прибор для обнаружения подводных объектов. В этом приборе в качестве излучателя и приемника ультразвуковых сигналов использовались кварцевые пластинки, смонтированные между стальными накладками, понижающими резонансную частоту преобразователя. Вначале ультразвуковой локатор Ланжевена использовался в качестве эхолота. Дальнейшее его усовершенствование привело к созданию современных ультразвуковых эхолотов, широко применяемых для обнаружения различных подводных препятствий, в том числе и подводных лодок. Вскоре после изобретения Ланжевена появились первые разработки пьезоэлектрических микрофонов, телефонов, звукозаписывающих устройств, приборов для измерения сил и ускорений и т.д. Следующим важным этапом в истории применения пьезоэлектричества было использование пьезоэлектрических пластинок и стержней в качестве элементов, стабилизирующих частоту электронных 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 ультразвуковых исследованиях веществ было развитие методов измерения скорости и поглощения ультразвука, осно-

ванных 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 А.Н. 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.

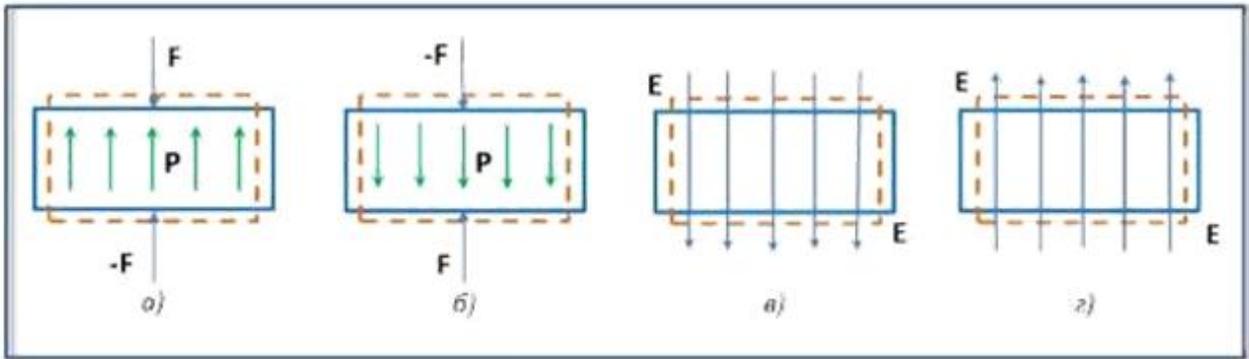


Рисунок 1.4 – Схематичные изображения прямого (а, б) и обратного (в, г) пьезоэффектов

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  $P_m$  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  $\Delta V$ .

$$P = P_m / \Delta V = \sum_{i=1}^{\infty} q_i l_i / \Delta V \text{ или } P = \sum_{i=1}^{\infty} q_i / \Delta A, \quad (1.1)$$

где  $q_{\Sigma}$  – 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  $T$ .

$$P = dT. \tag{1.2}$$

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

Обратный пьезоэффект описывается зависимостью

$$S = dE, \tag{1.3}$$

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.

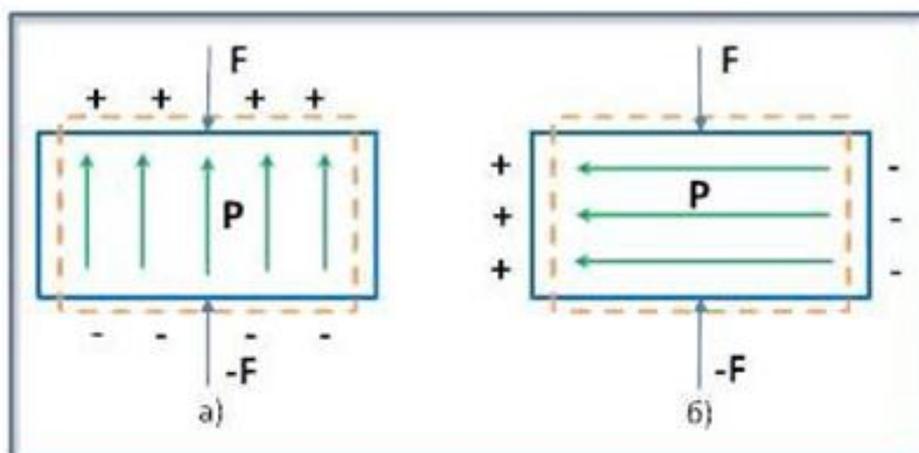


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение

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  $9 \times 9$ , 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 ( $h^T$  или  $d^E$ ) и двумя диэлектрическими постоянными ( $\beta^S$  или  $\varepsilon^T$ ). Матрица упругих постоянных имеет следующую структуру

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

Матрица пьезоэлектрических постоянных

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

Матрица обратных диэлектрических проницаемостей

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

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

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

где  $E$  – вектор напряженности электрического поля;  $D$  – вектор электрического смещения (индукция);  $T$  – тензор механического напряжения;  $S$  – тензор деформации;  $C_y^D$  – матрица упругих постоянных;  $h_y^D$  – матрица пьезоэлектрических постоянных;  $\beta_{mn}^S$  – 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].

$$\begin{aligned} T &= c^E S - e_t E & S &= s^E T + d_t E & S &= s^D T + g_t D \\ D &= e_t - \varepsilon^S E & D &= d_t T + \varepsilon^T E & E &= -g_t T + \beta^T D' \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $g_t$ ,  $e_t$ ,  $d_t$  – пьезоэлектрические постоянные;  $\beta^S$ ,  $\varepsilon^S$  – 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

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

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

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

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;  $\rho$  – 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, заключающийся 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 искусственные поликристаллические твердые растворы, структура которых упорядочена предварительной поляризацией в электрическом поле (пьезокерамики – титанат и цирконат свинца, бария).

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).

#### 2.1.1 Пьезоэлектрики-монокристаллы

**Кварц** – широко распространенный в природе минерал, относится к числу наиболее твердых 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 розового, реже бесцветный. При трении электризуется, обладает сильным пьезоэлектрическим 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 звукозаписывающих устройствах. 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 ( $T_{пл}=130^{\circ}\text{C}$ ) 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  $100^{\circ}\text{C}$  кристаллы начинают разрушаться (выделяется аммиак). Кристаллы дигидрофосфата не содержат кристаллизованной воды и не обезвоживаются. При 93% относительной влажности воздуха кристаллы начинают поглощать влагу и растворяются. Дигидрофосфат аммония плавится при температуре  $190^{\circ}\text{C}$ , однако выше  $100^{\circ}\text{C}$  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, $\rho \times 10^3 \text{ кг/м}^3$	Скорость звука, $C_{зв} \times 10^3 \text{ м/сек}$	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	Пьезомодуль, $d, 10^{12} \text{ К/Н}$	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } d \times 10^2$	Коэффициент электро-механической связи $K_{эм}$
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 произ-

водители 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 приемопередающих 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°C;
- **материалы с повышенной анизотропией коэффициентов электромеханической связи** – с различными сочетаниями других параметров для высокочастотных излучателей и приемников, для датчиков с пониженной боковой чувствительностью, применяемых для дефектоскопии, толщинометрии, уровнеметрии, медицинской диагностической аппаратуры;
- **пористые материалы** – с широким интервалом рабочих температур применяются в ультразвуковых преобразователях дефектоскопов, толщинометрии, виброметрии, гидроакустике, диагностической и терапевтической медицинской аппаратуры;
- **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		
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ $\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	Относительная диэлектрическая проницаемость;		
$\text{tg } \delta$	Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при $E=25$ кВ/м;		
$Q_m$	Механическая добротность;		
$v_1^E$	Скорость звука;		
$\sigma_p$	Планарный коэффициент Пуассона;		
<b>Коэффициент электромеханической связи</b>			
$k_p$	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);		
<b>Относительное отклонение частоты (ООЧ) в интервале температур - 60...+85°C</b>			
$(\text{ООЧ})_p$	Планарной моды;		
$(\text{ООЧ})_{сд}$	Сдвиговой моды;		
$(\text{ООЧ})_{сж}$	Моды растяжения-сжатия по толщине;		
Траб	Рекомендуемая повышенная температура;		
$\rho_v$	Удельное объемное Электрическое сопротивление;		
$\rho$	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, PХЕ* (зарубежные). В таблицах 2 и 3 приведены характеристики ряда популярных пьезоэлектрических 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	PIС 151	PIС 255	PIС 155	PIС 153	PIС 152	PIС 181	PIС 141	PIС 241
Физические и диэлектрические свойства								
$(g / \text{см}^3)$	7,80	7,80	7,80	7,60	7,70	7,80	7,80	7,80
T (° C)	250	350	345	185	340	330	295	270
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	2400	1750	1450	4200	1350	1200	1250	1650
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	1980	1650	1400			1500	1500	1550
$\text{tg } \delta (10^{-3})$	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
$k_T$	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
$d_{31}$	-210	-180	-165			-120	-140	-130
$d_{33}$	500	400	360	600	300	265	310	290
$d_{15}$		550				475	475	265
$g_{31}$	-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								
$N_p$	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
$Q_m$	100	80	80	50	100	2000	1500	1200

Таблица 2.4 – Характеристики некоторых отечественных пьезокерамических материалов

Характеристики		Сегнетомягкие материалы		Материалы средней сегнетожесткости		Высокотемпературные материалы	
Обозн.	Ед.изм.	ЦТС- 50	НЦТС-2	ЦТС СТ-3	ЦТС-48	ТСВС-2	ТН6В-1
T <sub>к</sub>	°С	260	130	280	210	420	900
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	-	2200	5100	1400	2200	1800±150	120
$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$	-	-	-	-	-	-	-
tg δ, не более	%	2,5	3,0	0,55	0,8	0,3	0,2
Q <sub>m</sub>	-	80	60	800	450	28±5	-
v <sup>E</sup>	10 <sup>3</sup> м/с	2,9	2,95	3,3	3,2	3,06±0,06	-
σ <sub>p</sub>	-	0,33	-	0,35	0,37	0,20	-
K <sub>p</sub>	-	0,64	0,61	0,55	0,58	≥0,50	-
k <sub>15</sub>	-	-	-	-	-	≥0,66	-
k <sub>33</sub>	-	0,73	0,74	-	0,65	≥0,60	-
d <sub>31</sub>	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	-200	-310	-140	180	≥135	-
d <sub>33</sub>	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	470	800	275	420	≥340	≥15
d <sub>15</sub>	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	-	-	-	-	≥500	-
g <sub>31</sub>	10 <sup>-3</sup> В*м/Н	-10,3	-6,9	-11,3	9,3	-	-
g <sub>33</sub>	10 <sup>-3</sup> В*м/Н	24,1	17,7	22,2	21,6	-	14,1
Траб	°С	180	80	150	120	300	750
ρ <sub>v</sub> ,	При 100°С	1,0	1,0	5	5	1	1

Сравнительный анализ основных параметров монокристаллов и пьезо-керамик приведен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сравнительная характеристика монокристаллов и керамики

Свойства	Монокристаллы	Керамика
Пьезомодуль, d	невысокий	Высокий
Обл. рабочих температур, T <sub>max</sub> , °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.  $d$  ( $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ) – пьезомодули (по направлению рабочих деформаций) определяют рабочий диапазон перемещений исполнительного устройства.
2.  $K_{эм}$  ( $k_{33}$ ,  $k_{31}$ ) – 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.  $Q_m$  – характеризует потери энергии в материале на внутреннее трение, определяет эффективную ширину полосы пропускания, влияет на степень затухания колебательных процессов.
5.  $\epsilon_r$  – 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.  $T_k$  – 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.  $T$  – рекомендуемый рабочий диапазон температур, в котором флуктуации параметров материала будут находиться 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.

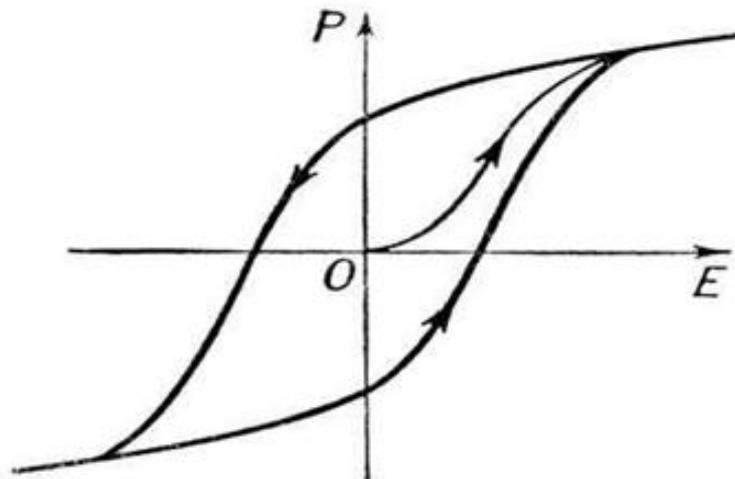


Рисунок 2.1 – Петля гистерезиса

При увеличении электрического поля, приложенного к пьезокерамическому элементу, до максимального значения поляризация материала достигает точки насыщения  $P_s$ . При снижении поля до нуля поляризация достигает уровня остаточной поляризации  $P_r$ . 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 пьезокерамики 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  $\sigma$ , 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 пьезокерамики, экспериментально установлено, что скорость процесса деформирования практически не влияет на очертание ветвей петли гистерезиса.

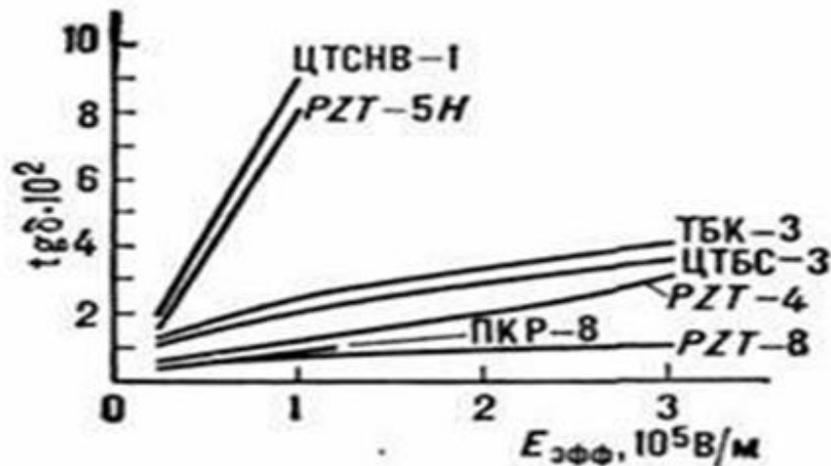


Рисунок 2.2 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от величины возбуждающего электрического поля

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

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

где  $K_{\text{эм}}$  – коэффициент электромеханической связи,  $\delta$  и  $\sigma$  – углы диэлектрических и механических потерь соответственно.

Величина общего угла потерь зависит главным образом от величины электрического поля и основной вклад в его изменение вносит угол диэлектрических потерь. В таблице 2.6 приведены пределы изменения общего угла потерь в различных по силе электрических полях.

Таблица 2.6 – Значения угла общих потерь пьезокермики в разных полях

	Слабые поля <75 В/м	Средние поля <300 В/м	Сильные поля >300 В/м
Пределы изменения общего угла потерь $\delta_{\text{общ}}$	7° – 10°	7° – 21°	12° – 26°

Чем больше угол общих потерь, тем больше в конечном итоге величина гистерезиса статической характеристики пьезодвигателя. Нужно отметить, что 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 управляющего напряжения 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 ( $T=25\pm 10^\circ\text{C}$ , влажность  $65\pm 15\%$ , давление  $10^5\pm 4\cdot 10^3$  Па). Однако, в реальных условиях параметры пьезокерамики системы ЦТС нестабильны. Основной причиной нестабильности служат остаточные механические напряжения  $T_{oc}$  и связанные с ними процессы доменной реориентации. Напряжения  $T_{oc}$  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 содержатся 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  $\varepsilon$ ,  $d$ ,  $tg\delta$ ,  $\eta$  – сегнетомягких материалов примерно в 2–3 раза больше соответствующих параметров сегнетожестких материалов, значения  $E_k$ ,  $Q_m$ ,  $\theta_k$ , 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.

Особый интерес представляет влияние температурного фактора на характеристики пьезокерамик [15]. Так, температурные изменения пьезомодуля  $d_{33}$  для отечественных промышленных составов ЦТБС-3, ЦТСНВ-1, ЦТС-19, ЦТС-23 – на рисунке 2.3. На этом рисунке показано, что относительные изменения пьезомодуля  $d_{33}$  при температуре  $200^\circ\text{C}$  по сравнению с его значением при комнатной температуре составляют для ЦТС-19 и ЦТБС-3 – 30–40%, для ЦТС-23 – 18%.

Температурная нестабильность диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ , пьезомодуля  $d_{31}$  и скорости звука  $V_{E_1}^E$  для пьезоматериалов представлены в таблице 2.7.

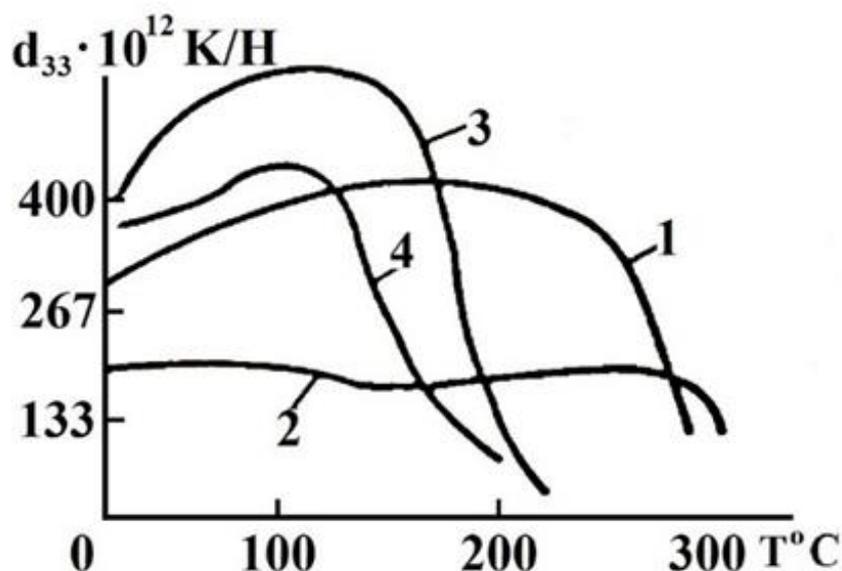


Рисунок 2.3 – Температурная зависимость  $d_{33}$  составом: 1 – ЦТС-19, 2 – ЦТС-23, 3 – ЦТБС-3, 4 – ЦТСНВ-1

Таблица 2.7 – Предельные изменения электрофизических параметров после воздействия климатических факторов

Материал	Воздействующий фактор		Изменение электрофизических параметров, %		
	Пониженная температура среды (предельная)	Пониженная температура среды (предельная)	$\varepsilon_{T_{33}} / \varepsilon_0$	$d_{31}, 10^{-12}$ Кл/Н	$V^{E_1}$ м / с
ЦТБС-3	- 60°	+ 60°	± 20,0	± 17,0	± 2,5
ЦТСНВ-1			± 22,0	± 20,0	± 4,0
ЦТС-19, ЦТС-19М			± 10,0	± 10,0	± 2,0
ЦТС-19М			± 10,0	± 10,0	± 2,0
ЦТСТБС-1			± 10,0	± 10,0	± 2,0
ЦТССТ-3			± 10,0	± 10,0	± 2,0
ПКВ-460			± 8,0	± 8,0	± 2,0
ЦТССТ-1			± 20,0	± 10,0	± 2,0

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). Разброс основных параметров может достигать существенных величин, так упругая податливость и жесткость материала может изменяться в пределах 5%, пьезомодули  $d$  до 10%, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  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 пьезокерамики 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.

В таблице 2.8 приводятся предельные изменения параметров при воздействии различных факторов на примере пьезокерамики ЦТС-19.

Таблица 2.8 – Предельные изменения параметров пьезокерамики ЦТС-19

Параметры пьезокерамики	Обозн.	Норма изменения параметров пьезоматериала по ТУ, %	Изменение параметров пьезоматериала после воздействия климатических факторов: повышенной и пониженной предельных температур $\pm 60$ °С, %	Предельные изменения значений параметров за период старения 2 года в отапливаемом помещении, %	Изменение параметров в постоянном поле, %		
					<75 В/м м (-)	До 300 В/м м (-)	>300 В/м м (-)
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	$\pm 20,0$	$\pm 10,0$	-10,0	5	5	5-10
Пьезоэлектрический модуль	$d_{31}, 10^{-12}$ Кл/Н	от 0 и выше	$\pm 10,0$	-10,0	5	5-27	$\geq 27$
Тангенс угла диэлектрических потерь	$tg \delta$	0-3.5	1.9-2.5	-	до 10	до 10-30	до 40
Механическая добротность	$Q_m$	$\pm 20,0$	$\pm 14,0$	-	10	10-20	20-40

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

Итак, 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 сегодня есть большой выбор типоразмеров пьезоэлементов, изготавливаемых из разных пьезоматериалов (см. Приложения Г).



Рисунок 2.4 – 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 2.5. 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 вязущими катализаторами, прессуют, каландрируют (прокатывают) или формуют с целью получения структурного элемента заданной формы (диск, стержень, пластина) 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 2.6 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: 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, палладий, индий, медь. Наиболее распространенный способ – вжигание серебряной пасты: на обезжиренную поверхность наносят кистью или пульверизатором слой серебряной пасты, сушат при  $200^{\circ}\text{C}$  и вжигают при  $750\text{--}800^{\circ}\text{C}$ .

**Поляризация** – процесс ориентации произвольно направленных доменов вещества в определенном направлении. Способы: масляная и воздушная, высоко- и низкотемпературная, 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.

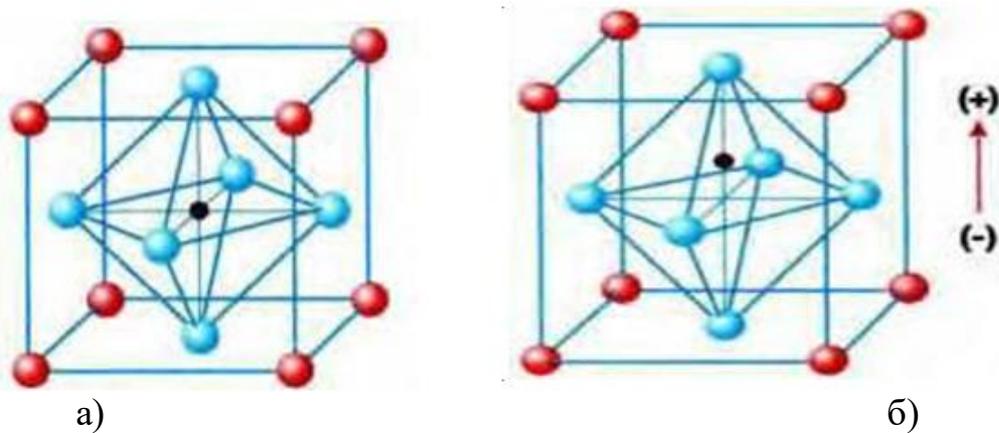


Рисунок 2.5 – Кристаллическая структура пьезоэлектрической керамики, а) температура выше точки Кюри (кубическая решетка, симметричное расположение положительных и отрицательных зарядов), б) температура ниже точки Кюри (тетрагональная (ромбоэдрическая) решетка, кристалл имеет электрический дипольный момент)

**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 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.

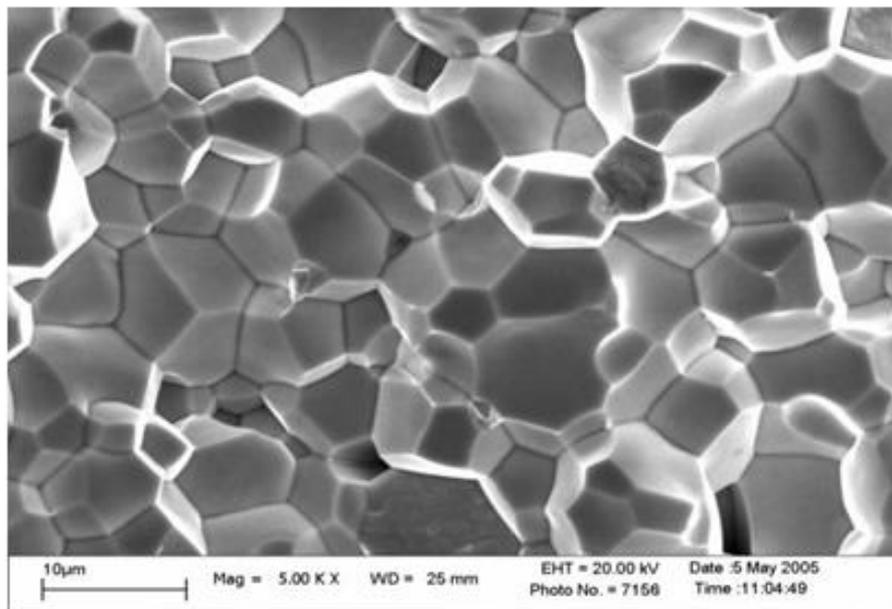


Рисунок 2.6 – Вид среза керамики под микроскопом с высоким разрешением

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.

**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.

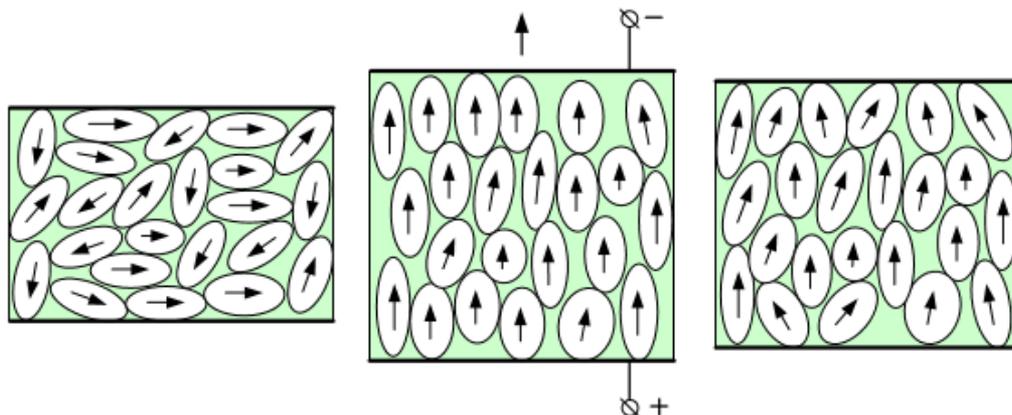


Рисунок 2.7 – Переориентация доменов и кинетика доменных стенок в керамике

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

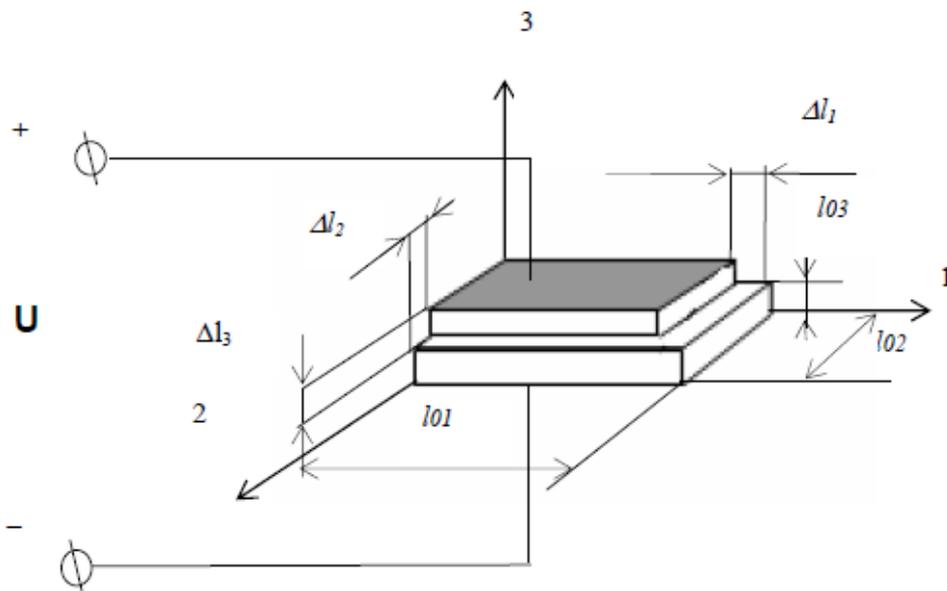


Рисунок 2.8 – Деформация пьезоэлемента под действием электрического поля

Рассмотрим связь между деформацией пьезоэлемента и приложенным полем на примере пьезоэлемента, выполненного в виде плоскопараллельной пластины, с размерами  $l_1, l_2, l_3$ , 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

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

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 ( $ij$ ) 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

$$\frac{\Delta l_3}{l_{03}} = -\frac{T_3}{Y_{33}} + d_{33} E_3, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_3$  – 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  $\sigma_3=0$

$$\Delta l_3 = d_{33} E l_3. \quad (2.4)$$

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

$$\Delta l_1 = d_{31} E l_1. \quad (2.5)$$

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

$$P_3 = -d_{33} T_3 + \varepsilon_{33} \varepsilon_0 E_3, \quad (2.6)$$

где  $P_3$  – поляризованность элемента в направлении третьей оси, Кл/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\varepsilon_{33}$  – 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

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

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

2. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов  $K_{\Pi}$  и  $K_O$ , Н/В

$$\text{вдоль оси 3: } K_{\Pi} = K_O = \frac{S_0 Y_{33} d_{33}}{l_3}, \quad \text{вдоль оси 1: } K_{\Pi} = K_O = Y_{11} d_{31} l_2.$$

3. Электрическая емкость элемента  $C_0$ , Ф

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

где  $K_{\text{эм}33}$  – коэффициент электромеханической связи, который в свою очередь, определяется из выражений

$$\text{вдоль оси 3: } K_{\text{эм}33}^2 = \frac{d_{33}^2 Y_{33}}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0}, \quad \text{вдоль оси 1: } K_{\text{эм}31}^2 = \frac{d_{31}^2 Y_{11}}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0}.$$

4. Деформация под действием внешней механической нагрузки

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

где  $F_C$  – внешнее приложенное усилие вдоль третьей оси.

5. Собственная частота элемента  $\omega_0$  (без механической нагрузки),  $c^{-1}$

$$\text{вдоль оси 3: } \omega_{03} = \frac{1,58}{l_3} \sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}, \quad \text{вдоль оси 1: } \omega_{01} = \frac{1,58}{l_1} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}},$$

где  $\rho_M$  – плотность материала,  $\frac{кг}{м^3}$ .

Если к элементу механически подсоединить объект массой  $m_0$ , то эквивалентная приведенная масса  $m_\Sigma$ , кг определяется по формуле

$$m_\Sigma = m_0 + 0,382m_k,$$

где  $m_k$  – 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, которые принято называть пьезоэлектрическими актюаторами.

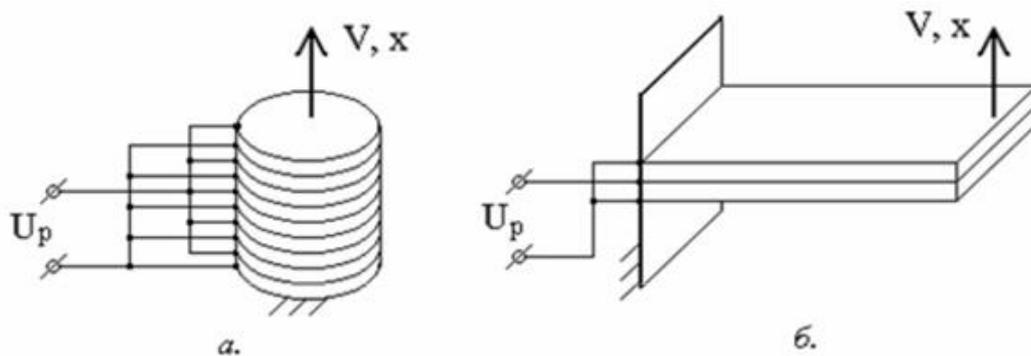


Рисунок 2.9 – Конструкции пьезоэлектрических актюаторов

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые (мода  $d_{33}$ ), поперечные (мода  $d_{31}$ ) и гибкие или биморфные (мода  $d_{31}$ ). 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 пьезо-керамических 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 перемещений (см. Приложение Д) [12–13].

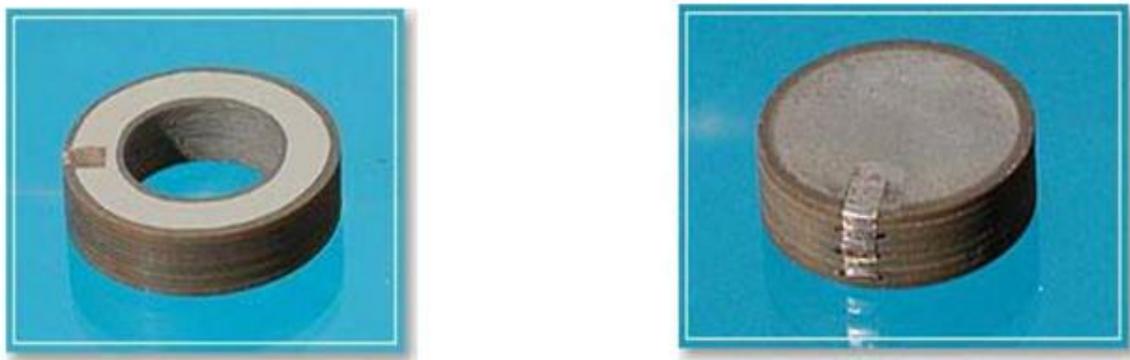


Рисунок 2.10 – Силовые пакетные актюаторы из колец и дисков

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.



Рисунок 2.11 – Армированный пакет со стягивающей шпилькой

Допустимая напряженность электрического поля пьезокерамики около 1–2 кВ/мм, 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 магнетизма 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°C, максимальное значение параметров при температуре 25°C. Высокие значения пьезомодуля ( $d_{33} > 2000$  нКл/Н) и диэлектрической проницаемости электрострикционного материала ( $\epsilon_{33} = 15000–20000$ , тогда как для пьезокерамики  $\epsilon_{33} = 1500–3000$ ) 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°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ).

В настоящее время в условиях широкого внедрения актюаторов в приборостроении, электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности, к ним предъявляются жесткие требования по габаритам, диапазонам перемещений, величинам управляющих напряжений, диапазонам рабочих температур. Большинство пакетных устройств, разработанных в конце прошлого века, перестали удовлетворять этим требованиям. Им на смену пришли тонкопленочные многослойные актюаторы [12]. Многослойные актюаторы (рисунок 2.12) 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.

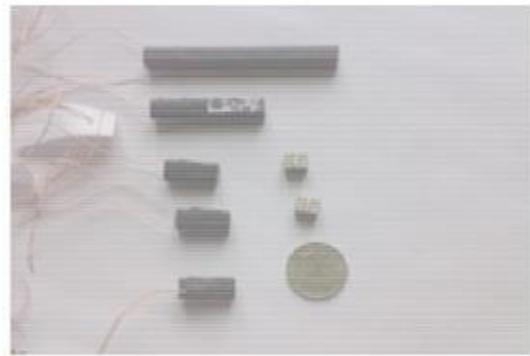
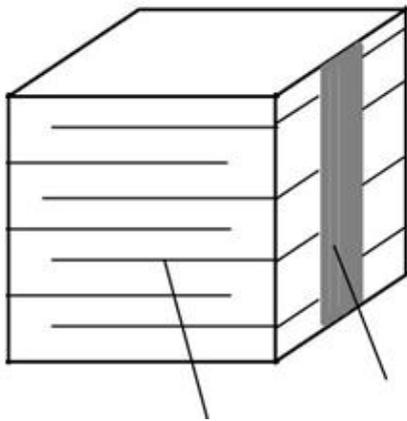


Рисунок 2.12 – Многослойные актюаторы

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 В. 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 2x2 мм<sup>2</sup> 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.

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 2.9 представлены характеристики одной из первых серий тонкопленочных многослойных актюаторов фирмы ЭЛПА [12].

Таблица 2.9 – 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 х 6,5 х 5,5	2,0	925	0 ÷ 100	4,5	1350	100
6,0 х 6,5 х 8,5	2,6	1400	0 ÷ 100	6,5	1350	150
7,5 х 7,5 х 19	6,0	3250	0 ÷ 100	15,0	1350	350
7,5 х 7,5 х 41	13,0	7000	0 ÷ 100	25,0	1350	750
7,5 х 7,5 х 55	20,0	9250	0 ÷ 100	35,0	1350	1000
7,5 х 7,5 х 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

$$\text{вдоль оси 3: } \Delta l_3 = Nd_{33}El_3, \quad \text{вдоль оси 1: } \Delta l_1 = Nd_{31}E_3l_1.$$

2. Коэффициент упругости элемента  $K_y$ , Н/м

$$\text{вдоль оси 3: } K_y = \frac{S_0 Y_{33}}{Nl_3}, \quad \text{вдоль оси 1: } K_y = \frac{S_0 Y_{11}}{Nl_1} = \frac{Y_{11}l_2l_3}{Nl_1},$$

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

3. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов  $K_{\Pi}$  и  $K_O$ , Н/В

$$\text{вдоль оси 3: } K_{\Pi} = K_O = \frac{S_0 Y_{33} d_{33}}{l_3}, \quad \text{вдоль оси 1: } K_{\Pi} = K_O = Y_{11} d_{31} l_2.$$

4. Электрическая емкость элемента  $C_0$ , Ф

$$\text{вдоль оси 3: } C_0 = \frac{\epsilon_{33} \epsilon_0 (1 - K_{ЭМ33}^2) S_0}{l_3}, \quad \text{вдоль оси 1: } C_0 = \frac{\epsilon_{33} \epsilon_0 (1 - K_{ЭМ31}^2) l_1 l_2}{l_3},$$

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

$$\text{вдоль оси 3: } K_{ЭМ33}^2 = \frac{d_{33}^2 Y_{33}}{\epsilon_{33} \epsilon_0}, \quad \text{вдоль оси 1: } K_{ЭМ31}^2 = \frac{d_{31}^2 Y_{11}}{\epsilon_{33} \epsilon_0}.$$

5. Деформация под действием внешней механической нагрузки

$$\text{вдоль оси 3: } \Delta \ell_{3F} = \frac{F_C N l_3}{S_0 Y_{33}}, \quad \text{вдоль оси 1: } \Delta \ell_{1F} = \frac{F_C N l_1}{S_0 Y_{11}},$$

где  $F_C$  – внешнее усилие, приложенное вдоль третьей оси.

6. Собственная частота актюатора  $\omega_0$  (без механической нагрузки),  $c^{-1}$

$$\text{вдоль оси 3: } \omega_{03} = \frac{1,58}{l_3} \sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho_M}}, \quad \text{вдоль оси 1: } \omega_{01} = \frac{1,58}{l_1} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho_M}},$$

где  $\rho_M$  – плотность материала,  $\frac{кг}{м^3}$ .

Если к актюатору механически подсоединить объект массой  $m_0$ , то эквивалентная приведенная масса  $m_{\Sigma}$ , кг определяется по формуле

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

где  $m_k$  – масса керамики.

### 2.3.2 Биморфная конструкция

Биморф состоит из двух частей – двух пьезоэлементов, соединенных между собой, или пьезоэлемента и металлической пластины, также соединенных между собой с помощью эпоксидного компаунда или легкоплавкого припоя. Биморфные элементы, состоящие из двух пьезоэлементов, 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 пьезоэлементов: последовательная и параллельная (рисунок 2.13, а, б соответственно)

Традиционно эти преобразователи изготавливаются из пластин одинаковых размеров и, что очень важно, одинаковой толщины (в соответствии с рисунком 2.14). 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.

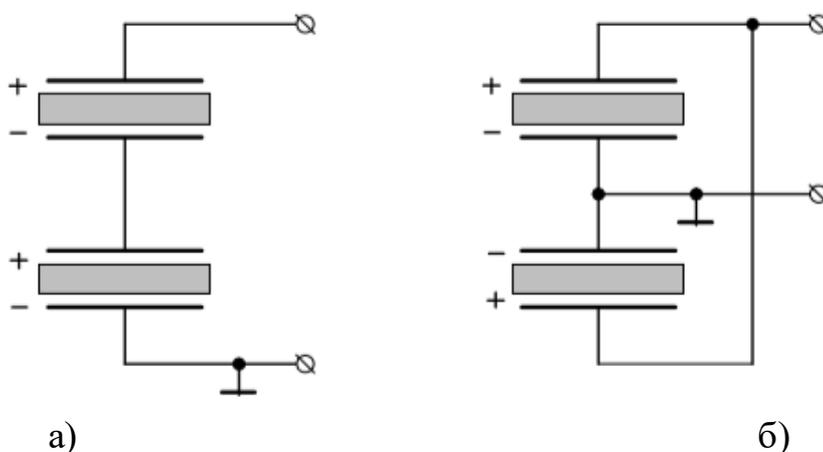


Рисунок 2.13 – Схемы соединения пьезоэлементов в симметричном биморфном преобразователе (а – последовательная; б – параллельная)

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

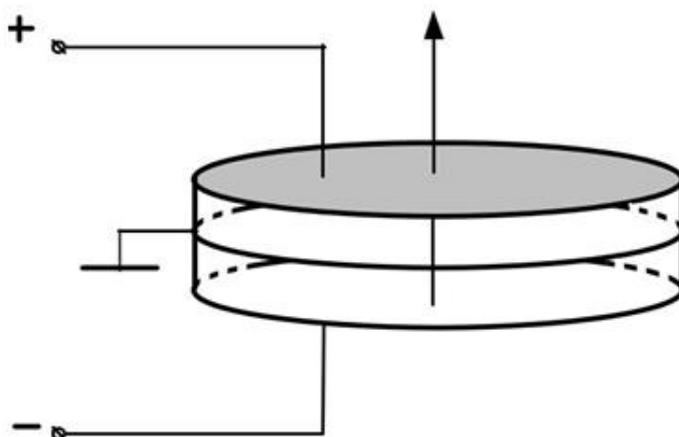


Рисунок 2.14 – Биморфная пластина

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

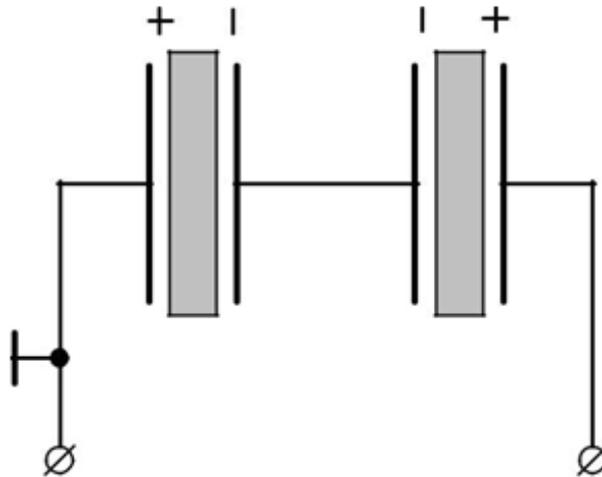


Рисунок 2.15 – Электрическая схема симметричного преобразователя

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 компания *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 2.16) представляет собой две склеенные между собой пьезоэлектрические пластины, напряжение управления на которые подается таким образом, чтобы одна из них сокращалась, а другая расширялась.

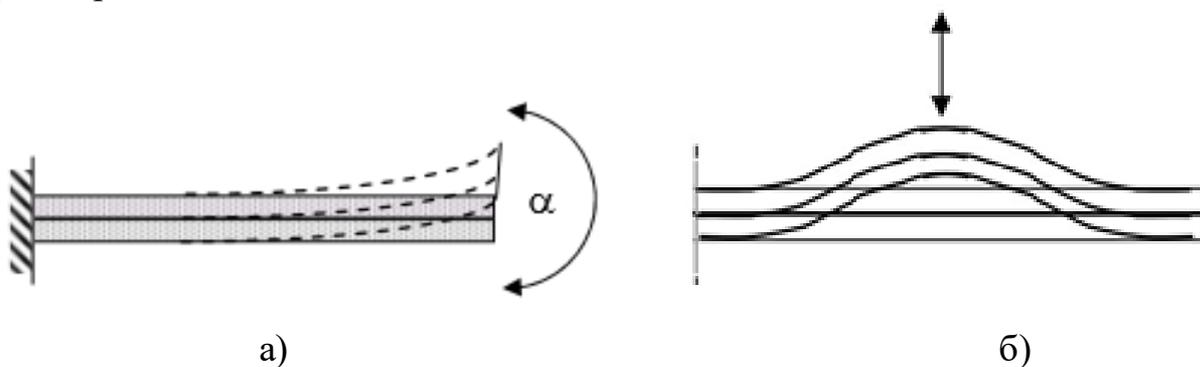


Рисунок 2.16 – Биморфные конструкции

При этом происходит изгиб всей конструкции (по аналогии с биметаллической пластиной). Если конструкция закреплена только с одной стороны рисунок 2.16 а), то свободный конец совершает угловые перемещения, а если с двух сторон рисунок 2.16 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 дефлекторами. 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)

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

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

$$K_{\pi} = K_o = \frac{3 Y_{11} d_{31} h b}{2 l_0};$$

5. Электрическая емкость

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

6. Эквивалентная приведенная масса

$$m_{\Sigma} = m_0 + 0,243 m_k;$$

7. Собственная частота (без нагрузки)

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

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)

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

3. Коэффициент упругости

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

4. Коэффициенты прямого и обратного пьезоэффектов

$$K_{\Pi} = K_o = 10,88 Y_{11} d_{31} h;$$

5. Электрическая емкость

$$C_0 = \frac{5,65 \varepsilon_{33} \varepsilon_0 R^2}{h};$$

6. Эквивалентная приведенная масса

$$m_{\Sigma} = m_0 + 0,235 m_k;$$

7. Собственная частота без нагрузки

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

## 2.4 Пьезоэлектрические двигатели. Особенности конструкций

Пьезодвигатель, в отличие 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 пьезоактюато-

ров. 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. Основным элементом пьезодвигателя всегда остается пьезоактюатор, работающий на обратном пьезоэффекте. Все остальные дополнительные конструктивные элементы выполняют вспомогательные функции. Они обеспечивают жесткость конструкции, ее износостойчивость, преобразование линейного перемещения в угловое, компенсацию теплового расширения, гистерезиса и последствий.

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 (0,1–100 Н\*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 достигать до нескольких МГц. Двигатели такого типа бывают с пьезоэлек-

трически 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 2.17).

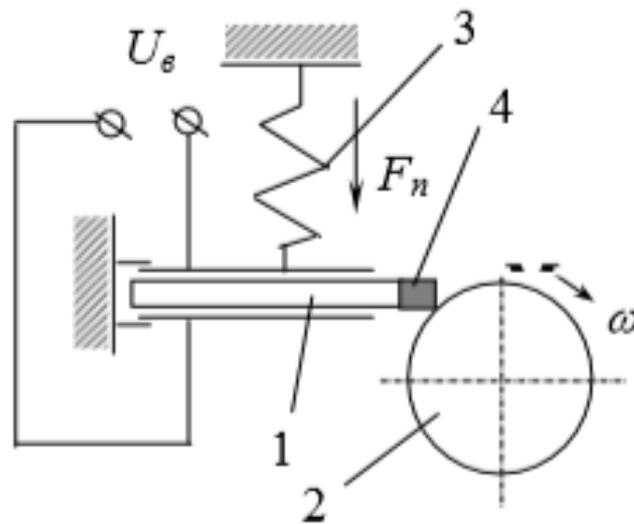


Рисунок 2.17 – Пьезодвигатель ударного действия

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  $F_n$ , 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 пьезорезонатора 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  $U_v$ .

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 2.17, является нереверсивным, однако при определенном усложнении конструкции возможно создание реверсивной конструкции двигателя. Угловая скорость ротора  $\omega_p$  может быть определена через линейную скорость ротора  $v_p$  и его диаметр  $D_p$  по формуле

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

Отсюда частота вращения в оборотах в минуту

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

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  $250^\circ\text{C}$ , 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  $\omega_p$  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 В; 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.

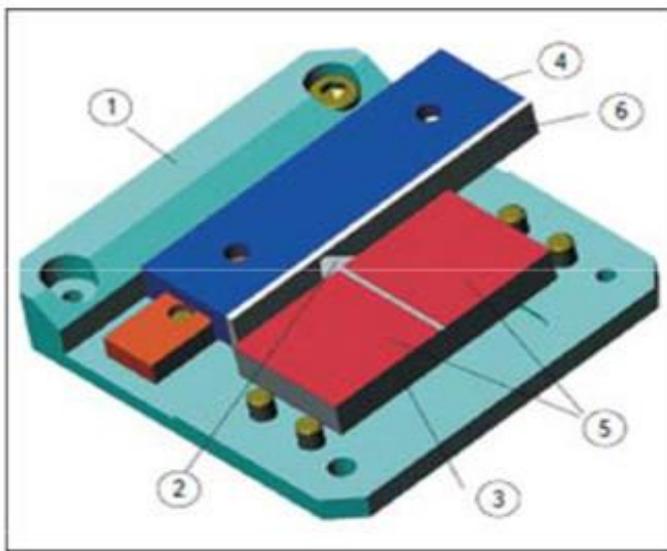


Рисунок 2.18 – Конструкция пьезопривода фирмы PI

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 рисунке 2.19. 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.

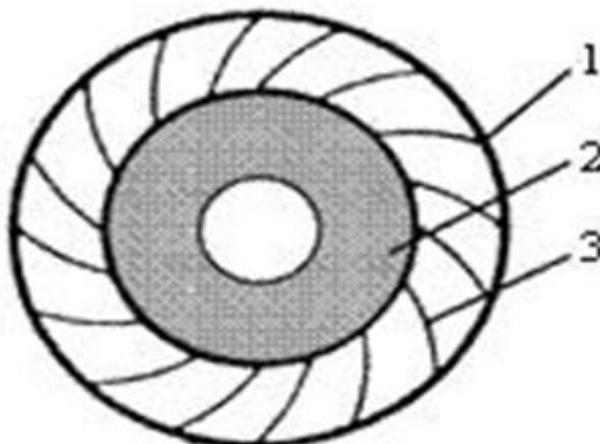


Рисунок 2.19 – Конструктивная схема двигателя второго типа с активным статором

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. 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) до систем, предназначенных для манипуляций с клетками, геной инженерии, репродуктивной биологии и медицины.

В таблице 2.10 приведены технические данные таких двигателей, выпущенных в виде опытной серии.

Таблица 2.10 – Технические данные двигателей

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



Рисунок 2.20 – Ультразвуковой пьезомотор и пьезопривод для работы при температурах от комнатной до 4 К (жидкий гелий)

## 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, создания и компенсации вибраций в широком спектральном диапазоне. 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 остановиться 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 2.21 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).

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 2.22 представлен двигатель с встроенным

индуктивным датчиком микроперемещений, который обеспечивает обратную связь по положению [7].

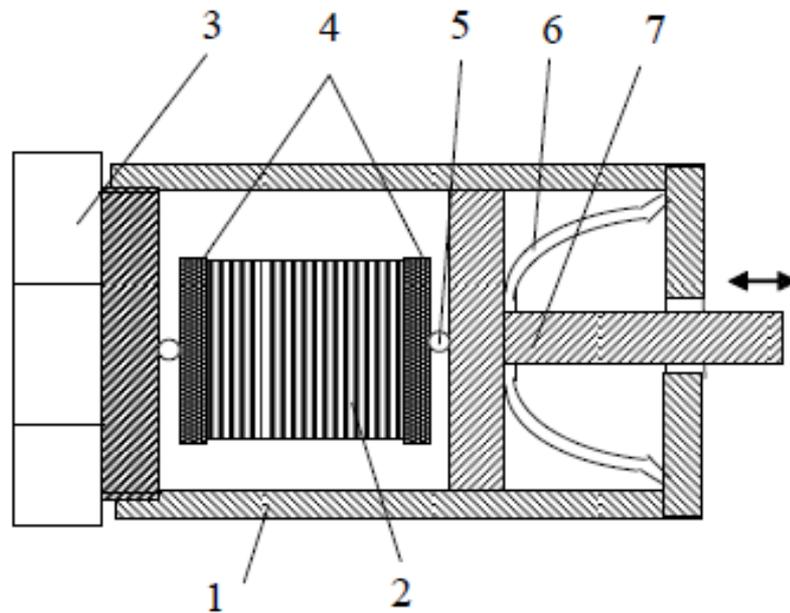


Рисунок 2.21 – Пакетный (составной) пьезодвигатель

Большой интерес представляет другой тип пакетной конструкции двигателя, в которой также, как и в первом случае применяется предварительное нагружение пьезокерамики, а рабочие деформации проявляются в направлении, перпендикулярном деформации пьезопакета, что достигается применением специальной формы корпуса. Двигатели такого типа марки *APA*<sup>®</sup> (ф. *CEDRAT TECHNOLOGIES*) состоят из многослойной пьезокерамики и внешнего металлического корпуса, выполненного в форме эллипса (см. рисунок 2.23).



Рисунок 2.22 – Двигатель с встроенным индуктивным датчиком микроперемещений

Рабочей осью является малая ось корпуса пьезоактюатора, которая сжимается при подаче напряжения на пьезокерамику.

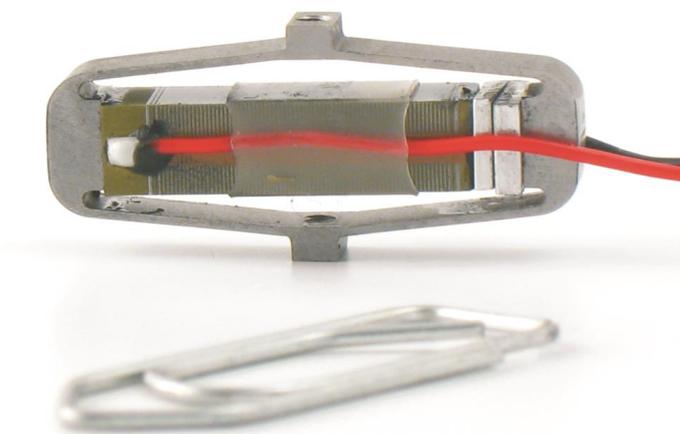


Рисунок 2.23 – Вид пьезодвигателя APA120S

Эллиптический корпус пьезоактюатора *APA*® решает несколько задач. Некоторые из них:

- обеспечение оптимальной механической преднагрузки многослойной пьезокерамики для наиболее эффективной работы в динамическом режиме;
- обеспечение увеличения хода пьезоактюатора за счет действия рычага;
- обеспечение механического интерфейса для крепления пьезокерамики и полезной нагрузки.

Недостатки эллиптического корпуса по сравнению с пьезоактюаторами прямого действия:

- уменьшение резонансной частоты;
- уменьшение блокирующей силы.

Пакетные конструкции способны выдерживать значительные внешние сдвливающие нагрузки, но их механическая прочность существенно снижена при растягивающих нагрузках, что ограничивает рабочий ход двигателя в динамическом режиме. Для обеспечения более эффективной деформации пьезокерамики на высоких частотах пьезокерамику механически нагружают внешней пружиной.

При оптимальном уровне механической предварительной нагрузки (преднагрузки) будет обеспечен расширенный динамический диапазон деформации пьезокерамики (см. рисунок 2.24). Роль внешней пружины в пьезоактюаторах *APA*® играет металлический корпус многослойного пьезоэлектрического актюатора. Кроме того, корпусу играет роль механического рычага, за счет чего пьезоактюаторы *APA*® могут обеспечивать деформации в диапазоне от 1% до 10% по рабочей оси пьезоактюатора. Другими словами, рычаг пьезоактюаторов *APA*®

обладает хорошей механической эффективностью и позволяет увеличивать смещение пьезокерамики от 2 до 20 раз. Кроме того, такой корпус будет обеспечивать механический интерфейс для установки пьезоактюатора на основании и для крепления нагрузки к пьезоактюатору.

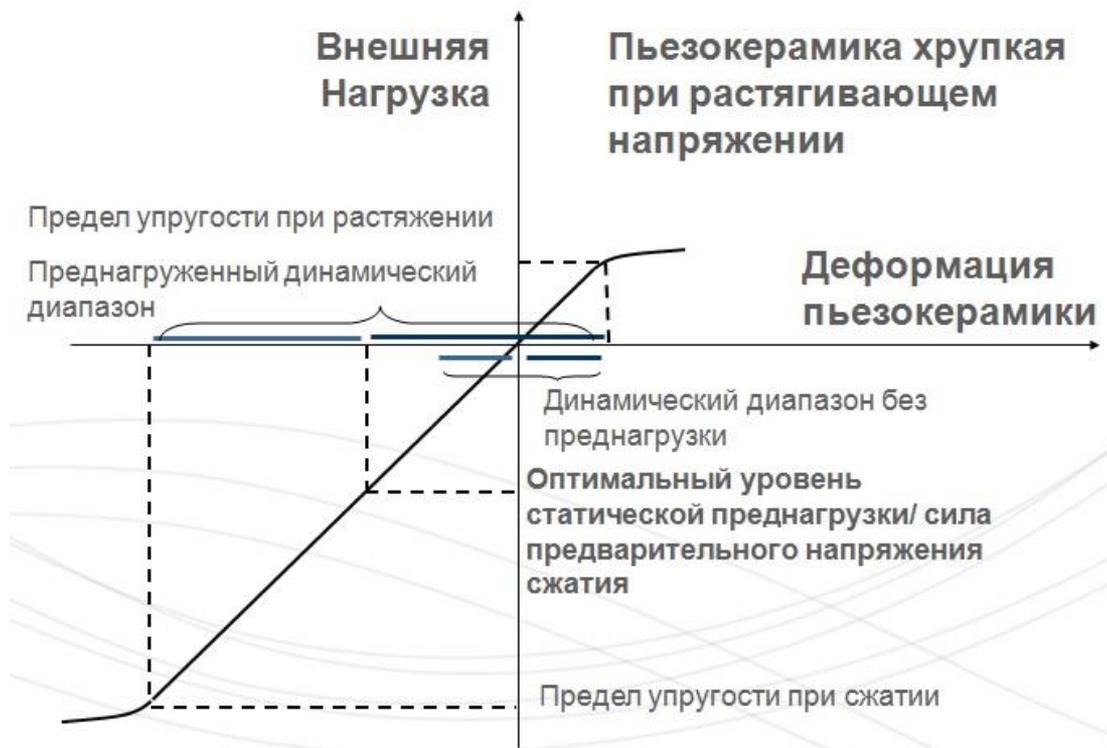


Рисунок 2.24 – Предварительное механическое напряжение пьезокерамики

Важно отметить, что требуется избегать приложения любых поперечных механических нагрузок к многослойной пьезокерамике, не оборудованной внешним корпусом. Это требование становится существенным при проектировании механизмов на основе пьезокерамики. Перпендикулярные силы и изгибающие моменты могут повредить пьезокерамику. В этом смысле становится понятным, что металлический корпус пьезоактюатора выполняет еще одну полезную функцию. Ориентировочные значения допустимых поперечных сил для пьезоактюатора *APA*<sup>®</sup> находятся на уровне 20% от блокирующей силы. Например, актюатор *APA400M* при подаче напряжения 150 В, производит свободные перемещения вдоль малой оси длиной 14,3 мм с ходом до 400 мкм и с блокирующей силой до 38 Н. Это соответствует деформации 2,8% вдоль малой (активной) оси. Также могут быть обеспечены и большие деформации с большими *APA*<sup>®</sup>. Например, *APA500L* производит свободные перемещения до 500 мкм с блокирующей силой до 570 Н, вдоль его малой оси, высота которой составляет около 50 мм.

Растягивающие силы вдоль малой оси *APA*<sup>®</sup> будут сжимать пьезокерамику. Поэтому *APA*<sup>®</sup> способен выдерживать воздействие растягивающих сил вдоль малой оси. Но требуется помнить, что сдавливающая сила вдоль малой оси будет растягивать пьезокерамику. И такая растягивающая сила может повредить

пьезокерамику или отклеить ее от корпуса пьезоактюатора. Поэтому рекомендуется не допускать воздействия вдоль малой оси *АРА*<sup>®</sup> растягивающих сил больших, чем блокирующая сила.

*АРА*<sup>®</sup> обеспечивает следующие преимущества:

- актюаторы являются малогабаритными и компактными относительно собственного хода;
- увеличение перемещения и жесткость являются функциями эксцентриситета корпуса;
- возможность согласования механического сопротивления и удовлетворительная электромеханическая связь;
- возможность работы в широком диапазоне частот, включая резонансную частоту;
- гибкость корпуса при срабатывании пьезоэлектрического актюатора обеспечивает приемлемое распределение механических напряжений в рычажном механизме;
- изгибающие и/или крутящие моменты в некоторой мере могут воздействовать на корпус, что сберегает пьезокерамику от излома. С этой точки зрения, *АРА*<sup>®</sup> считаются более надежными, по сравнению с пьезоактюаторами прямого действия;
- стоимость *АРА*<sup>®</sup> значительно ниже, чем стоимость составных пьезоэлектрических актюаторов прямого действия, обеспечивающих такую же величину хода; это связано с тем, что рычажный механический усилитель перемещения дешевле, чем активные материалы.

**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 2.25) [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).

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.

На таком принципе построен корректор пьезоэлектрический КП-1 (см. рисунок 2.25) [12], в котором кроме биморфа используются два металлических диска (пьезоэлементы наклеены на один из них с двух сторон), обеспечивающие 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 существенного увеличения величины управляющего напряжения и габаритов двигателя.

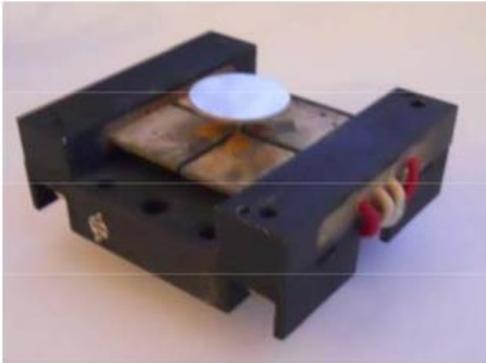


Рисунок 2.25 – Биморфный пьезоэлектрический дефлектор

Такая конструкция может быть построена как на элементах пакетного типа, так и на биморфных элементах. На рисунке 2.26 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.

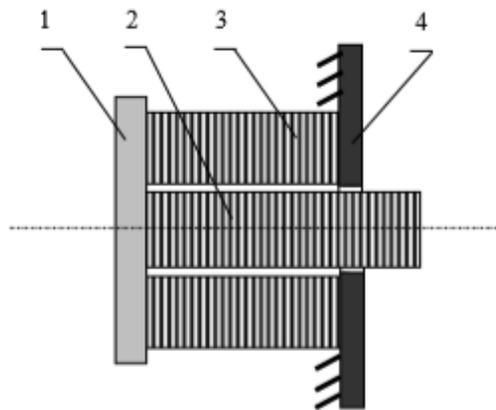


Рисунок 2.26 – Дифференциальная конструкция пьезодвигателя

Рабочее перемещение относительно неподвижного основания будет результатом суммирования величин их деформаций. Тепловые деформации будут вычитаться. При точном расчете габаритов пьезоэлементов 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 2.27 а), так и пакетным (рисунок 2.27 б). Для обеспечения шагового режима в конструкции, как правило, имеются фиксирующие устройства, различного принципа действия от электромагнитных до электрореологических (изменение вязкости вещества под действием электрического поля). Биморфная конструкция (рисунок 2.27 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.

Такой цикл повторяется, и объект линейно перемещается. Шаговый двигатель (рисунок 2.27 б) имеет два фиксирующих элемента 1 и 3, например, электромагнитного типа и рабочий пьезопакет 2. Элементы 2 фиксируют положение рабочего пакета относительно горизонтальной поверхности.

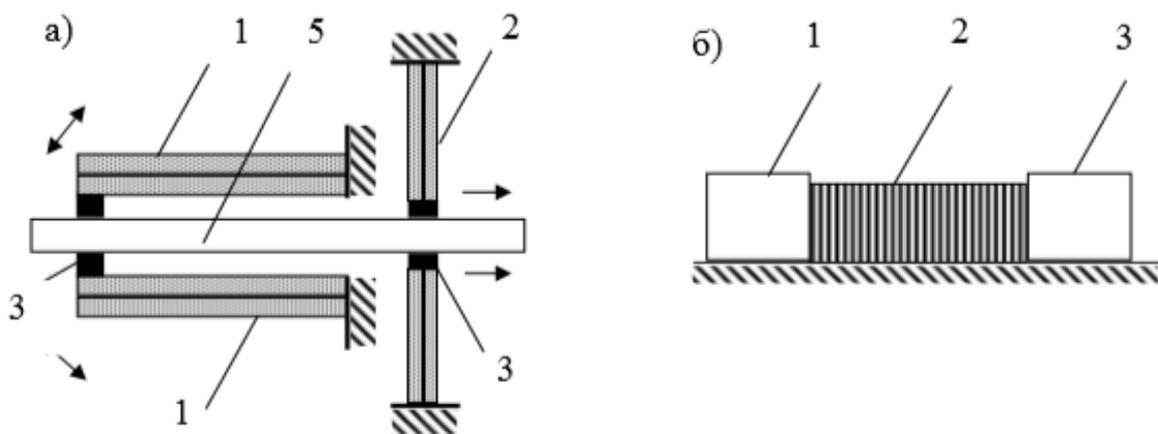


Рисунок 2.27 – Шаговые двигатели (а) – с биморфным активным элементом, б) – с активным элементом пакетного типа)

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 перемещения 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  $S_0$ , закрепленный одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер  $l_0$  которого изменяется под действием электрического поля  $E$  в направлении действия поля на значение  $l$ , и перемещающий объект управления массой  $m_0$ , 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  $m_\Sigma$ , которая будет равна сумме массы  $m_0$  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 А.А. Никольского [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).

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

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

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

Теперь запишем это уравнение с учетом принятых обозначений

$$S = \frac{\Delta l}{l}, s^E = \frac{1}{Y},$$

где  $Y$  – модуль Юнга (вдоль выбранной координаты3).

Умножив все члены уравнения обратного пьезоэффекта на  $YS_0$ , получим

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

Левая часть выражения описывает усилие упругой деформации

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

Первое слагаемое правой части определяет усилие, вызванное приложенным электрическим полем

$$F_э = d_n YS_0 E. \quad (3.5)$$

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

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

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

Воспользуемся выражением для тока смещения в диэлектрике

$$I_{\text{см}} = \frac{C_0 dU}{dt} + K_{\text{п}} V, \quad (3.7)$$

где  $C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 (1 - K_{\text{эм}}^2) N S_0}{l_3}$  – емкость актюатора;  $K_{\text{п}} = K_y d_{\text{п}}$  – коэффициент прямого пьезоэффекта;  $U = E l_3$  – напряжение, приложенное к электродам актюатора;  $V = \frac{d \Delta l}{dt}$  – скорость смещения ОУ.

Далее необходимо определить связь между усилием  $F_3$  и электрическим напряжением управления

$$F_3 = \frac{N Y S_0 d_n U}{l_3} = N^2 K_0 U, \quad (3.8)$$

где  $K_0$  – коэффициент обратного пьезоэффекта.

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

$$\frac{(e_n - U)}{R_B} = I_{\text{см}}. \quad (3.9)$$

Подставим в уравнение (11), получим после некоторых преобразований

$$e_n = C_0 R_B \frac{dU}{dt} + U + K_{\text{п}} R_B V, \quad (3.10)$$

где  $C_0 R_B = T_3$  – электростатическая постоянная времени.

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

$$(T_3 p + 1)U(p) + K_{\text{п}} R_B V(p) = e_n(p), \quad (3.11)$$

$$F_3(p) = K_0 U(p), \quad (3.12)$$

$$F_{\text{дин}}(p) = F_3(p) + F_c(p) - F_{\partial}(p) - F_y(p), \quad (3.13)$$

где  $V(p)=p\Delta l(p)$ ;  $F_d(p)=K_d p\Delta l(p)$ ;  $F_y(p)=K_y\Delta l(p)$ .

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

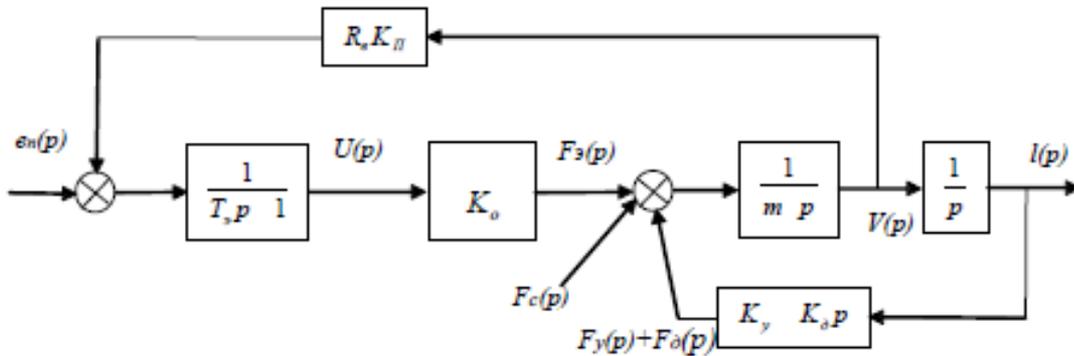


Рисунок 3.1 – Структурная схема модели тонкопленочного многослойного актюатора как объекта с сосредоточенными параметрами при управлении от источника э.д.с.

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

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} = \frac{K_0/K_y}{T_э \frac{m_\Sigma}{K_y} p^3 + \left(\frac{m_\Sigma}{K_y} + T_э \frac{K_d}{K_y}\right) p^2 + \left(T_э + \frac{K_d}{K_y} + K_\Pi R_B \frac{K_0}{K_y}\right) p + 1}. \quad (3.14)$$

Различными аппаратными средствами можно добиться минимального влияния прямого пьезоэффекта ( $K_\Pi$ ) 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

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} \approx \frac{K_0/K_y}{\frac{m_\Sigma}{K_y} p^2 + 1}. \quad (3.15)$$

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

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} = \frac{K_0/K_y}{\frac{m_\Sigma}{K_y} p^2 + \frac{K_d}{K_y} p + 1} = \frac{K_0/K_y}{T_M^2 p^2 + 2\xi T_M p + 1}, \quad (3.15)$$

где  $T_M$  – механическая постоянная времени актюатора;  $\xi = \frac{1}{2Q_M}$  – 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 удастся, тогда вполне приемлема передаточная функция вида

$$W_A(p) = \frac{\Delta l(p)}{e_n(p)} = \frac{K_0/K_y}{(T_\Sigma p + 1)(T_M^2 p^2 + 2\xi T_M p + 1)}. \quad (3.17)$$

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

$$m_\Sigma, K_y, K_0, C_0, R_b, \xi.$$

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

### 3.2 Гистерезис, последствие и ползучесть пьезоэлектрических исполнительных устройств

Итак, 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, определяемый экспериментально. Другим проявлением указанных потерь являются эффекты последствия (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 пьезокерамики 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  $\sigma$ , 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 пьезокерамики, 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 определить по формуле (2.1).

Другим проявлением потерь в материале является ползучесть или последействие, в зарубежной терминологии – *creep*. При воздействии на пьезоэлемент (пьезоактуатор) электрического поля, он деформируется и при этом у него, как и у многих других твердых тел, наблюдается релаксация, характеризуемая временем перехода в равновесное состояние.

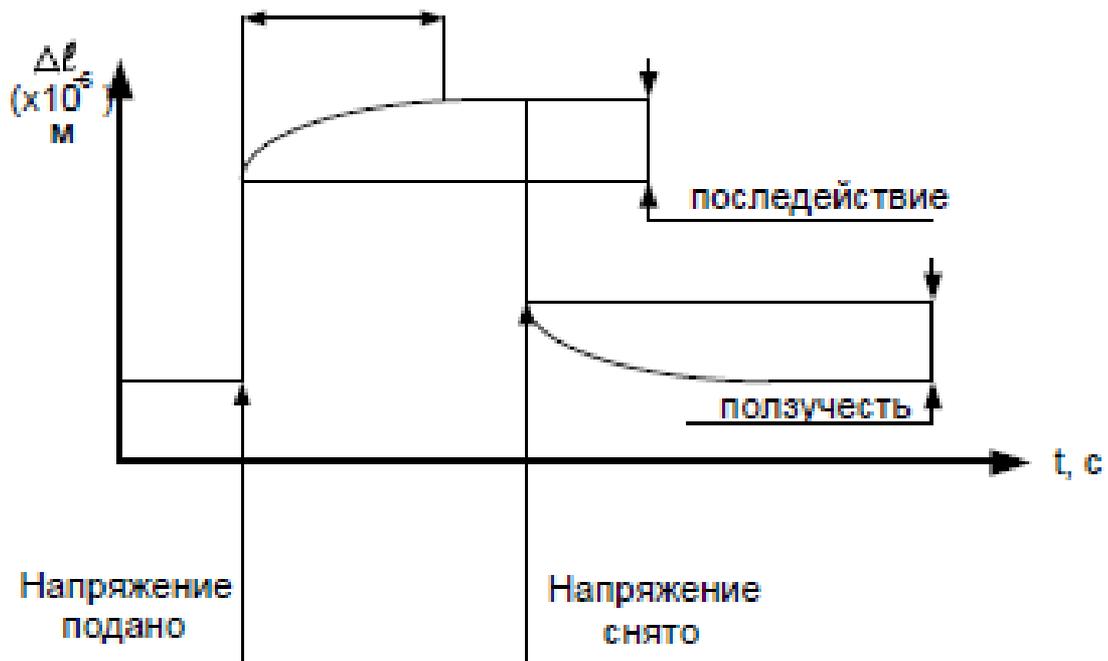


Рисунок 3.2 – Механическая релаксация пьезокерамики

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 последствием (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 отличие от ползучести, последствие представляет собой деформацию пьезоматериала после снятия электрического напряжения и имеет практически такие же численные значения характеристик. Временные зависимости деформаций последствия и ползучести представляются экспоненциальными функциями (см. рисунок 3.2).

### **3.3 Учет влияния гистерезиса и последствия (ползучести) при проектировании и моделировании пьезоэлектрических исполнительных устройств**

Последствие (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 последствия рекомендуется учитывать с помощью апериодических звеньев первого порядка.

Если имеют место быстропротекающие (по сравнению с последствием) периодические процессы, представляется возможным пренебрегать влиянием последствия, 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 пьезоактуаторе, 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

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

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

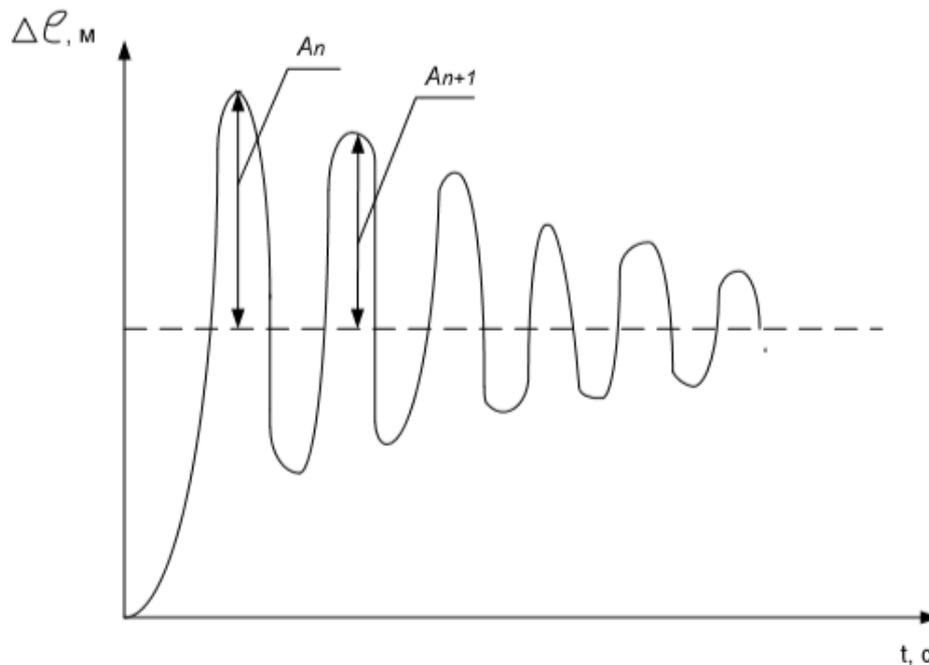


Рисунок 3.3 – Переходная характеристика пьезоэлектрического исполнительного устройства

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

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

где  $\gamma$  – 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.

$$\gamma = \frac{h_{\text{max}}}{\Delta l_{\text{max}}} \times 100\%. \quad (3.20)$$

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.

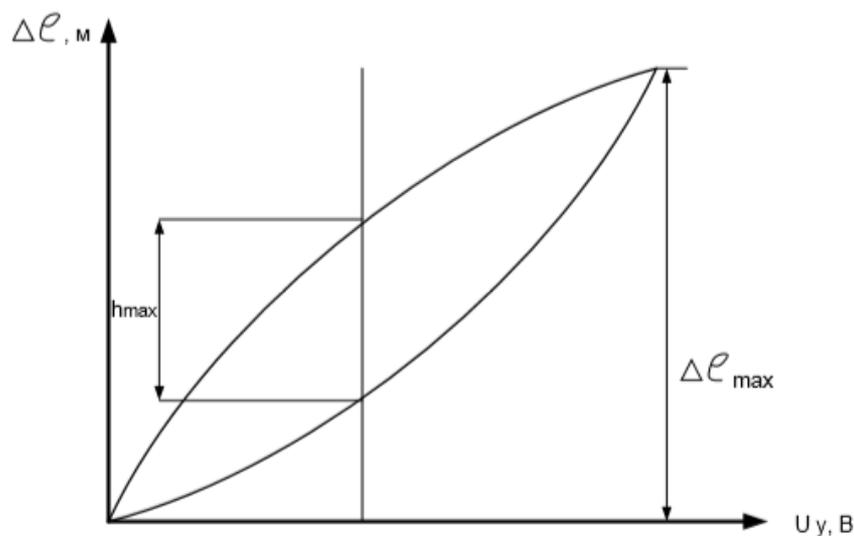


Рисунок 3.4 – Статическая характеристика пьезоэлектрического исполнительного устройства

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

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

где  $\tau$  – время запаздывания.

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

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

А это значит, что при моделировании гистерезиса величину  $\tau$  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

$$x(t) = -x(t) + u(t) + \arctan 2x(t). \quad (3.23)$$

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

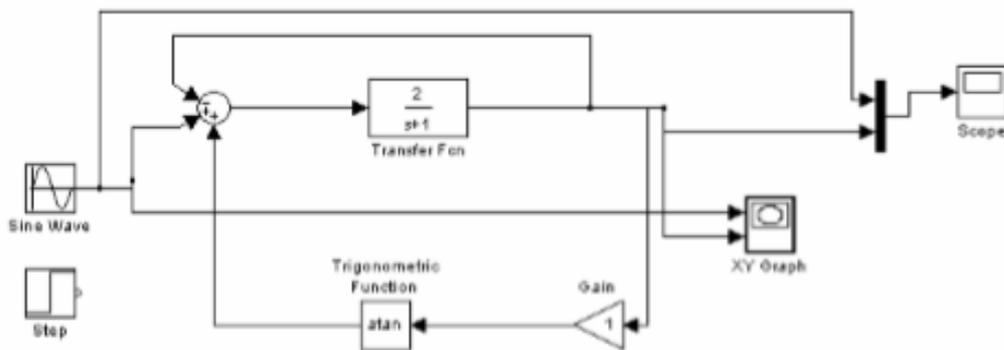


Рисунок 3.5 – Арктангенсная модель гистерезиса в *Simulink*

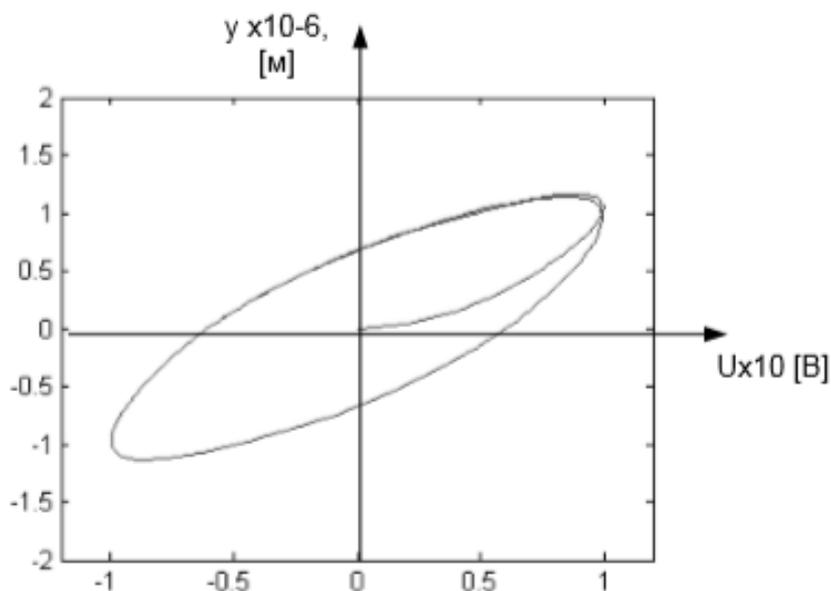


Рисунок 3.6 – Петля гистерезиса при синусоидальном входном сигнале

Реакция на гармоническое воздействие 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.

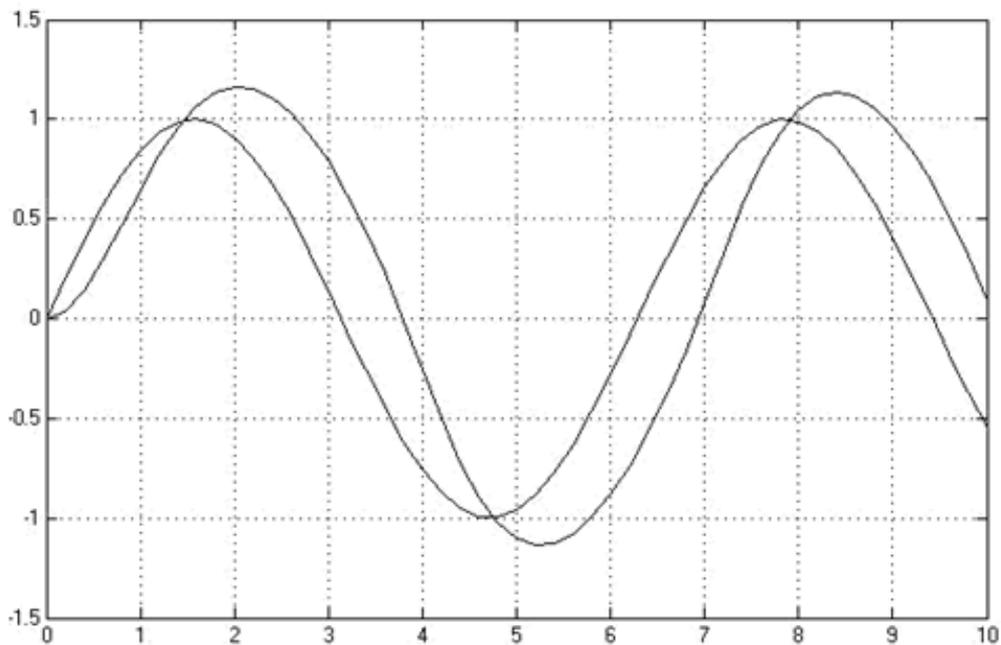


Рисунок 3.7 – Реакция на гармоническое воздействие

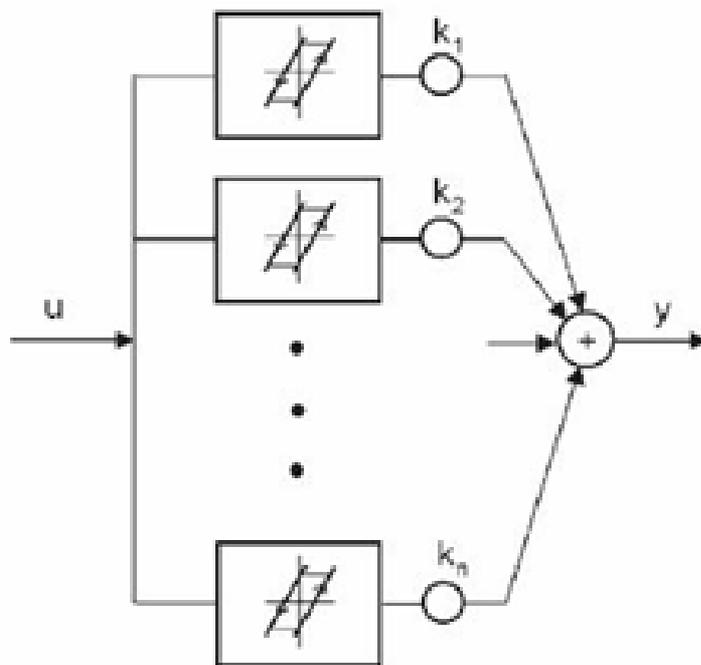


Рисунок 3.8 – Модель Прейсаха

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.

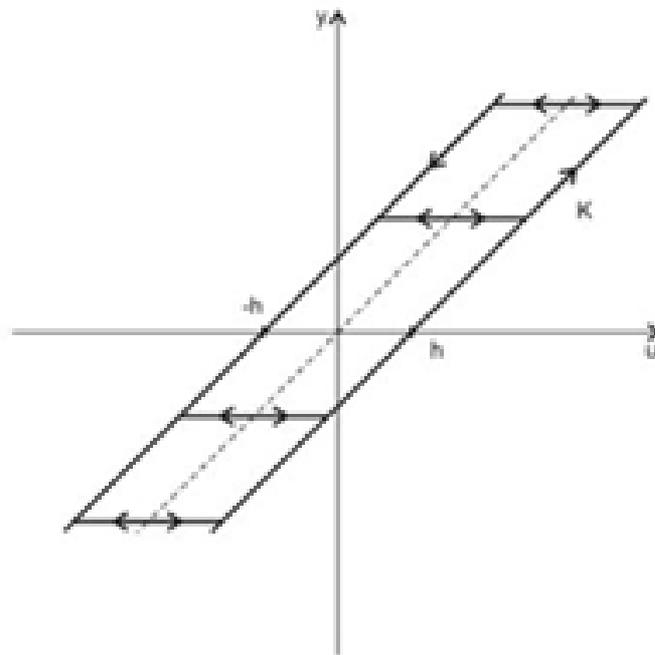


Рисунок 3.9 – Люфт – основной блок модели Прандтла-Ильшинского

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  $u_- = \frac{y(k-1)}{K} - h$  и  $u_+ = \frac{y(k-1)}{K} + h$  [6];  $u(k)$  – входное значение к 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. 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.

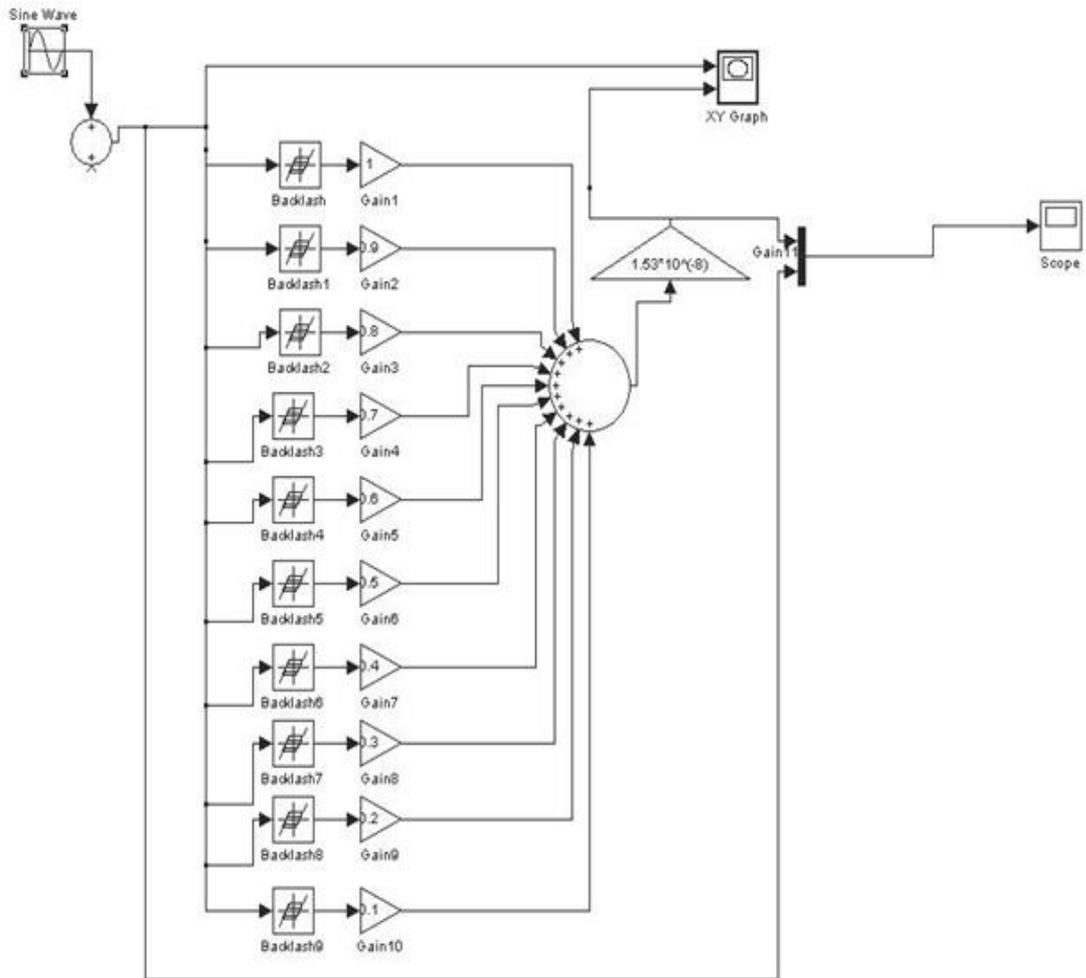


Рисунок 3.10 – Простейшая сумма люфтов.  
Петля гистерезиса примет форму, представленную на рисунке 3.11.

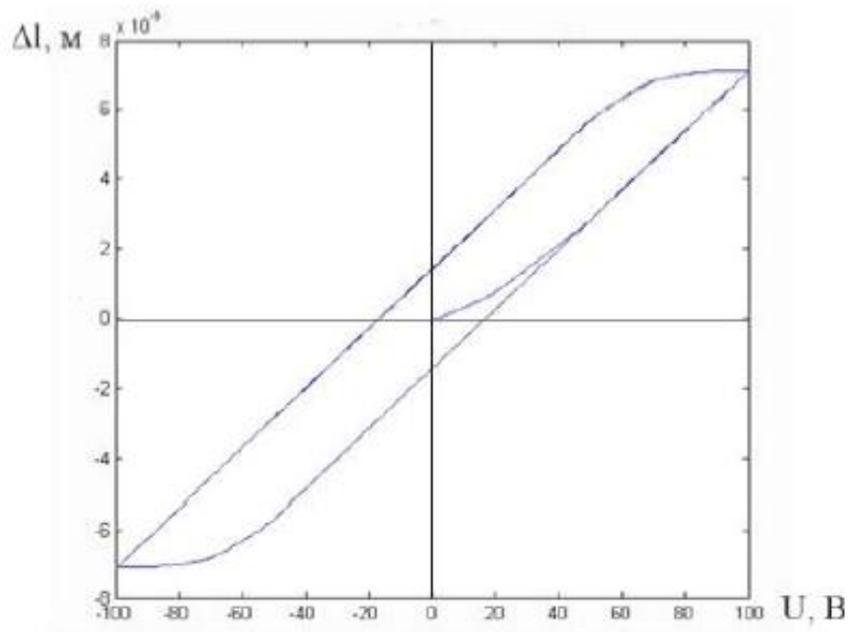


Рисунок 3.11 – Петля гистерезиса при амплитуде синусоидального входного сигнала равной 100 В и перемещении 7 мкм

## 4 Цифровой пьезоэлектрический привод

### 4.1 Пьезоэлектрический привод с регулированием по положению

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 сегодня 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, приводящих к существенному удорожанию изделия.

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 серийно выпускаемые микроконтроллеры, специализированные или универсальные цифровые вычислительные машины. Применение

цифровых систем позволяет устранить основные недостатки аналоговых систем управления. Кроме того, присущие им такие неоспоримые преимущества как:

- наличие серийно выпускаемой недорогой аппаратуры;
- высокое быстродействие;
- программная реализации алгоритмов, легкость настройки;
- стабильность работы, отсутствие дрейфа параметров;
- возможность реализации сложных законов управления;
- гибкость архитектуры системы, возможность изменения алгоритмов управления в ходе эксплуатации;
- относительная дешевизна разработки,

объясняют широкое внедрение цифровой 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.

В настоящее время широкое распространение получили микроконтроллерные системы управления (МКСУ) 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 МКСУ с компенсацией внешних возмущающих воздействий и нелинейностей, присущих устройствам данного типа. Большая номенклатуры микроконтроллеров, от простейших *PIC* – контроллеров до сравнительно сложных однокристалльных 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 удастся 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 микроконтроллерными 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].

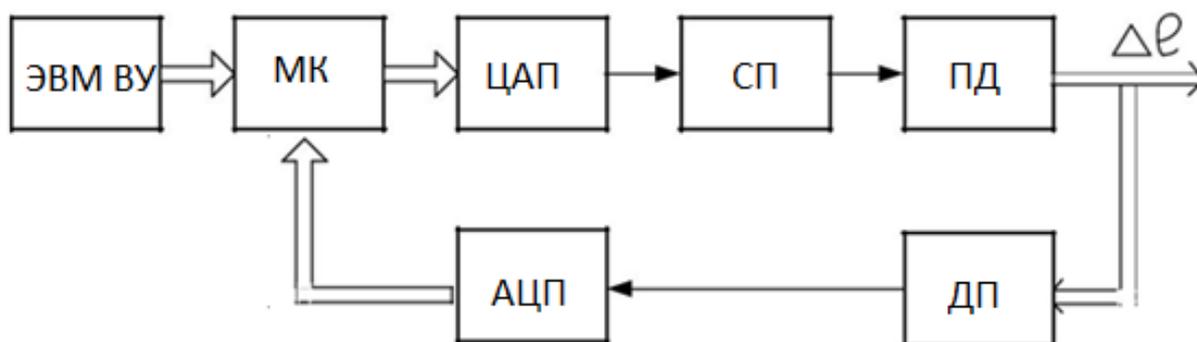


Рисунок 4.1 – Обобщенная функциональная схема цифрового пьезоэлектрического привода

В ней можно выделить две части: цифровую и аналоговую. В цифровую входят микроконтроллер (МК), устройства связи с микроконтроллером: аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи (АЦП и ЦАП), силовой преобразователь (СП) управления пьезодвигателем, непосредственно исполнительный пьезодвигатель (ПД), датчик перемещения (ДП) и задающую ЭВМ верхнего уровня управления (ЭВМ ВУ).

АЦП и ЦАП – осуществляют аналого-цифровое преобразование и дискретизацию по времени с периодом  $T$ , они могут представлять самостоятельные устройства или быть встроенными, как в случае с использованием микроконтроллеров *ADuC831* и *ADuC841*, что значительно повышает помехозащищенность и надежность работы всего устройства. Выбор периода квантования времени  $T$  в системе зависит от требований к динамическим свойствам привода в целом и быстродействия цифровой части в частности. Обычно в электромеханических системах период  $T$  составляет от десятых долей до единиц миллисекунд (0,1–5 мс), что предъявляет достаточно высокие требования к производительности микроконтроллера.

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

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

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

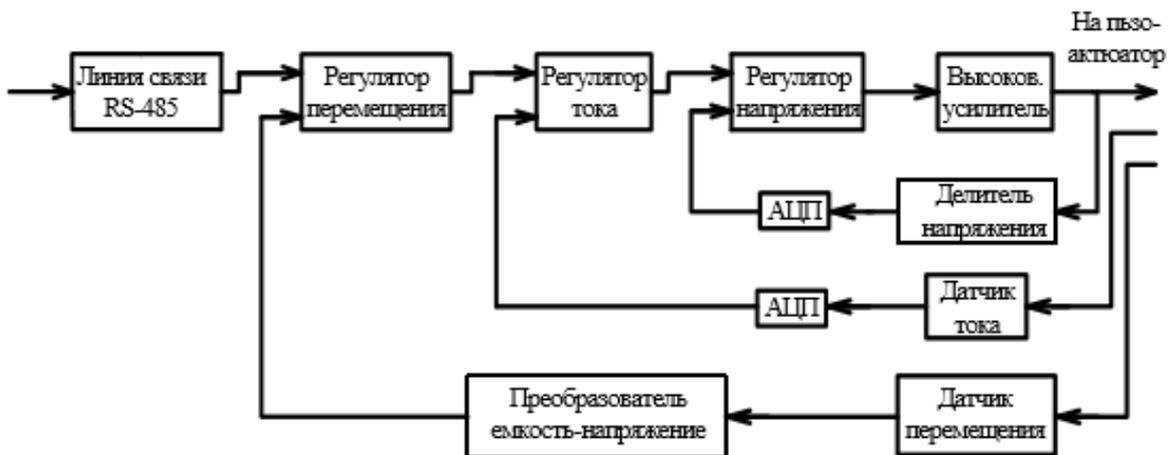


Рисунок 4.2 – Функциональная схема пьезопривода

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 пьезоактуатор. Этот контур также является быстродействующим, частота квантования информации в нем составляет 5 кГц, однако контур тока является дополнительным к контуру управления напряжением. Основная задача контура тока – повысить быстродействие привода.

Точностные показатели привода определяются контуром регулирования перемещения. Этот контур является относительно медленным. В контуре осуществляется сравнение величин текущего перемещения объекта с заданным. Регуляторы перемещения, тока и напряжения реализованы в виде программы работы микроконтроллера, учитывая это и конкретизируя другие устройства привода можно представить функциональную схему системы, 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 пьезоактуатором осуществляется через высоковольтный усилитель с напряжением питания до 150 В постоянного тока. Величина напряжения, подаваемого на пьезоактуатор, контролируется датчиком напряжения.

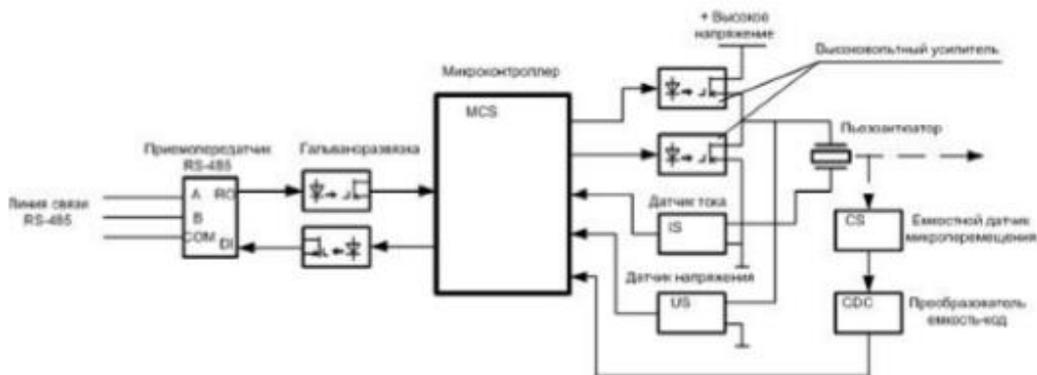


Рисунок 4.3 – Функциональная схема пьезопривода на основе пьезоактюатора из многослойной тонкопленочной керамики

За счет этого в приводе добавлен режим подкачки заряда, повышающий КПД работы усилителя. Величина микроперемещения контролируется специальным емкостным датчиком, встроенным в конструктив пьезопривода. 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 скачок составляет 10 мс. Гистерезис пьезоактюатора полностью скомпенсирован, а погрешность работы привода определяется погрешностью работы датчика перемещения.

## 4.3 Особенности широтно-импульсного управления пьезоактюатором

### 4.3.1 Импульсное управление пьезоактюатором

С целью повышения к.п.д. и существенного уменьшения габаритов силовых преобразователей для управления пьезоприводом возможно использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этом случае выходные высоковольтные транзисторы силового преобразователя работают в ключевом режиме и выходное напряжение преобразователя зависит от времени нахождения транзисторов в открытом (включенном) состоянии. Такое импульсное управление пьезоактюаторами весьма перспективно, но имеет специфические особенности [12–13].

Упрощённо высоковольтная часть силового преобразователя с ШИМ-управлением изображена на рисунке 4.4. Ключи  $SW1$  и  $SW2$  (в роли которых используются выходные силовые транзисторы) замыкаются поочередно с определённой частотой и длительностью (скважностью), подавая тем самым на пьезодвигатель напряжения 100 или 0 В соответственно (конкретные значения напряжений указаны для примера).

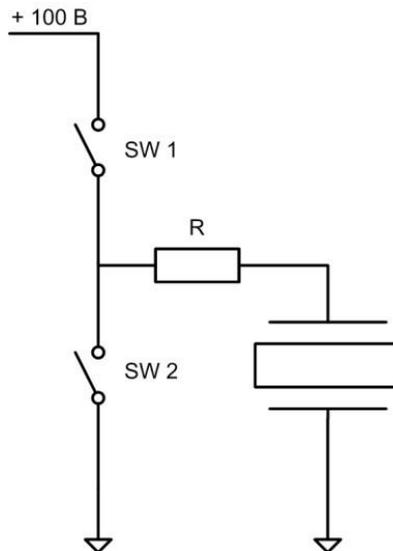


Рисунок 4.4 – Упрощенная схема импульсного управления пьезоприводом ( $R$  – суммарное собственное сопротивление силовых ключей, источника питания и добавочное сопротивление в цепи пьезопривода)

При использовании ШИМ создаваемое пьезоактюатором перемещение имеет пульсирующий характер из-за низкой инерционности пьезоматериалов и наличия упругих свойств элементов конструкции (колебательного звена в модели пьезоактюатора). Пример пульсаций перемещения показан на рисунке 4.5, их форма и амплитуда меняются в зависимости от частоты ШИМ и значения скважности. При повышении частоты амплитуда снижается и, следовательно, повышается стабильность позиционирования. Однако технически не всегда удаётся использовать достаточно высокие частоты коммутации транзисторов, поэтому приходится идти на компромисс между величиной частоты и стабильностью позиционирования.

Другой особенностью ШИМ-управления является возникновение специфической нелинейности при линейной модели пьезоактюатора. Эту особенность также следует учитывать при выборе частоты модуляции.

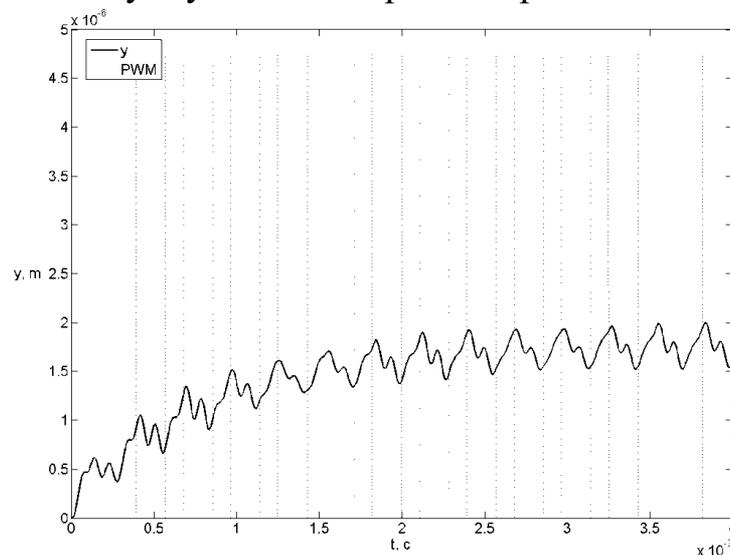


Рисунок 4.5 – Переходной процесс в пьезоприводе с ШИМ- управлением (график импульсов ШИМ представлен не в масштабе по оси ординат)

### 4.3.2 Моделирование пьезопривода с ШИМ-управлением

Приведенная в разделе 3.1. линейная математическая модель пьезоактюатора может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}, \quad (4.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_y}{m} & -\frac{K_d}{m} & \frac{K_o}{m} \\ 0 & -\frac{K_p}{C_0} & -\frac{1}{R_0 C_0} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_0 C_0} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0];$$

где  $x$  – вектор состояний;  $u$  – вход системы;  $y$  – выход системы (микродвижение);  $K_y$  и  $K_d$  – коэффициенты упругости и демпфирования пьезоактюатора;  $K_o$  и  $K_p$  – коэффициенты обратного и прямого пьезоэффектов;  $m$  – суммарная масса актюатора и приложенной нагрузки;  $C_0$  – собственная электрическая ёмкость актюатора;  $R_0$  – сопротивление электрической цепи.

Соответствующая математической модели (4.1) схема моделирования работы пьезоактюатора с ШИМ-управлением средствами пакета *Simulink* изображена на рисунке 4.6. Для формирования широтно-импульсного сигнала управления использован компаратор, сравнивающий входной управляющий сигнал с сигналом пилообразной формы. Формирование высоковольтного сигнала осуществляется управляемым переключателем.

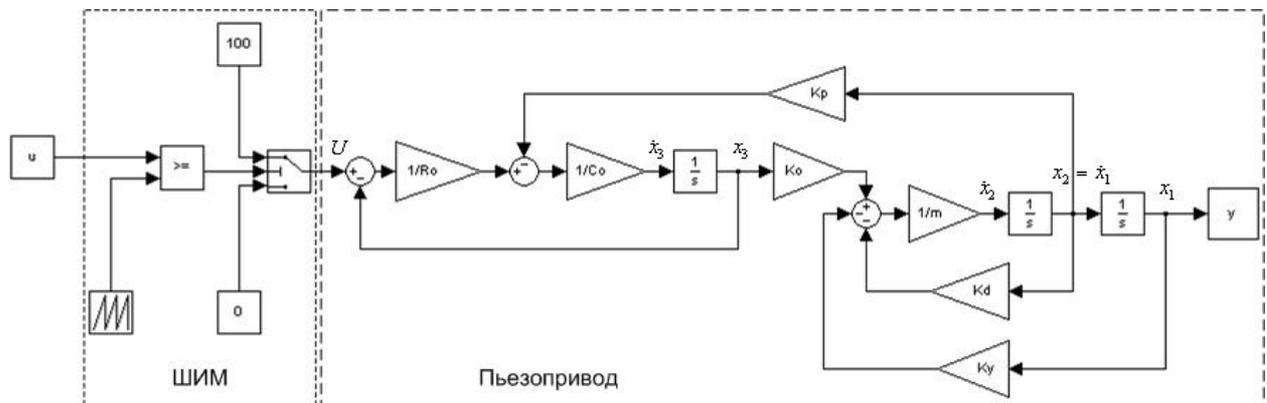


Рисунок 4.6 – Схема моделирования пьезоактюатора с ШИМ-управлением в пакете *Simulink*

Для анализа вносимых модуляцией нелинейностей на статическую характеристику пьезопривода рассмотрим решение уравнения (4.1).

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A\tau} B u(\tau) d\tau.$$

Так как период широтно-импульсного сигнала постоянен, нетрудно переписать решение уравнения в рекуррентной форме

$$\begin{aligned} x(n+1) &= e^{AT} x(n) + \int_0^T e^{A\tau} B \cdot u(\tau) d\tau = e^{AT} x(n) + \int_0^{\gamma T} e^{A\tau} d\tau B \cdot E_{II} + \int_{\gamma T}^T e^{A\tau} d\tau B \cdot 0 = \\ &= e^{AT} x(n) + \int_0^{\gamma T} e^{A\tau} d\tau B \cdot E_{II} \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $T$  – период ШИМ;  $\gamma$  – скважность ШИМ ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ), управляемый параметр;  $E_{II}$  – напряжение питания (верхний уровень ШИМ, в рассматриваемом примере  $E_{II} = 100$  В).

Уравнение (4.2) является дискретной моделью динамики пьезоактюатора с ШИМ-управлением и периодом квантования времени, равным  $T$ .

Вычисляя входящую в уравнение (4.2) матричную экспоненту, получаем матрицу размера  $3 \times 3$ , все элементы которой имеют один общий вид и различающиеся коэффициентами  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

$$e^{AT} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix},$$

где  $e_{ij} = a_{ij} e^{-\lambda_a T} + b_{ij} e^{-\alpha T} \sin(\omega T) + c_{ij} e^{-\alpha T} \cos(\omega T)$ .

$\lambda_a$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$  – параметры, определяемые собственными числами матрицы  $A$  в

(4.1), которые равны

$$\lambda = \{-\alpha \pm j\omega, -\lambda_a\}.$$

При интегрировании матричной экспоненты в (4.2) общий вид приведенной зависимости остается неизменным, меняются только коэффициенты.

$$\int_0^{\gamma T} e_{ij} d\tau = \tilde{a}_{ij} e^{-\lambda_a \gamma T} + \tilde{b}_{ij} e^{-\alpha \gamma T} \sin(\omega \gamma T) + \tilde{c}_{ij} e^{-\alpha \gamma T} \cos(\omega \gamma T) - \tilde{a}_{ij} - \tilde{c}_{ij}$$

Таким образом, значение вектора состояния пьезоактюатора в дискретные моменты времени зависят от  $\sin(\omega \gamma T)$  и  $\cos(\omega \gamma T)$ . Эта зависимость дает следующий эффект.

Пусть частота ШИМ равна собственной частоте актюатора, т.е.

$$f = f_p \Rightarrow T = T_p$$

$$f_p = \frac{\omega}{2\pi}$$

Тогда аргумент гармонических функций в рассматриваемые дискретные моменты времени будет равен

$$\omega\gamma T = \omega\gamma T_p = 2\pi f_p \gamma T_p = 2\pi \frac{1}{T_p} \gamma T_p = 2\pi\gamma$$

При изменении  $\gamma$  от 0 до 1 этот аргумент меняет своё значение от 0 до  $2\pi$ .

Аналогично, для частоты ШИМ равной половине собственной частоты актюатора

$$f = \frac{f_p}{2} \Rightarrow T = 2T_p$$

$$\sin(\omega\gamma T) = \sin(0...4\pi)$$

$$\cos(\omega\gamma T) = \cos(0...4\pi)$$

Т.е аргумент изменяет своё значение от 0 до  $4\pi$ . И далее для всех кратных частот аргумент меняет своё значение от 0 до  $2\pi n$ .

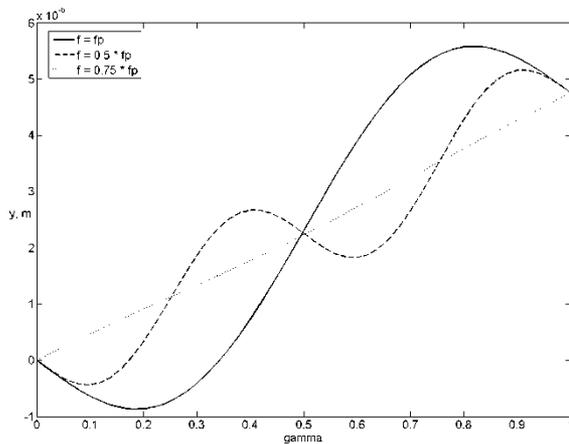
$$f = \frac{f_p}{n} \Rightarrow T = nT_p$$

$$\sin(\omega\gamma T) = \sin(0...2\pi n)$$

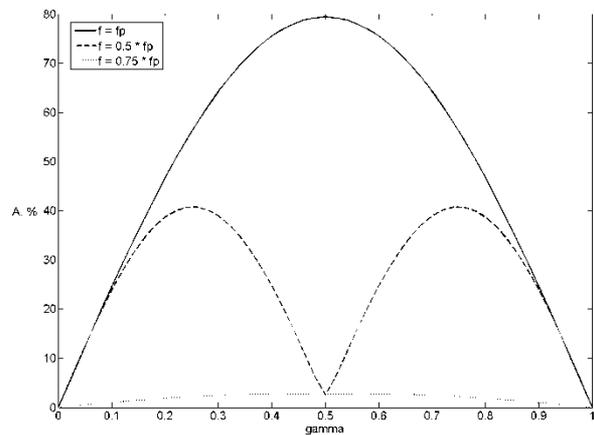
$$\cos(\omega\gamma T) = \cos(0...2\pi n)$$

$$n = 1, 2, 3...$$

Графически влияние гармонических функций на статическую характеристику дискретной модели пьезоактюатора с ШИМ-управлением показано на рисунке 4.7. На рисунке 4.7 а представлены характеристики для трёх частот: резонансной ( $f = f_p$ ), половины резонансной ( $f = 0.5 f_p$ ) и ровно между ними ( $f = 0.75 f_p$ ).



а



б

Рисунок 4.7 – Статические характеристики дискретной модели пьезопривода в зависимости от управляющего параметра  $\gamma$  ШИМ при различных частотах модуляции: а – выходное состояние системы (создаваемое перемещение); б – зависимость амплитуды пульсаций выхода устройства в процентах от максимального значения создаваемого перемещения (при  $\gamma = 1$ )

Видно, что на резонансной частоте в статической характеристике укладывается один период гармонических функций, а на половине резонансной

частоты – два периода. Между ними зависимость линейна или близка к линейной. Нелинейное влияние ШИМ сводится к минимуму.

На рисунке 4.7 б представлена зависимость амплитуды пульсаций выхода системы в установившемся режиме от значения скважности при тех же частотах, что на рисунке 4.7 а. Видно, что на частотах, кратных резонансной, амплитуда пульсаций на выходе устройства существенно возрастает, а на частоте, равной 0,75 от резонансной, влияние широтно-импульсной модуляции существенно снижается.

Для типового пьезоактюатора статическая характеристика и амплитуда пульсаций выхода в зависимости от частоты и скважности ШИМ показаны на рисунке 4.8 а и рисунке 4.7 б соответственно.

Таким образом, для минимизации нелинейного влияния ШИМ и амплитуды пульсаций на показатели качества работы устройства при выборе частоты ШИМ следует избегать частот, кратных резонансной. Если нежелательно пользоваться высокими частотами модуляции, то оптимально выбирать частоту ШИМ в промежутке между резонансной и половиной резонансной частоты. На этом интервале амплитуда пульсаций минимальна относительно более низких частот.

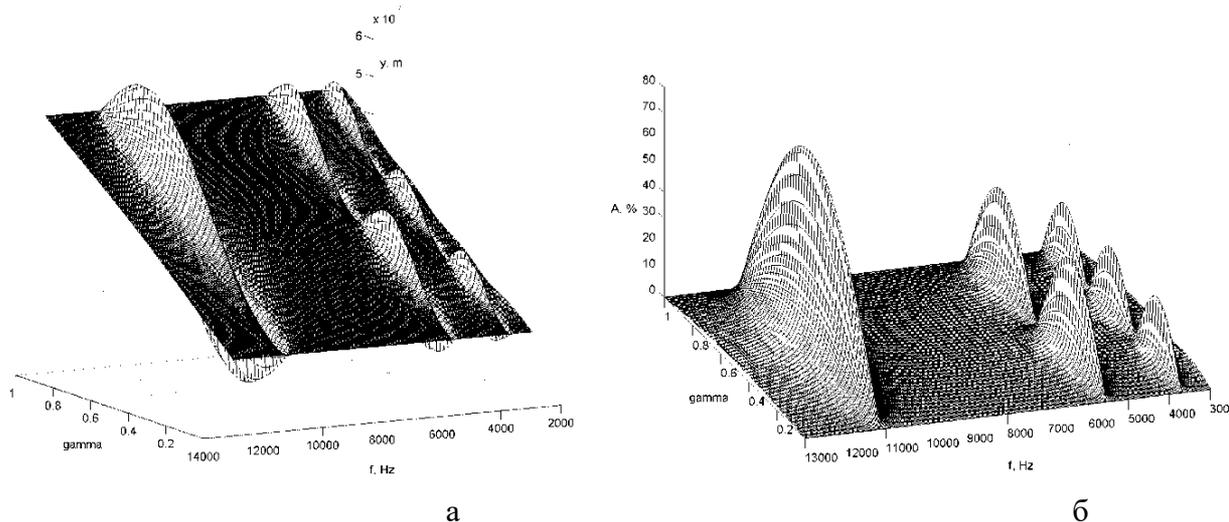


Рисунок 4.8 – Характеристики дискретной модели пьезоактюаторов в зависимости от скважности  $\gamma$  и частоты  $f$  ШИМ: а – семейство статических характеристик (создаваемое перемещение); б – зависимость амплитуды  $A$  пульсаций выхода в процентах от максимального значения создаваемого перемещения (при  $\gamma = 1$ )

Значительная ширина этого интервала даёт большую гарантию при возможных изменениях резонансной частоты работы пьезоактюатора (например при изменении приложенной массы нагрузки), по сравнению с интервалами между частотами с большей кратностью.

#### 4.4 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 4.9 и 4.10.

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

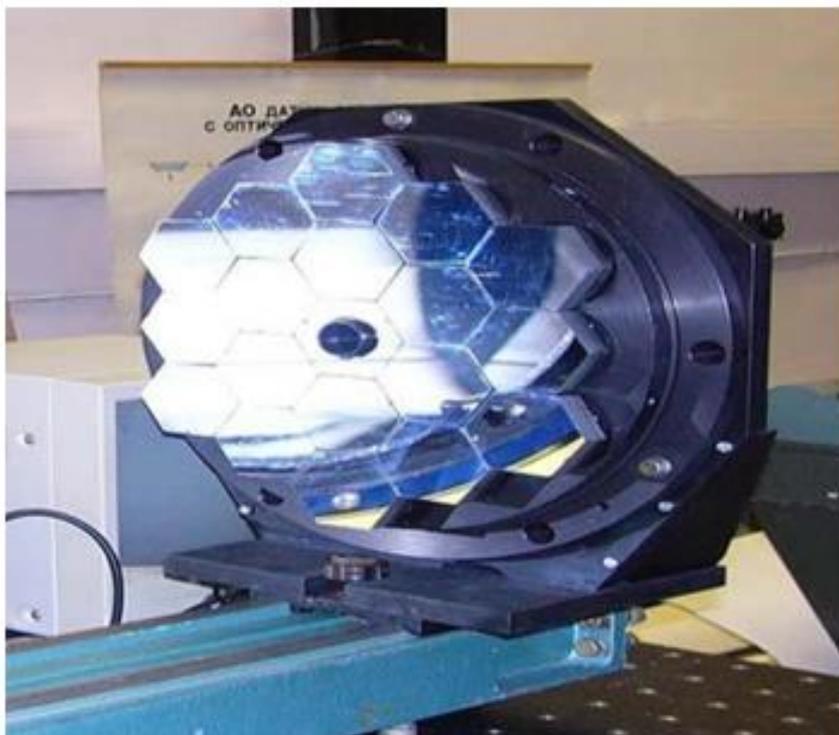


Рисунок 4.9 – Многосегментное адаптивное зеркало

Рассмотрим принципы организации управления такой системы 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 4.11. Она состоит из 6 модулей управления (один модуль на 9 приводов), собственно самих управляемых зеркальных сегментов и ЭВМ верхнего уровня.



Рисунок 4.10 – Управление многосегментным адаптивным зеркалом

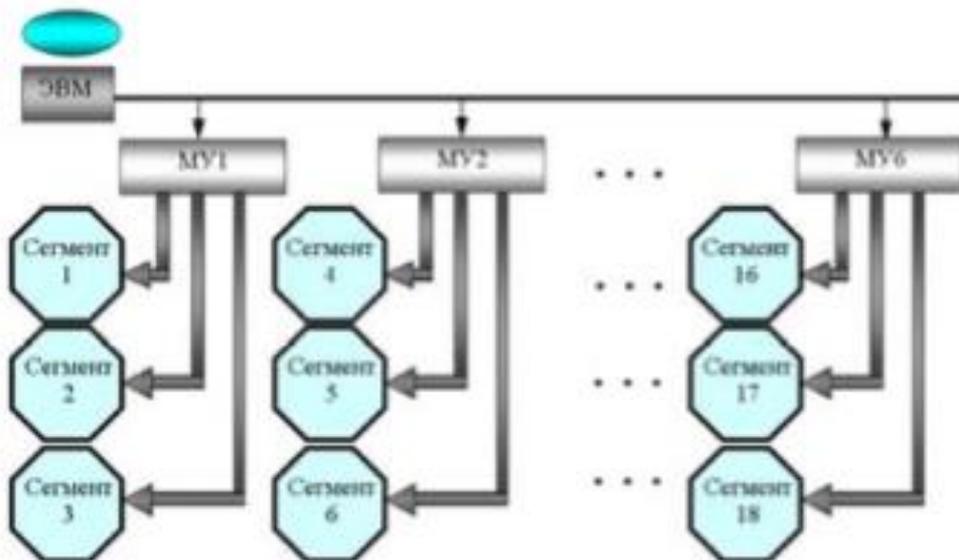


Рисунок 4.11 – Укрупненная функциональная схема системы управления адаптивным зеркалом телескопа

Каждый модуль (рисунок 4.12) управляет перемещением трех сегментов зеркала, а пространственное перемещение каждого сегмента управляется тремя исполнительными пьезодвигателями. Функциональная схема управления одним сегментом адаптивного зеркала показана на рисунке 4.13. В состав устройства управления сегментом зеркала входят: микроконтроллер (МК), три канала управления пьезодвигателями (ПД) с предварительными (ПУ) и высоковольтными усилителями (ВУ), три канала обработки сигналов датчиков положения с предварительными усилителями ПУ1–ПУ3, выпрямителями (В) и коммутатором (К) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП).



Рисунок 4.12 – Модуль управления адаптивного зеркала

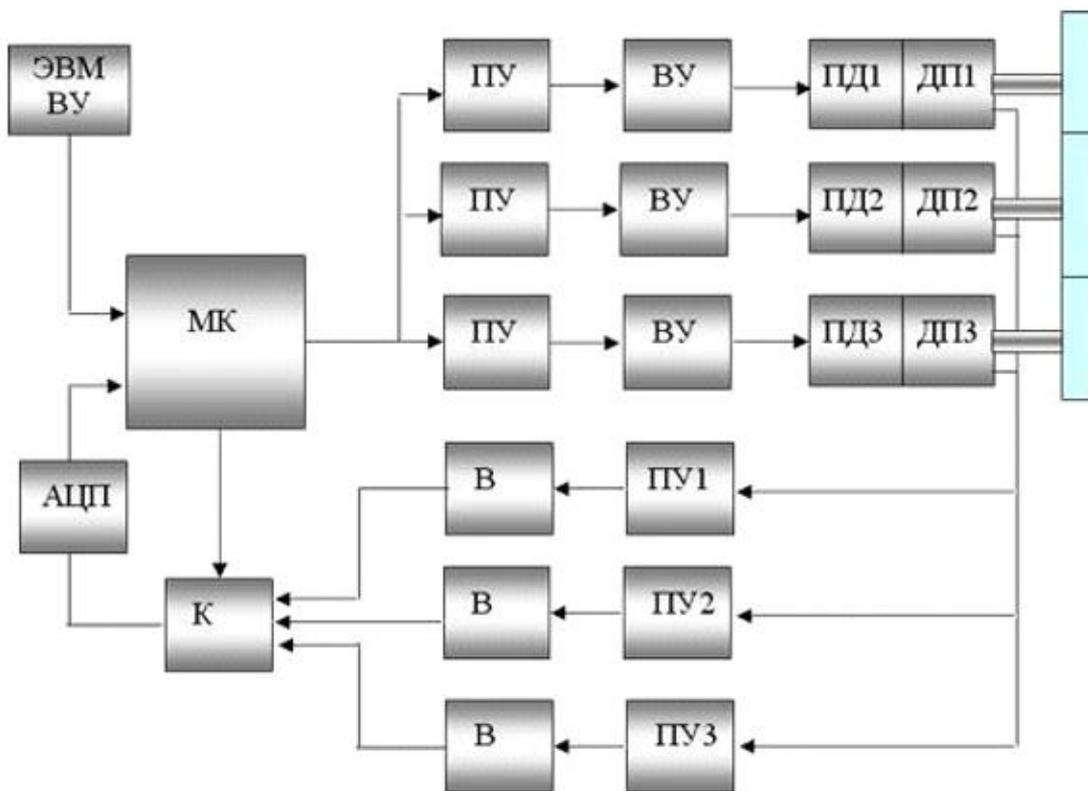


Рисунок 4.13 – Функциональная схема управления одним сегментом адаптивного зеркала

Микроконтроллер выполняет следующие функции: связь с ЭВМ верхнего уровня, выбор канала управления, прием и цифровую обработку сигналов датчиков, расчет сигналов управления пьезодвигателями в рамках замкнутой по положению цифровой системы. Усилители канала управления формируют сигнал управления требуемого уровня, а устройства канала обработки информации с датчиков служат для согласования сигналов по форме и уровню с требованиями АЦП. Каждый модуль управления имеет свой преобразователь напряжения питания.

Особое место в данной разработке занимают 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 (и увеличения количества зеркальных сегментов адаптивного зеркала) при минимальных аппаратных затратах. Рассмотренная схема системы управления позволяет эффективно управлять формой поверхности зеркала с 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

## 4.5 Цифровой контрольно-измерительный стенд

### 4.5.1 Функциональная схема измерительного стенда

Во всех разработках, связанных с прецизионным позиционированием в микрометровом диапазоне с погрешностями в десятки нанометров, центральное

место занимают вопросы, связанные с градуировкой датчиков положения, снятием статических и динамических характеристик исполнительных пьезопроводов, настройкой и юстировкой различных оптических элементов. Для их решения обычно разрабатывают 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 рисунке 4.14 показана функциональная схема измерительного стенда.

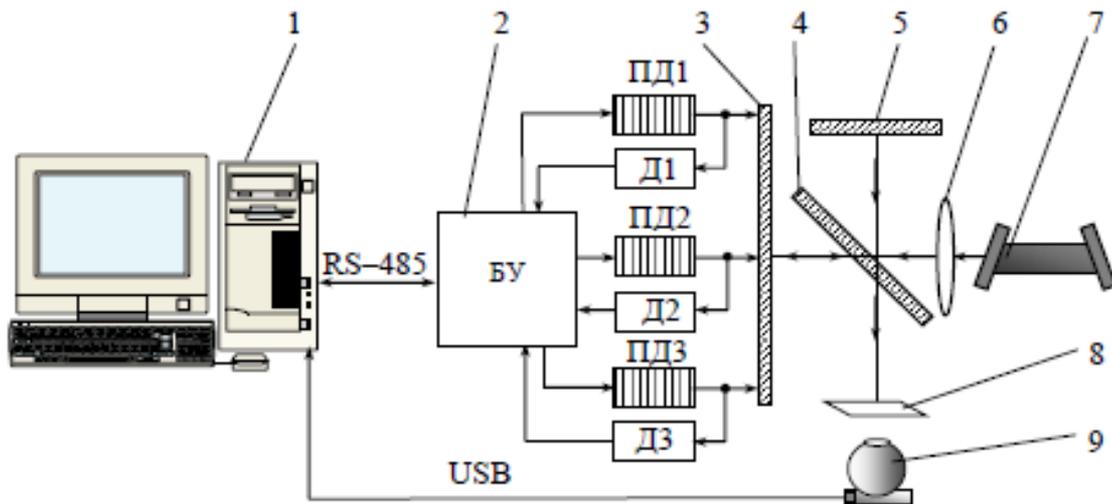


Рисунок 4.14 – Функциональная схема измерительного стенда (1 – ЭВМ верхнего уровня, 2 – блок управления, 3 – управляемое зеркало, 4 – светоделитель, 5 – опорное зеркало, 6 – расширитель пучка, 7 – газовый лазер, 8 – экран, 9 – видеокамера, ПД1–ПД3 – исполнительные пьезодвигатели, Д1–Д3 – датчики перемещения)

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 пьезодвигателями ПД1–ПД3. Перемещение зеркала измеряется встроенными датчиками Д1–Д3. В качестве приемника изображения используется цифровая видеокамера 9. Интерференционная картина в цифровом виде 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 пьезопроводами, блок управления и видеокамера связаны с компьютером 1, образуя единый контрольно-измерительный комплекс.

#### 4.5.2 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 4.15.

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.

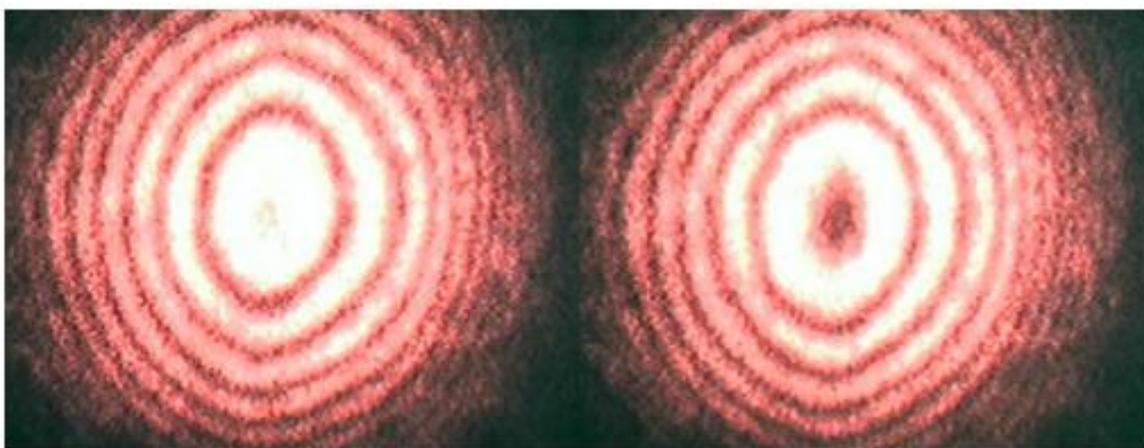


Рисунок 4.15 – Типовые интерферограммы для двух различных положений управляемого зеркала

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.

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

Измерение микроперемещений оптическим прибором на базе интерферометра Майкельсона имеет очень высокое разрешение. Это позволяет использовать данное измерительное средство как для снятия статических характеристик пьезодвигателей, так и для градуировки датчиков Д1–Д3 перемещения зеркала. Использование в стенде видеокамеры с передачей изображения на ЭВМ верхнего уровня позволяет автоматизировать этот процесс.

Настройка локальных регуляторов микроперемещений зеркального сегмента для достижения заданных динамических показателей систем управления

выполняется на втором этапе по данным датчиков Д1–Д3. Следует отметить, что применение интерферометра Майкельсона с видеокамерой для этих целей проблематично. Связано это обычно с относительно низкой скоростью передачи и обработки изображений цифровыми средствами. Специализированные датчики Д1–Д3, откалиброванные на первом этапе настройки системы, справляются с этой задачей значительно эффективнее.

На последнем этапе настройки выполняется контроль стабильности позиционирования и погрешности отработки типовых задающих воздействий разомкнутой системой управления положением зеркального сегмента. На этом этапе очень эффективно применение высокоточного интерферометра Майкельсона. Автоматизация процесса контроля позволяет не только упростить и ускорить процесс настройки системы управления, но и обеспечить протоколирование результатов измерений и настройки.

### 4.5.3 Структурная схема измерительной системы

Структурная схема измерительной системы представлена на рисунке 4.16. По командам ЭВМ верхнего уровня блок управления формирует напряжение, которое подается на пьезоактюатор. Пьезоактюатор перемещает управляемое зеркало 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 4.16 приняты следующие обозначения:  $W_m$  – передаточная функция преобразователя,  $W_n$  – передаточная функция исследуемого пьезоактюатора,  $W_k$  – 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,  $K_x, K_y$  – 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 снимаются 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.

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.

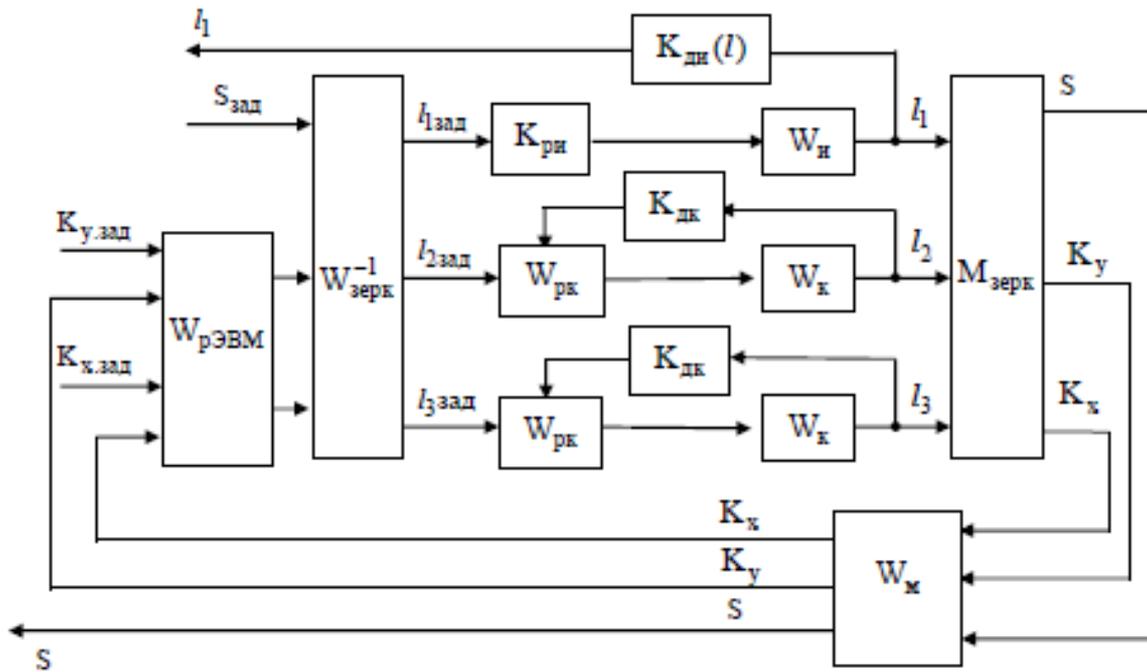


Рисунок 4.16 – Структурная схема измерительной системы

С другой стороны, цифровая обработка видеосигнала позволяют получить информацию об 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.

#### 4.5.4 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  $Y$ )  $Y=M*X$ ,  $dim Y=dim X=3$ .

Введем обозначение: нумеруем пьезодвигатели: испытуемый – 1, дополнительные – 2 и 3. Параллельное перемещение зеркала при работе трех пьезодвигателей обозначим как  $L$ ; 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  $K_{1Y}, K_{2Y}, K_{3Y}$  коэффициенты передачи зеркала по наклону к оси  $Y$  для первого, второго, третьего пьезоактюатора соответственно. Тогда передаточная матрица зеркала будет иметь вид

$$M_{\text{зерк}} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{\Delta L} & \frac{L_2}{\Delta L} & \frac{L_3}{\Delta L} \\ \frac{K_{1X}}{L_1} & \frac{K_{2X}}{L_2} & \frac{K_{3X}}{L_3} \\ \frac{K_{1Y}}{L_1} & \frac{K_{2Y}}{L_2} & \frac{K_{3Y}}{L_3} \end{bmatrix}.$$

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

$$M_{\text{зерк}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{\Delta L} & \frac{L_2}{\Delta L} & \frac{L_3}{\Delta L} \\ \frac{K_{1X}}{L_1} & \frac{K_{2X}}{L_2} & \frac{K_{3X}}{L_3} \\ \frac{K_{1Y}}{L_1} & \frac{K_{2Y}}{L_2} & \frac{K_{3Y}}{L_3} \end{bmatrix}^{-1}.$$

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 геометрический центр интерферограммы в общем случае не совпадает с энергетическим центром оптического изображения, 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. В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Р.Г. Джагупов, А.А. Ерофеев 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. Стр 34–41.
5. В.В. Лавриненко, И.А. Карташев, В.С. Вишневский Пьезоэлектрические двигатели. – М.: Энергия, 1980. – 110 с.
6. А.А. Никольский Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
7. А.А. Бобцов, С.В. Быстров, В.И. Бойков, А.Б. Бушуев, В.В. Григорьев Пьезоэлектрический привод. – Патент на полезную модель № 87043 рег.20 сентября 2009.
8. В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, Р.А. Карташев Система управления положением сегментов составного зеркала адаптивного телескопа. – Известия ВУЗов Приборостроение, том 47, №8, 2004, с.67–69.
9. В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, Д.Е. Обертов Пьезопривод на основе тонкопленочного пакетного пьезоактюатора. – Изв. вузов. Приборостроение. 2009.Т.52, №11.С. 72–77.
10. А.А. Бобцов, С.В. Быстров, В.И. Бойков, А.Б. Бушуев, В.В. Григорьев Устройство для испытания пьезоэлектрического привода и его элементов. Патент на полезную модель №76138, рег. 10.09.2008.
11. В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.Н. Коровьяков, И.П. Салмыгин Экспериментальное исследование характеристик пьезоприводов нового поколения. – Изв.вузов.Приборостроение.2009.Т.52, №11.С.77–82.
12. В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, А.Ю. Королёв Широотно-импульсное управление пьезоактюатором // Материалы V Международной научной конференции "Системный синтез и прикладная синергетика", 2013. – Т. III. – С. 24–30
13. В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.Ю. Королёв Динамика пьезопривода с управлением от широтно-импульсного модулятора с тремя состояниями // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2013. – Т. 56. – № 4. – С. 81–85
14. В.А. Бардин, В.А. Васильев Актюаторы нано- и микро-перемещений для систем управления, контроля и безопасности // Современная техника и технологии, 2014. №2 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/02/3057> (дата обращения: 15.02.2016).
15. С. В. Быстров, В. В. Григорьев, О.А. Малофеева Нестабильность параметров пьезокерамики и ее влияние на характеристики пьезодвигателей. // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 2 (23), 2016 | ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ стр. 31–34

16. <http://www.avrora-elma.ru> – сайт фирмы Аврора-Элма (г. Волгоград)
17. <http://www.elpiezo.ru> – сайт фирмы ЭЛПА (г. Зеленоград)
18. <http://www.physikinstrumente.com> – сайт фирмы Physik Instrumente (Германия).
19. [www.americanpiezo.com](http://www.americanpiezo.com) – сайт фирмы как APC International Ltd.16.
20. [www.apexmicrotech.com](http://www.apexmicrotech.com) – сайт компании APEx Microtechnology
21. <http://www.keramosinc.com/k12.htm> – сайт фирмы Keramos, США
22. <http://www.piezo.com/> – сайт фирмы Piezo Systems, Inc., США
23. [www.pi.ws](http://www.pi.ws) – сайт фирмы PI, Великобритания

**Приложение А**  
**СЕГНЕТОМЯГКИЕ**  
**ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ**  
**МАТЕРИАЛЫ**

Таблица А1 – Основные параметры материалов

Параметр	Ед. измерения	ЦТС-19	ЦТС-26	ЦТС-36	НЦТС-1	НЦТСБС-1	НЦТС-2	ЦТС-46	ЦТС-50
T <sub>к</sub>	°С	290	350	350	175	140	130	260	260
$\epsilon^{T33}/\epsilon_0$	-	1750	1700	670	4000	5700	5100	2100	2200
$\epsilon^{T11}/\epsilon_0$	-	1450	-	1130	-	-	-	-	-
tg $\delta$ , не более	%	2,5	2	2,5	2	2,8	3	2	2,5
Q <sub>м</sub>	-	80	80	80	50	40	60	70	80
V <sup>E1</sup>	×10 <sup>3</sup> м/с	3	2,9	3	2,87	3	2,95	2,9	2,9
$\sigma_p$	-	0,37	0,38	0,3	-	0,38	-	0,33	0,33
k <sub>p</sub>	-	0,55	0,6	0,57	0,6	0,62	0,61	0,63	0,64
k <sub>15</sub>	-	0,6	-	0,73	-	-	-	-	-
k <sub>33</sub>	-	0,67	0,68	0,7	-	-	0,74	0,72	0,73
d <sub>31</sub>	×10 <sup>-12</sup> Кл/Н	-160	-160	-90	-260	-310	-310	-190	-200
d <sub>33</sub>	×10 <sup>-12</sup> Кл/Н	350	340	220	550	650	800	450	470
d <sub>15</sub>	×10 <sup>-12</sup> Кл/Н	400	-	440	-	-	-	-	-
g <sub>31</sub>	×10 <sup>3</sup> м/с	-10,3	-10,6	-15,2	-7,3	-6,2	-6,9	-10,2	-10,3
g <sub>33</sub>	×10 <sup>3</sup> м/с	22,6	22,6	37,1	-15,5	12,9	17,7	23,1	24,1
(ООЧ) <sub>p</sub>	%	0,8	-	3	-	-	-	-	-
(ООЧ) <sub>сд</sub>	%	0,9	-	1,1	-	-	-	-	-
(ООЧ) <sub>сж</sub>	%	1	-	2	-	-	-	-	-
Траб	°С	200	250	200	100	85	80	180	180
$\rho_v$ , не менее	При 100 °С,	1	1	1	1	1	1	1	1
$\rho$	×10 <sup>8</sup> Ом·м	7,5	7,6	7,7	7,4	7,6	7,8	7,5	7,6

**Условные обозначения**

- T<sub>к</sub> – температура точки Кюри;
- $\epsilon^{T33}/\epsilon_0$ ,  $\epsilon^{T11}/\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость;
- tg $\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при E=25 кВ/м;
- Q<sub>м</sub> – механическая добротность;
- V<sup>E1</sup> – скорость звука;
- $\sigma_p$  – планарный коэффициент Пуассона;
- k<sub>p</sub> – коэффициент электромеханической связи планарной моды;
- k<sub>15</sub> – коэффициент электромеханической связи сдвиговой моды;
- k<sub>33</sub> – коэффициент электромеханической связи моды растяжения-сжатия по толщине;
- d<sub>31</sub>, d<sub>33</sub>, d<sub>15</sub> – пьезоэлектрические модули;

- $g_{31}, g_{33}$  – электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема);
- $(ООЧ)_p$  – относительное отклонение частоты в интервале температур - 60...+85°С планарной моды;
- $(ООЧ)_{сд}$  – относительное отклонение частоты в интервале температур - 60...+85° С сдвиговой моды;
- $(ООЧ)_{сж}$  – относительное отклонение частоты в интервале температур - 60...+85° С моды растяжения-сжатия по толщине;
- $T_{раб}$  – рекомендуемая повышенная температура;
- $\rho_v$ , – удельное объемное электрическое сопротивление;
- $\rho$  – плотность.

## СЕГНЕТОЖЕСТКИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица А2 – Основные параметры материалов

Обозначение	Ед. Измерения	ЦТС-23	ЦТБ С-7	ЦТБ С-8	ЦТС-43	ЦТС-47	ЦТС-42	ЦТС Ст-3	ЦТС-48
$T_k$	°С	280	210	290	280	270	275	280	210
$\epsilon^T_{33}/\epsilon_0$	-	1000	1620	1400	1400	1450	1300	1400	2200
$\epsilon^T_{11}/\epsilon_0$	-	1200	2250	-	-	-	-	-	-
$tg \delta$ , не более	%	0,7	1	0,4	0,6	0,6	0,55	0,55	0,8
$tg \delta_c$	%	3	3,5	1	1,7	-	2	-	2
$Q_m$	-	300	350	1120	1100	900	850	800	450
$v^E_1$	$\times 10^3$ м/с	3,3	3,1	3,2	3,2	-	3,2	3,3	3,2
$\sigma_p$	-	0,33	0,28	-	0,33	-	-	0,35	0,37
$k_p$	-	0,5	0,56	0,56	0,52	0,56	0,54	0,55	0,58
$k_{15}$	-	0,6	0,66	-	-	-	0,68	-	-
$k_{33}$	-	0,65	0,68	0,68	0,64	-	0,69	-	0,65
$d_{31}$	$\times 10^{-12}$ Кл/Н	-120	-140	-140	-125	-135	-130	-140	180
$d_{33}$	$\times 10^{-12}$ Кл/Н	240	330	315	280	290	280	275	420
$d_{15}$	$\times 10^{-12}$ Кл/Н	365	575	-	-	-	-	-	-
$g_{31}$	$\times 10^3$ м/с	-13,6	-9,8	-11,3	-10,1	-10,3	-11,3	-11,3	9,3
$g_{33}$	$\times 10^3$ м/с	27,1	23	25,4	22,6	22	24,3	22,2	21,6
$(ООЧ)_p$	%	2,5	-	-	-	-	0,4	-	-
$(ООЧ)_{сд}$	%	2,7	-	-	-	-	-	-	-
$(ООЧ)_{сж}$	%	4,4	-	-	-	-	-	-	-
$T_{раб}$	°С	150	150	200	200	-	185	150	120
$\rho_v$	При 100 °С, $\times 10^8$ Ом·м	5	5	5	5	-	-	5	5
$\rho$	$\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,6	7,3	7,6	7,5	7,7	7,5	7,5	7,5

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ  
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ  
МАТЕРИАЛЫ**

Таблица А3 – Основные параметры материалов

Обозначение	Ед. Изм.	ТНaВ -1	ТНaВ- 1м	ТНВ- 1	ТН6В- 1	ЦТС- 26	ЦТС- 26м	ЦТС- 21	ТСВС-2
Тк	°С	670	630	920	900	350	350	400	420
$\epsilon^{T33}/\epsilon_0$ **	-	150	130	100	120	1700	1700	500	1800±1 50
$\epsilon^{T11}/\epsilon_0$	-	-	-	-	-	-	-	540	-
tg $\delta$ , не более **	%	2,5	0,8	0,8	0,2	2,0	2,0	1,8	0,30
Qm	-	4000	-	-	-	80	80	150	28 ± 5
$\nu^E1$	10 <sup>3</sup> м/с	-	-	-	-	2,9	2,9	3,70	3,06 ± 0,06
$V^D_t$	-	-	-	-	415	-	-	-	-
$\sigma_p$	-	0,20	0,20	0,20	-	0,36	0,38	0,32	0,31 ± 0,01
kp	-	-	-	-	-	0,60	0,60	0,30	0,50
k15	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,66
k33	-	-	-	-	-	0,68	0,68	0,42	0,60
kt	-	-	-	-	<sup>3</sup> 0,18	-	-	-	-
d31	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	-	-	-	-	-170	-160	-40	135
d33 **	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	14	22	7	<sup>3</sup> 15	350	340	100	340
d15	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	-	-	-	-	-	-	120	500
g31	10 <sup>-3</sup> В*м/Н	-	-	-	-	-11,3	-10,6	-9,0	-
g33 **	10 <sup>-3</sup> В*м/Н	10,6	19,1	7,9	14,1	23,3	22,6	22,6	-
(ООЧ)р	%	-	-	-	-	-	-	1,5	-
(ООЧ)сд	%	-	-	-	-	-	-	1,3	-
(ООЧ)сж	%	-	-	-	-	-	-	2,1	-
Траб *	°С	500	400	700	750	250	250	300	300
ООd33	%	20	10	20	-	0-20	-	100	-
$\rho_V$	При 100 °С, 10 <sup>8</sup> , Ом м	10	10	10	1	1	1	1	1
	При Траб, 10 <sup>4</sup> , Ом м	1	1	0,01	0,01	-	-	10	-
$\rho$	10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	6,8	6,6	7,2	8,0	7,6	7,6	7,6	7,4

**Приложение Б**  
**ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ**  
**МАТЕРИАЛОВ ФИРМЫ**  
**American Piezoceramic (APC)**  
**International Ltd, (США)**

Таблица Б.1– Характеристики пьезокерамики APC

Материал Параметр	APC 840	APC 841	APC 850	APC 851	APC 852	APC 855	APC 856	APC 857	APC 858	APC 880
$e_{33}^T/e_0$	1250	1380	1750	2200	1900	3250	4000	4100	6000	1000
$e_{11}^T/e_0$	-	1490	-	2200	-	-	-	-	-	-
tgδ, % (1 В/м)	0,40	0,35	1,60	1,50	2,50	2,00	1,70	2,70	3,00	0,35
tgδ, % (400 В/м)	-	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-
K <sub>p</sub>	0,62	0,56	0,63	0,62	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
K <sub>31</sub>	0,35	0,32	0,36	0,37	0,35	0,39	0,37	0,38	0,37	0,30
K <sub>33</sub>	0,70	0,65	0,72	0,72	0,72	0,75	0,74	0,73	0,60	0,65
K <sub>15</sub>	0,68	0,65	-	0,68	-	-	-	-	-	-
K <sub>1</sub>	0,50	0,48	-	0,49	-	-	-	-	-	-
$-d_{31}(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	125	109	175	185	190	270	260	295	280	95
$d_{33}(10^{-12}), \text{Кл/Н}$	300	323	450	462	480	590	590	640	700	250
$-g_{31}(10^{-3}), \text{В}\times\text{м/Н}$	10,5	10,5	12,4	10,7	11,3	8,8	8,5	8,1	5,3	11
$g_{33}(10^{-3}), \text{В}\times\text{м/Н}$	26	22,7	26	21,7	28,5	19,5	18,5	17,6	-	25
N <sub>p</sub> , кГц×м	2005	2260	2030	2040	1980	2080	1970	2020	2010	2105
N <sub>i</sub> , кГц×м	2130	2070	1900	1900	-	1930	-	1920	2000	2030
N <sub>p</sub> , кГц×м	1530	1710	1530	1460	-	1500	-	1480	-	1500
S <sub>11</sub> <sup>E</sup> (10 <sup>-12</sup> ), м <sup>2</sup> / Н	11,8	11,7	15,3	15,2	16,3	14,8	15,0	16,0	10,8	10,8
S <sub>33</sub> <sup>E</sup> (10 <sup>-12</sup> ), м <sup>2</sup> / Н	17,4	17,3	17,3	17,2	-	16,7	17,0	16,5	-	15,0
Q <sub>M</sub> <sup>P</sup>	500	1400	80	80	90	70	60	45	-	1000
T <sub>c</sub> , °С	340	285	360	235	300	195	150	170	145	325
r (10 <sup>3</sup> ), кг/м <sup>3</sup>	7,6	7,9	7,5	7,7	7,5	7,5	7,7	7,3	7,7	7,7

Примечание: пьезоэлектрические и упругие параметры определены в соответствии со стандартом IEC 483, при 20 ± 5 °С спустя 24 часа после поляризации.

Таблица Б2 – Области применения пьезокерамических материалов фирмы American Piezoceramic (APC) International Ltd (США)

	APC								
Применение	840	841	850	851	852	855	856	857	880
Акселерометры			X	X	X				
Акустические сенсоры			X	X	X				
Актюаторы		X	X	X	X				
Преобразователи для работы на воздух			X						
Устройства сигнализации			X	X					
Звуковые устройства			X	X					
Автомобильная электроника			X	X		X	X		
Формирователи пучка	X		X	X	X	X	X		X
Системы дистанционного управления			X	X					
Зубная очистка	X	X							X
Зубная хирургия	X	X							X
Детекторы			X	X	X	X			
Электрические фильтры			X			X		X	
Электроакустические преобразователи	X								
Системы контроля эмиссии			X	X	X				
Обнаружение дефектов			X	X	X				
Расходомеры	X		X	X	X				
Распылители жидкости	X	X							X
Датчики силы	X		X	X	X				
Газовые воспламенители	X		X						X
Гироскопы	X		X			X	X	X	
Мощные ультразвуковые	X	X	X						X
Увлажнители	X	X							X
Струйные принтеры			X	X	X	X	X	X	
Микрофоны			X	X	X	X			
Детекторы движения			X	X	X	X			
Звукосниматели			X	X	X	X			
Гидроакустические применения	X								X
Модуляторы речи			X						
Датчики давления	X		X						
Датчики положения			X	X	X	X			
Ультразвуковая очистка и сварка	X	X							X
Пьезотрансформаторы	X	X							X

**Приложение В**  
**ПЬЕЗОКЕРАМИКА ФИРМЫ PI**  
**(Великобритания)**

Таблица В1 – Характеристики пьезокерамики фирмы PI

Тип материала Параметр	Обозн.	Ед. Изм.	PIС 151	PIС 255	PIС 155
Физические и диэлектрические свойства					
Плотность	$\rho$	$10^3 \text{ кг/м}^3$	7.80	7.80	7.80
Температура Кюри	$T_c$	$0_c$	250	350	345
Диэлектрическая проницаемость: в направлении Поляризации Перпендикулярно	$\epsilon_{T_{33}/\epsilon_0}$ $\epsilon \epsilon$	1	2400	1750	1450
			1980	1650	1400
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\tan \delta$		20	20	20
Электромеханические свойства					
Коэффициенты связи Коэффициент жесткости	$k_p$	1	0.62	0.62	0.62
	$k_t$		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	$d_{31}$	$10^{-12} \text{ Кл/Н}$	-210	-180	-165
	$d_{33}$		500	400	360
	$d_{15}$			550	
Постоянные пьезоэлектрического Напряжения	$g_{31}$	$10^{-12} \text{ В*м/Н}$	-11.5	-11.3	-12.9
	$g_{33}$		22	25	27
Механико-акустические свойства					
Частотные постоянные	$N_p$	$\Gamma \text{ц*м}$	1950	2000	1960
	$N_1$		1500	1420	1500
	$N_3$		1750		1780
	$N_t$		1950	2000	1990
Упругая податливость	$S_{11}^E$	$10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$	15.0	16.1	15.6
	$S_{33}^E$		19.0	20.7	19.7
Модуль Юнга	$C_{33}^D$	$10^{10} \text{ Н/м}^2$	10.0		11.1
Коэффициент демпфирования	$Q_m$	1	100	80	80
Температурная стабильность					
Температурный коэффициент $\epsilon_{33}$	TK $\epsilon_{33}$	$10^{-3} / \text{К}$	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**  
**ФИРМЫ «ЭЛПА»**



*a* – длина, *b* – ширина, *h* – высота,  $f_a$  и  $f_p$  – частоты антирезонанса и резонанса соответственно

Таблица Г.1 – Пластины пьезокерамические

<b>a x b, mm</b>	<b>h, mm</b>	<b><math>f_a</math>; <math>f_p</math>, кГц</b>
3,0x4,0	0,4	$f_a$ 5225÷5775
4,0x4,0	0,2	$f_a$ 10450÷11550
4,0x4,0	0,4	$f_a$ 5225÷5775
4,0x6,0	0,4	$f_a$ 5225÷5775
4,0x4,0	0,9	$f_a$ 2479÷2730
5,0x5,0	0,34	-
5,0x5,0	0,37	-
5,0x5,0	0,4	-
5,0x4,0	0,2	$f_a$ 10450÷11550
5,5x2,1	0,13	$f_a$ 15200÷16800
5,5x2,1	0,14	$f_a$ 1853÷2047
5,0x10,0	0,4	$f_a$ 5225÷5775
5,0x12,0	0,4	$f_a$ 5225÷5775
7,0x6,0	0,4	$f_p$ 4750÷5250
7,5x1,5	0,5	-
9,0x9,0	0,37	-
10,0x1,0	0,8	$f_a$ 2558÷2942
10,0x1,3	0,37	-
10,0x2,0	0,5	-
10,0x2,0	0,8	$f_a$ 2558÷2942
10,0x6,0	0,8	$f_p$ 2375÷2625
10,0x13,0	0,7	$f_a$ 2613÷2887
10,0x35,0	0,9	$f_a$ 2470÷2730
11,0x9,0	0,4	$f_p$ 4750÷5250
11,0x11,0	1	-
12,0x5,0	0,4	$f_p$ 2375÷2625



$\varnothing$  - диаметр,  $h$  – высота  $f_a$  и  $f_p$  – частоты антирезонанса и резонанса соответственно

Таблица Г.2 – Диски пьезокерамические

$\varnothing$ , мм	$h$ , мм	$f_a$ ; $f_p$ , кГц
5	0,4	$f_p$ 4750÷5250
5	1	-
6	0,12	$f_p$ 11400÷12600
6	0,4	$f_p$ 5225÷5775
7	0,8	-
7	0,8	$f_p$ 2375÷2625
8	0,24	$f_p$ 6650÷7350
8	0,8	$f_p$ 2375÷2625
8	2	$f_p$ 950÷1050
9	0,4	$f_a$ 5225÷5775
10	0,18	$f_a$ 11400÷12600
10	0,36	$f_p$ 5225÷5775
10	10	-
12	0,3	$f_p$ 5616÷6864
12	0,87	$f_a$ 2375÷2625
13	5	$f_p$ 332,5÷367,5
13	2,7	$f_p$ 332,5÷367,5
14	0,8	$f_p$ 2375÷2625
15	0,2	-
15	0,8	$f_p$ 2375÷2625
16	9,3	$f_p$ 85,5÷94,5
16	11,5	-
18	0,38	$f_p$ 4750÷5250
18	0,7	$f_p$ 1995÷2205
18	1,04	$f_p$ 1710÷1890
18	15	-
20	0,5	$f_p$ 3800÷4200
20	1,1	$f_p$ 1140÷1260
22	3,8	$f_p$ 450÷550



**КОЛЬЦА**

*D – внешний диаметр, d – внутренний диаметр, H - высота*

Таблица Г.3 – Пьезокерамические элементы - кольца пьезокерамические

<b>D, мм</b>	<b>d, мм</b>	<b>H, мм</b>
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

Материалы: ЦТС-19, ЦТС-26, ЦТС-43, ЦТСтБС-2, ЦТБС-7, ЦТБС-8



**ТРУБКИ**

*D – внешний диаметр, d – внутренний диаметр H – высота, t – толщина стенки*

Таблица Г.4 – Пьезокерамические элементы цилиндры и трубки пьезокерамические

<b>D, мм</b>	<b>d, мм</b>	<b>H, мм</b>	<b>t, мм</b>
6,35	4,90	6,35	0,73
10	8	10	1
15,5	11,20	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
9	8	32	0,5
10	8	32	1
10	8,5	32	0,75
12	11	32	0,5



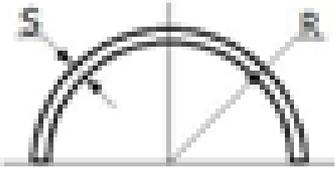
Таблица Г.5 – Сферы, полусферы и мениски пьезокерамические

Дизайн	D, мм	d, мм	d1, мм	S, мм	h, мм
	5 +0,6...-0,4	2 +0,4...-0,2	—	0,5 ± 0,1	—
	7 +0,7...-0,5	3,5 +0,5...-0,3	—	0,5 ± 0,1	—
	20 +1,7...-1,5	9 +0,7...-0,5	—	1,5 ± 0,1	—
	30 +1,7...-1,5	11 +0,7...-0,5	—	2,5 ± 0,2	—
	80 +3,2...-3,0	20 +1,7...-0,5	—	5,0 ± 0,3	—
	20 +1,7...-1,5	9 +0,6...-0,5	—	1,5 ± 0,15	—
	30 +1,7...-1,5	11 ± 0,9	—	2,5 ± 0,15	—
	50 +1,7...-1,5	19 ± 0,5	—	3,0 ± 0,2	—
	7 +1,7...-0,5	3 +0,4...-0,2	4,5 +0,5...-0,3	0,5 ± 0,1	3 ± 0,2
	15 +1,7...-1,5	6 +0,6...-0,2	9,5 +0,7...-0,5	1,2 ± 0,1	5 ± 0,3
	40 +2,0...-1,5	10 +0,6...-0,2	16,2 +0,5...-0,3	3,0 ± 0,2	5 ± 0,3
	50 +2,0...-1,5	10 +0,6...-0,2	16,2 +0,5...-0,3	3,0 ± 0,2	5 ± 0,3

Примечания:

1. Размеры, допуски, материалы основы и напыления уточняются при оформлении заказа;
2. По согласованию с заказчиком возможно изготовление сферических пьезоэлементов других размеров (D 5,0–100,0 мм);
3. Материал основы: ЦТС-19, ЦТС-26.

Таблица Г.6 – Мениски пьезокерамические

Размеры	R, мм	S, мм
	2,5±0,2	0,5 ± 0,1
	3,5±0,25	0,5 ± 0,1
	7,5±0,5	1,2 ± 0,1
	10,0±0,75	1,5 ± 0,1
	15,0±0,75	2,5 ± 0,2
	20,0±0,75	3,0 ± 0,2
	25,0±0,75	3,0 ± 0,2
	40±1,5	5,0 ± 0,3
	50±2,0	7,5 ± 0,4

Материал основы: ЦТС-19, ЦТС-26.

**Приложение Д**  
**СООТВЕТСТВИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ**  
**МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ФИРМ**

Таблица Д1– Соответствие пьезокерамических материалов различных фирм

Фирма Материал	Valpey- Fisher	Morgan Matroc	Channel	EDO	Keramos	Trans- Ducer	Motorol a	Staveley Sensors
ЦТС								
Navy Type I	VP-A40	PZT4	C5400	EC-64	K-270	LTZ-1	-	EBL1
Navy Type II	VP-A50	PZT-5A	C5500	EC-65	K-350	LTZ-2	3195	EBL2
Navy Type II	VP-A50HD	-	-	-	-	-	3195HD	-
Navy Type III	VP-A80	PZT-8	C5800	EC-69	K-278	-	-	EBL4
Navy Type VI	VP-A55	PZT-5H	C5700	EC-76	-	LTZ- 2H	3203	EBL3
Navy Type VI	VP-A55HD	-	-	-	-	-	3203HD	-
Метаниобат Свинца	VP-M18				K-81			LM1
	VP-M38	-	-	EC-82	K-83	-	-	LM2
	VP-M58				K-85			LM4

**Navy Type I** (стандарт ВМФ США) – пригоден для работы в статических и динамических условиях в сонарах, системах УЗ очистки и для других силовых применений. Материал обеспечивает большие амплитуды механических перемещений при низких механических и диэлектрических потерях. Применения включают STM, нано - позиционеры и медицинскую терапию.

**Navy Type II** – имеет высокую чувствительность, диэлектрическую проницаемость и временную стабильность. Используется в качестве излучателей и приемников в акселерометрах, вибродатчиках и гидрофонах. Применения включают уровне и расходомерию, медицинские доплеровские преобразователи.

**Navy Type III** – имеет очень высокую механическую добротность и используется в силовых применениях. Способен выдерживать высокие уровни электрического и механического напряжения и наиболее пригоден для работы при высокой акустической мощности. Применения включают системы ультразвуковой очистки, разрушение клеток, эмульгирование и распыление, а также другие силовые ультразвуковые системы.

**Navy Type VI** – имеет очень высокие значения диэлектрической проницаемости, коэффициентов электромеханической связи и пьезомодулей при низкой временной и температурной стабильности. Используется в применениях, требующих точного контроля перемещений, а также, чувствительных приемниках. Низкая температура Кюри ограничивает диапазон рабочих температур. Применения включают медицинскую диагностику, неразрушающий контроль, STM и нано - позиционирование.

## Приложение Е ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ АКТЮАТОРЫ ПАКЕТНОГО ТИПА



**Пьезопакетные актюаторы** изготавливаются путем сборки в пакет монокристаллических 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 монокристаллический 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.

### **Конструкции пьезопакетных актюаторов:**

- в форме кольца
- в форме диска

### **Области применения**

- в фото- и рентгенолитографии 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.

Таблица Е1 – Характеристики пьезокерамических актюаторов пакетного типа

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 <sup>-3</sup> , не менее	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.0	3.0	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, нФ, не более	80	65	52	22	17	68	37	25	37
Предельно допустимое Напряжение, В	-300 ÷ + 500	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600	+600
Масса, г, не более	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

**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.

Таблица Е2 – Габаритные и присоединительные размеры актюаторов ПП-4,11,12,13,14

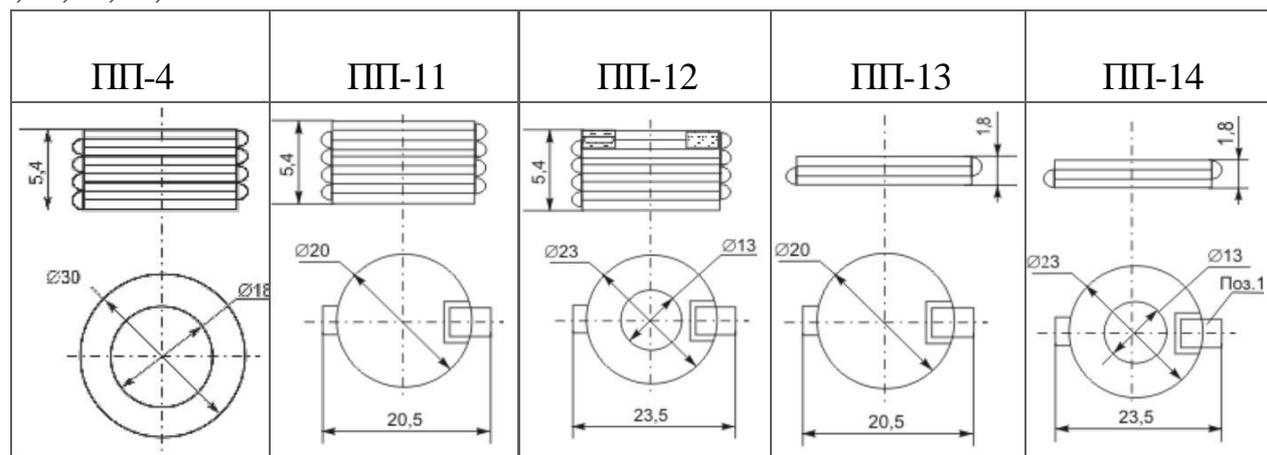
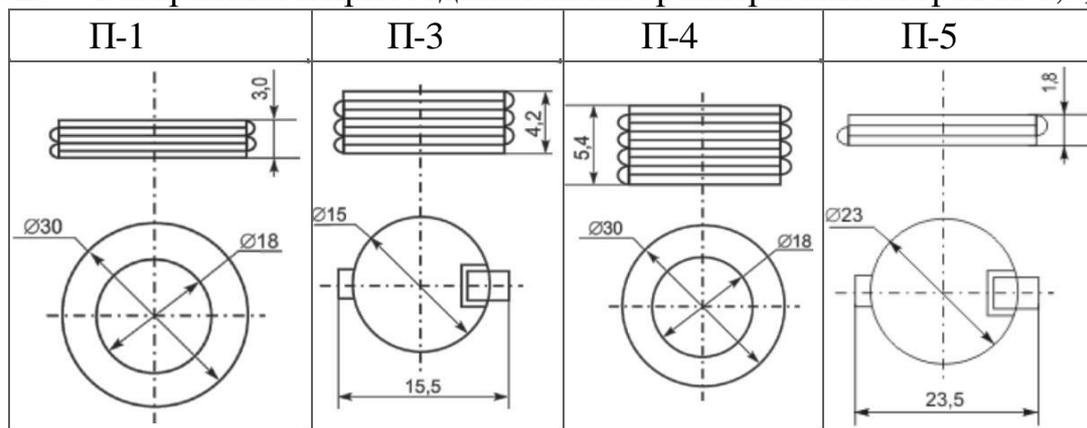


Таблица Е3 – Габаритные и присоединительные размеры актюаторов П-1,3,4,5

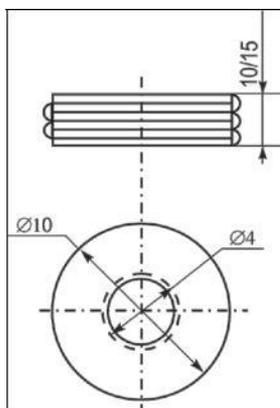


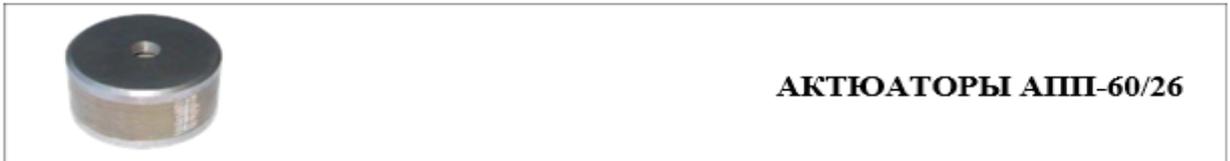
**АКТЮАТОРЫ АПП-10/10, АПП-10/15**

Таблица Е4 – Характеристики актюаторов АПП-10/10, АПП-10/15

Тип	Габариты, 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
АПП-10/10	Ø 10 x 10	5,5	20	-200 ÷ 200	± 1,0	125	450	8
АПП-10/15	Ø 10 x 15	8,5	40	-200 ÷ 200	± 1,5	115	450	16

Габаритные и присоединительные размеры АПП-10/10, АПП-10/15



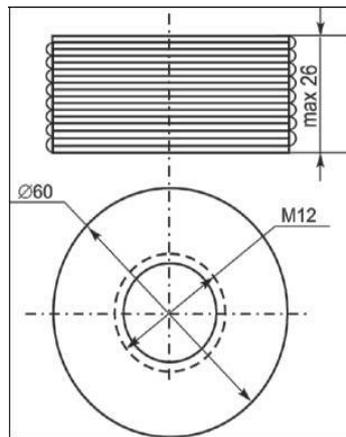


**АКТЮАТОРЫ АПП-60/26**

Таблица Е5 – Характеристики актюаторов АПП-60/26

Тип	Габариты, 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
АПП-60/26	∅ 60 x 26	550	1000	550 до -500	± 2,0	5	20	20

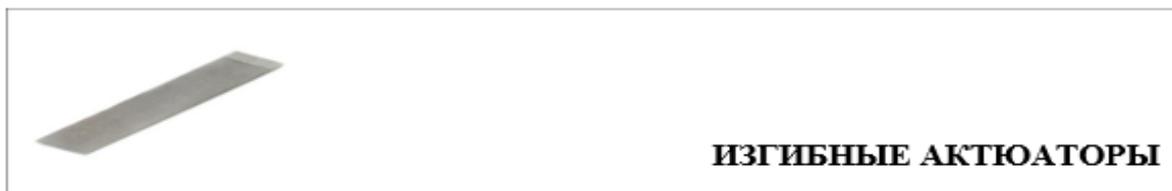
Габаритные и присоединительные размеры АПП-60/26



∅ 60 x 26 550 1000 500 ÷ -500

± 2,0 5 20

**Приложение Ж**  
**ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ АКТЮАТОРЫ**  
**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.

**Области применения:**

- 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.

Таблица Ж1 – 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
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	17

Таблица Ж2 – Основные параметры актюаторов с параллельным соединением пластин

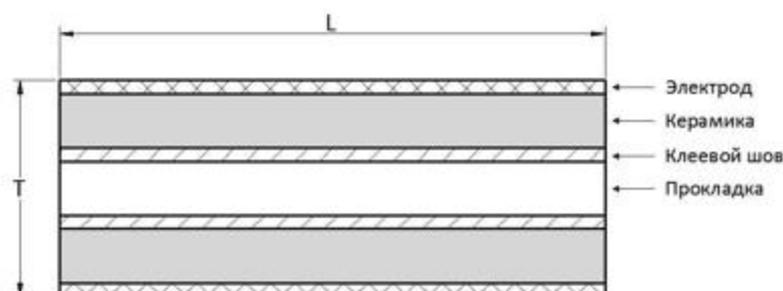
Тип пьезобиморфа	Емкость*, нФ	Управляющее напряжение, В	Свободный прогиб, мм	Рабочая длина, мм	Блокирующее усилие, N
ЭП-9-47-ПлБ-001	27-35	±80	±0,55	35	0,35
ЭП-9-47-ПлБ-002**	4,4-5,2	±200	±0,5	48	0,02
ЭП-9-47-ПлБ-004	03.апр	±150	±0,58	28,5	0,12
ЭП-9-47-ПлБ-004-01	03.апр	±150		28,5	
ЭП-9-47-ПлБ-006	65-80	±80	±0,7	85	0,3

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

Примечание:

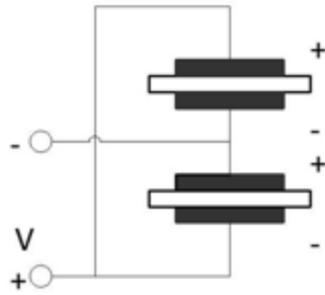
1. В пьезобиморфах ЭП-9-47-ПлБ-004 и ЭП-9-47-ПлБ-004-01 прокладка отсутствует.
  2. Пьезобиморфы ЭП-9-47-ПлБ-004-01 имеют луженые контактные площадки. Измерения свободного перемещения и блокирующего усилия при поставке на этом типе пьезобиморфов не проводятся.
- При последовательном соединении пластин емкость актюаторов уменьшается в 4 раза, для получения остальных параметров, указанных в таблице, управляющее напряжение необходимо увеличить в 2 раза.

### Конструкция пьезобиморфа

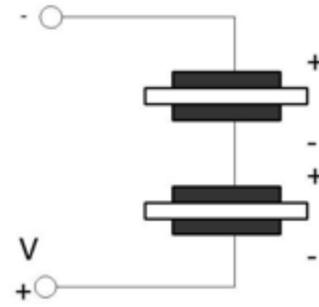


Монтажная зона выводов, по схеме, согласованной с потребителем

## Схема подключения пьезобиморфа



*а) при  
параллельном подключен  
ии  
пластин пьезобиморфа*



*б) при  
последовательном соединении  
ластин пьезобиморфа\**

\* Пьезобиморфы с последовательным соединением изготавливаются по отдельным заказам



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.

Таблица 31 – Характеристики многослойных пьезоактюаторов

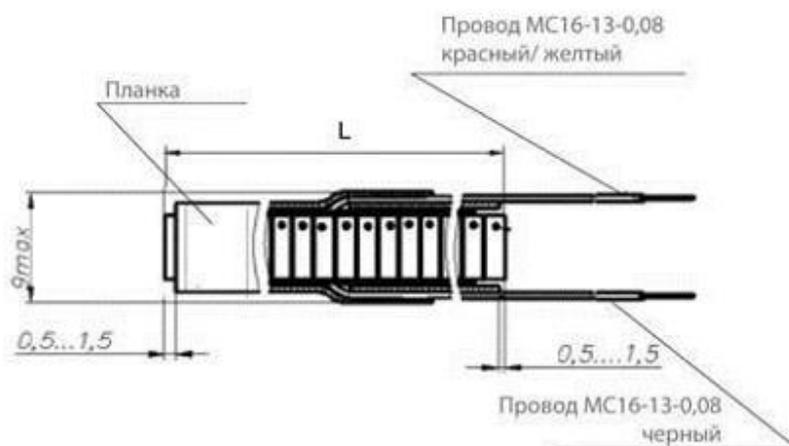
Параметр	Ед. Измерения, не более	Тип актюатора			
		АПМ-2-7-М	АПМ-2-11-М	АПМ-2-15-М	АПМ-2-22-М
Масса, г, не более	г, не более	6,5	9,6	12,7	18,8
Кол-во элементов, N *	N *	7	11	15	22
L, мм	Мм	20	31	41	61
Максимальное перемещение при напряжении 100 В, Мкм	Мкм	14±15%	22±15%	30±15%	44±15%
Статическая ёмкость, мкФ	мкФ	3,0±20%	6,0±20%	7,0±20%	10,0±20%
Сопротивление изоляции, МОм, не Менее	МОм, не Менее	5	2	1,5	1
Тангенс угла диэлектрических потерь, отн. ед., не Более	отн. ед., не Более	0,04	0,04	0,04	0,04
Воздействие внешних факторов					
Рабочий диапазон температур, °С	°С	от минус 30 до +85			

Изменение Температуры среды, °С	°С	от минус 40 до +85
Синусоидальная Вибрация	-	Диапазон частот: 1-200 Гц;
		Амплитуда ускорения: 50(5) м/с <sup>2</sup>
Механический одиночный удар	-	Длительность действия ударного ускорения: 5-10 мс; Амплитуда ускорения: 50 (5) м/с <sup>2</sup>
Срок службы	Годы	10
Наработка на отказ (в типовом режиме эксплуатации)	Циклы	1·10 <sup>9</sup>

\* По желанию заказчика возможно изменение величины перемещения за счет количества элементов, входящих в состав актюаторов.

### Габаритные и присоединительные размеры актюатора

#### а) Конструкторское исполнение АПМ-2-N



#### б) Конструкторское исполнение АПМ-2-N-M



### Указания по эксплуатации

Актюаторы рекомендуется жестко устанавливать на базовую поверхность при помощи клевого соединения. При установке следует избегать усилий растяжения, изгиба и скручивания. Центр оси перемещения должен совпадать с центром оси механической нагрузки.

При установке актюатора в конструктивное гнездо между его боковыми поверхностями и конструктивными стенками, соприкасающимися с боковыми поверхностями актюатора, рекомендуется устанавливать прокладку из фторопластовой ленты (типа фторопласт-3).

При пайке проводников к актюаторам рекомендуется:

- пайку осуществлять при закороченном актюаторе;
- время пайки не более 3 сек;
- припой ПСрОС2-58 ГОСТ 19738;
- флюс-активная канифоль;
- место пайки покрыть клеем К-400.

При подключении актюаторов строго соблюдать полярность включения. При подаче на положительный вывод минус 25В актюатор выходит из строя. Выводы актюатора рекомендуется шунтировать диодом, включенным во встречном направлении.

Резонансная частота актюаторов при креплении к жесткому основанию более 10 кГц.

Расчетное значение блокирующего усилия актюаторов  $\geq 1200$  Н. Перемещение торца актюатора при изменении напряжения характеризуется петлей гистерезиса, составляющей  $\sim 20\%$  от максимального значения величины перемещения.

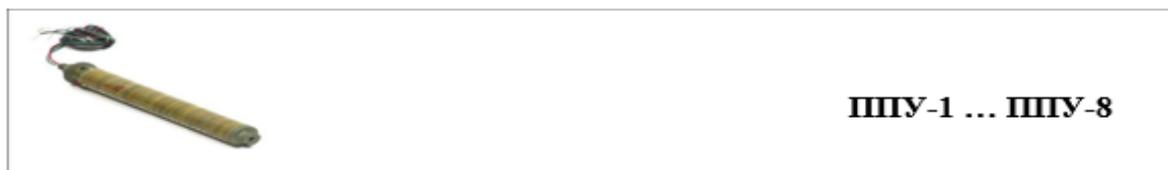
Актюаторы имеют низкое значение прочности на растяжение, которое может привести к его расслоению и выходу из строя. Актюаторы рекомендуется использовать в условиях предварительного поджатия силой не менее 350 Н.

Актюаторы в электрической схеме представляют ёмкостную нагрузку и имеют ток утечки не более 5 мкА и, следовательно, в квазистатическом режиме его тепловые потери незначительны.

При изменении напряжения от 0 до 100 В наблюдается практически линейная зависимость амплитуды перемещения актюаторов от напряжения. Изменение перемещения во времени воспроизводит изменение напряжения с запаздыванием не более 100 мкс.

В процессе любой операции рекомендуется закорачивать актюаторы, так как любые механические нагрузки приводят к образованию на их электродах заряда.

## Приложение И 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  $250 \pm 30$  кгс. Эта конструкция обеспечивает прецизионную точность позиционирования. 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

Таблица И2 –Условия эксплуатации

Интервал рабочих температур, °С	- 50 ÷ +60
Относительная влажность при 25 °С, %	до 98
Атмосферное давление в диапазоне, мм рт.ст.	от 90 до 450

Таблица И2– Характеристики армированных актюаторов ППУ-1–ППУ-8

Параметры	Марка пьезопривода						
	1-ППУ	2-ППУ	3-ППУ	4-ППУ	5-ППУ	6-ППУ	8-ППУ
Армирование	Шпилькой	шпилькой	Корпусом (прорезной пружиной с усилием $250 \pm 30$ кгс)				Шпилькой
Перемещение, мкм	$\pm 24$	$\pm 30$	$\pm 24$	$\pm 30$	$\pm 24$	$\pm 30$	$\pm 40$
Статическая емкость, мкф, не более	1,5	1,74	1,92	2,2	1,5	1,74	4,2
Рабочее напряжение, В	$\pm 300$	$\pm 300$	$\pm 300$	$\pm 300$	$\pm 300$	$\pm 300$	$\pm 300$
Предельно допустимое напряжение, В	$\pm 500$	$\pm 500$	$\pm 500$	$\pm 500$	$\pm 500$	$\pm 500$	$\pm 500$
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	2	2	2	2	2	2	2
Габаритные размеры, Мм	168,5x230x 26 Ø	198,5x230x 26 Ø	138x20 Ø	168x20 Ø	138x23 Ø	168x23 Ø	245,5x300x 34 Ø
Масса, г, не более	360	400	740	845	690	780	900

\* ППУ-8 имеют секцию обратной связи.

**Приложение К**  
**АКТЮАТОРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ**  
**АРМИРОВАННОГО ТИПА**

**ППУ-9 ... ППУ-14**

Конструкция цилиндрического актюатора состоит из одного или нескольких пьезотрубок, армированных сборной 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, безэнерционностью, малой потребляемой мощностью.

Таблица К1 – Характеристики цилиндрических актюаторов ППУ-9-ППУ-14

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

**Приложение Л**  
**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 технике для точной подачи инструмента;
- в лазерной аппаратуре для управления мощностью излучения, расходимостью пучка;
- в системах сканирования оптического луча в пространстве и других
- прецизионных устройствах.

Таблица Л1 – 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

### **УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

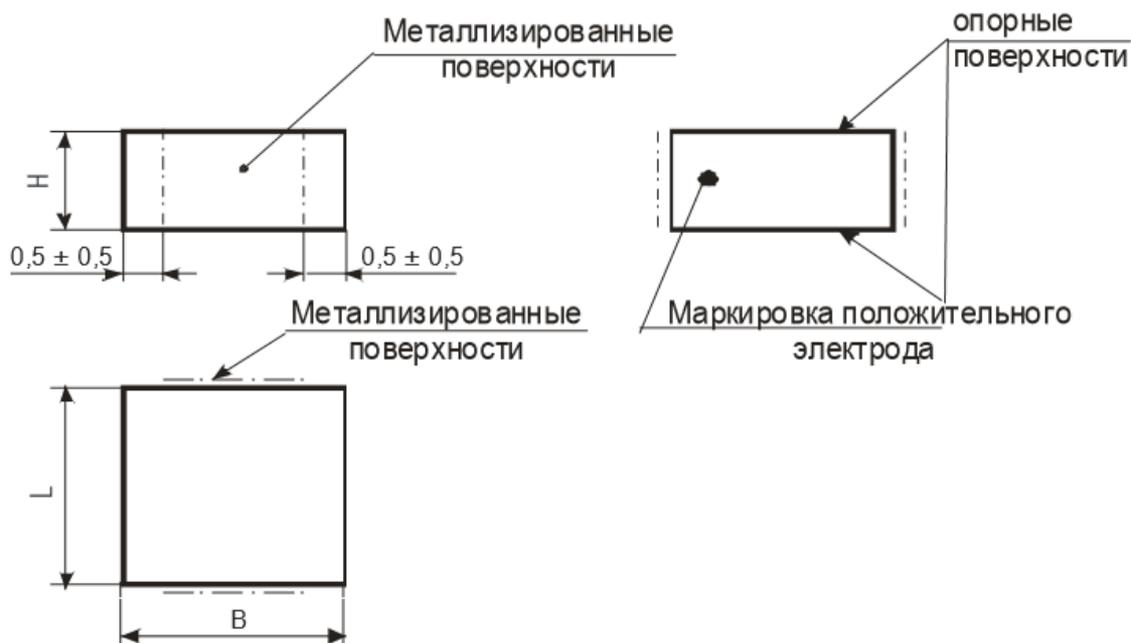
Интервал рабочих температур, °С	-60...+70
Диапазон частот, Гц	10...60
Ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	19,6 (2)

**Приложение М**  
**АКТЮАТОРЫ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ**  
**АП ОАО "ВЗРД "Монолит", Серийные**

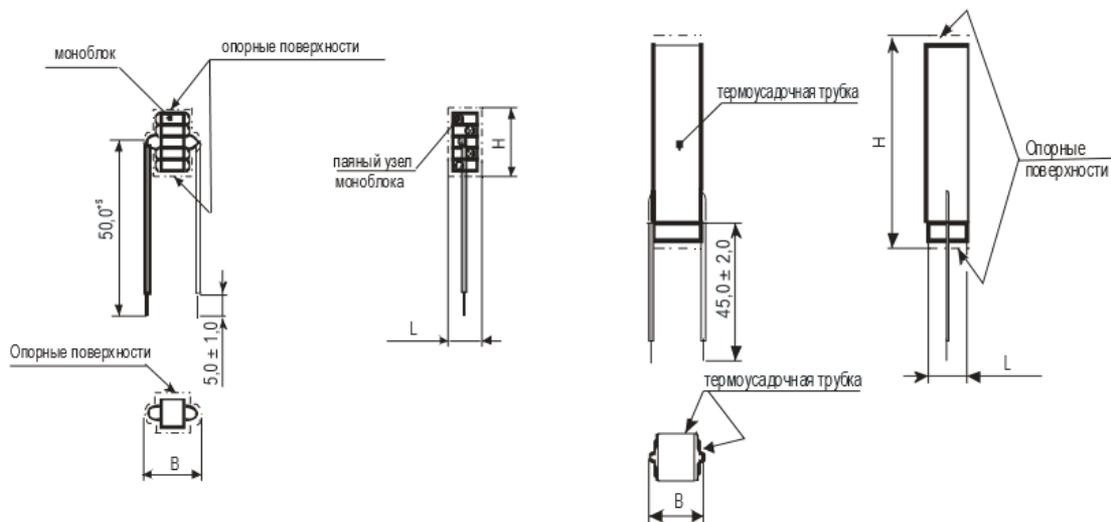
Актюаторы пьезокерамические АП предназначены для создания на их основе механизмов, обеспечивающих линейные перемещения.

Актюаторы изготавливают в соответствии с ТУ ВУ 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.



## Актуаторы АП-Б



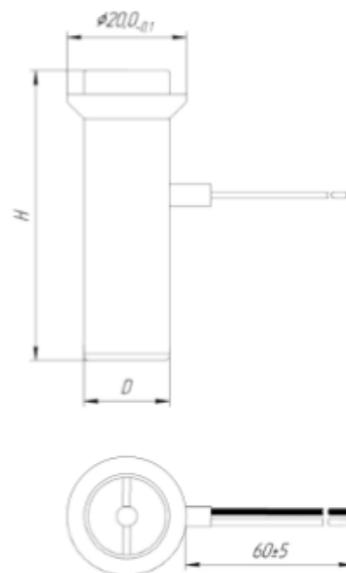
Актуаторы АП-В

Актуаторы АП-Т

Отрицательной полярности соответствует белый вывод,  
положительной цветной



Актуаторы АП-К 14/01 и 20/02



Актуаторы АП-К 20/03

Допускается по согласованию с потребителем поставка актуаторов без заливки компаундом.

Таблица М1 – Параметры и характеристики

Вид актюаторов, значения минимального перемещения $S_{зз}$ , мкм и конструктивное исполнение	Перемещение при управляющем напряжении $U_{упр}$ постоянного тока 100 В, $S_{зз}$ , мкм, не менее	Блокирующая сила, $F_{блок}$ , Н, не менее	Емкость, $C_0$		Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ , 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			
			номинал, 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		0,04	20	6,1	6,2 x 8,0	14,0	4,0		
АП-В 20/02	20,0		6750							3	42,5	14,0
АП-В 25/03	25,0		9000							2	56,0	20,0
АП-Т 20/01	20,0		6750							3	42,5	7,2 x 15,0
АП-Т 25/02	25,0		9000		2	56,0	10,0	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

Таблица М2 – Пример условного обозначения

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

Актюатор	АП-В	2,5/01	900 нФ	ТУ ВУ 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)

Актюатор	АП-Т	20/01	6750 нФ	ТУ ВУ 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)

Актюатор	АП-К	14/01	5850 нФ	ТУ ВУ 300050407.087-2008
(а)	(б)	(в, г)	(д)	(е)

**Приложение Н**  
**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ**  
**УСИЛИТЕЛИ ФИРМЫ**  
**APEX Microtechnology**

РА78, РА86 и РА69 – 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. РА78, РА86 и РА69 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

	Напряжение на выходе	Ток на выходе	Скорость нарастания напряжения	Полоса пропускания по мощности
Модель	В	мА	В/мкс	кГц
РА69	+/-100	50	200	200
РА86	+/-100	100	350	300
РА78	+/-175	150	350	200

**Приложение О**  
**ДРАЙВЕР УПРАВЛЕНИЯ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЕМ**  
**ФИРМЫ Linear Technology**

**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 автофокуса 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 автофокуса и зума в цифровых фотоаппаратах и видеокамерах. Допустимое напряжение питания в диапазоне от 2,7 до 10В позволяет использовать данную микросхему в цифровых камерах, питающихся как одного, так и от двух Li-ион аккумуляторов.

Микросхема LT3572s оснащена 900-миллиамперным повышающим преобразователем, который может отдавать ток до 50 мА при выходном напряжении 30 В при питании от одного Li-ион 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 4x4 мм, 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.

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

### **ИЗ ИСТОРИИ КАФЕДРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАТИКИ (до 2001 года АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ)**

Кафедра систем управления и информатики (до 2001 года автоматике и телемеханики) была образована в 1945 году как подразделение основанного в тот же год факультета Электроприборостроения ЛИТМО и именовалась кафедрой Электроприборостроения (№80). Основание кафедры связано с именем ее первого заведующего и первого декана факультета Электроприборостроения профессора Марка Львовича Цуккермана. Профессор М.Л. Цуккерман в 1913 году закончил электромеханический факультет Санкт-Петербургского политехнического института им. Петра Великого, в двадцатые годы организовал в Ленинграде отраслевую лабораторию электроизмерений (ОЛИЗ) и был известен в стране как крупный специалист в области систем телеизмерений. С 1933 по 1935 год профессор М.Л. Цуккерман руководит кафедрой «Автоматизации и телемеханизации» ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). С 1935 года профессор М.Л. Цуккерман вплоть до начала Великой отечественной войны находится в научной командировке в Европе.

В отличие от существовавших к тому моменту кафедр аналогичного профиля в ЛПИ им. М.И. Калинина и ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), на кафедру автоматике и телемеханики ЛИТМО была возложена задача подготовки специалистов по автоматизации приборостроительной, оптической и оборонной промышленности, автоматических систем управления, систем телемеханики и телеизмерений. Осенью 1945 года кафедра провела первый набор студентов по специальности электроприборостроение. В 1947 году кафедра претерпевает первое изменение своего названия, после которого называется кафедрой Автоматике и телемеханики (№80 вплоть до XX съезда КПСС). Первый выпуск инженеров-электромехаников по специальности «приборы автоматике и телемеханики» состоялся уже в 1948 году и составил 17 человек. По временной хронологии – это событие совпало в выходом в свет на английском языке известной книги Норберта Винера "Кибернетика или наука об управлении и связи в машинах, живых организмах

и обществах", в которой дается обоснование кибернетического подхода, выдвигающего на передний план информационное содержание природных, социальных и технических процессов и рассматривающего проблемы автоматического управления с точки зрения преобразования, передачи и использования информации. Советская научная общественность познакомится с этой книгой в переводе на русский язык только в 1958 году.

Профессор М.Л. Цуккерман руководил кафедрой с 1945 по 1959 год. К своей работе кафедра приступила, имея преподавательский состав, включавший профессора Д.И. Зорина, доцентов Е.А. Танского и Р.И. Юргенсона и заведующего лабораторией А.А. Мезерина. В пятидесятые годы в преподавательский состав кафедры вошли профессор А.А. Кампе-Немм, доцент Г.А. Тацитов, а также старшие преподаватели В.А. Борисов, В.Г. Новиков и В.В. Соколов. К концу пятидесятых годов преподавательский состав пополнился выпускниками ЛИТМО доцентом Н.М. Яковлевым, старшими преподавателями Л.Т. Никифоровой, Н.М. Перевозчиковым, Ю.Б. Ганту и ассистентом А.М. Шпаковым, а также доцентом Б.А. Арефьевым.

В 1955 году при кафедре образована научно-исследовательская лаборатория (НИЛ). В этот период основные направления научно-исследовательских работ представляли задачи автоматизации измерения и регистрации параметров кораблей во время их мореходных испытаний, а также стабилизации скорости и фазирования двигателей. Под научным руководством проф. М.Л. Цуккермана была налажена подготовка научных кадров высшей квалификации через систему аспирантуры.

С 1959 года по 1970 кафедру возглавлял ученик М.Л. Цуккермана, выпускник кафедры Автоматики и телемеханики ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина) 1936 года, доцент Евфимий Аполлонович Танский. За время его руководства профессорско-преподавательский состав пополнился старшим преподавателем Л.Л. Бориной, доцентами А.И. Новоселовым и И.П. Пальтовым, пришедшими из промышленности и высших военных учебных заведений, а также выпускниками кафедры, успешно закончившими обучение в ее аспирантуре, доцентами В.Н. Дроздовым, А.В. Ушаковым, В.А. Власенко, и ассистентом И.Н. Богоявленской. В этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук доценты Б.А. Арефьев и Р.И. Юргенсон. В научно-исследовательской работе на кафедре произошел заметный поворот к проблемам автоматизации оптико-механического приборостроения, что привело к длительному научно-техническому сотрудничеству кафедры с ЛОМО им. В.И. Ленина, в рамках которого для нужд оборонной техники была разработана целая гамма прецизионных фотоэлектрических следящих систем. В рамках научно-технического сотрудничества с НИИЭТУ кафедра приняла участие в разработке автоматической фототелеграфной аппаратуры, реализованной в виде комплекса "Газета-2".

С 1970 по 1990 год кафедрой руководил известный в стране специалист в области автоматизированного электропривода и фотоэлектрических следящих систем доктор технических наук, профессор Юрий Алексеевич Сабинин. В эти годы заметно изменилась структура дисциплин и курсов, читаемых студентам кафедры. К традиционным курсам "Теория автоматического регулирования и следящие системы", "Теория автоматического управления, экстремальные и адаптивные системы", "Элементы автоматики" и "Телемеханика" были добавлены дисциплины: "Теоретические основы кибернетики", "Локальные системы управления", "САПР систем управления" и другие. Коллектив преподавателей пополнился новым отрядом выпускников ее аспирантуры: доцентами Ю.Л. Тихоновым, В.В. Лаврентьевым, В.В. Григорьевым, В.В. Хабаловым, Л.С. Громовой, В.И. Бойковым, С.В. Быстрым, А.Б. Бушуевым, А.Н. Коровьяковым, И.В. Мирошником, Ю.П. Котельниковым, Г.И. Болтуновым, старшим преподавателем И.П. Салмыгиным. Из промышленности и других подразделений института пришли на кафедру доценты И.Ю. Рогинский, П.В. Николаев, И.П. Болтунов. Приобрела устойчивый характер система подготовки кадров высшей квалификации. В период с 1970 по 1990 защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук доценты И.П. Пальтов, В.В. Григорьев и В.Н. Дроздов. Более 40 человек успешно завершили обучение в аспирантуре.

Прикладные разработки кафедры были связаны с задачами адаптивной оптики для многоэлементных зеркал оптических телескопов и коррекции волнового фронта технологических лазеров; с задачами адаптивной радиооптики применительно к проблеме управления большими полноповоротными радиотелескопами; с задачами автоматизации обработки снимков в пузырьковых камерах; гребного электропривода и робототехнических систем, автоматического управления процессом мягкой посадки летательных аппаратов. Новый облик теории управления 1970 годов, внедрение метода пространства состояний и вычислительной техники, повышение математического уровня научных исследований нашли отражение в научных разработках кафедры, многочисленных трудах и монографиях. В эти годы интенсивно разрабатываются проблемы теории многомерных динамических систем, качественная теория устойчивости, методы согласованного и многорежимного управления, положено начало теоретическим работам в области робототехники. Научное руководство перечисленными работами осуществляли профессора кафедры Ю.А. Сабинин, В.Н. Дроздов, А.В. Ушаков, В.В. Григорьев и И.В. Мирошник.

С 1990 года по 1995 год кафедра переживает «смутное время» на уровне руководства ею, но не на уровне интеллектуальной обстановки в ее коллективе. Известно высказывание ректора НИУ ИТМО: «Интересно, на кафедре автоматики нет номинального заведующего вот уже столько лет и ни одного скандала». Лучшего комплимента кафедре не придумаешь. С 1990 года по 1992 обязанности заведующего кафедрой исполнял профессор

В.В. Григорьев, в 1992 году в результате проведенного конкурса заведующим кафедрой автоматики и телемеханики становится профессор Таганрогского радиотехнического института Анатолий Аркадьевич Колесников, известный специалист в области синергетики. К сожалению, по причинам личного характера он так и не покинул Таганрог и не приступил к руководству кафедрой автоматики и телемеханики ЛИТМО. В 1994 году его заведование руководством института приостанавливается, объявляется новый конкурс, в результате которого с 1995 года по 2010 кафедрой руководил ее воспитанник доктор технических наук, профессор Валерий Владимирович Григорьев, по инициативе которого в 2001 году кафедра получила название кафедры «Систем управления и информатики». В эти годы профессорско-преподавательский состав пополнился профессором Е.Ф. Очиным (1993–1996 годы), а также выпускниками аспирантуры ИТМО В.В. Черноусовым, А.П. Баевым, В.О. Никифоровым, М.С. Чежиным, А.В. Ляминим, А.А. Бобцовым и К.А. Сергеевым. Продолжала эффективно работать система подготовки кадров высшей квалификации, диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук защитили И.В. Мирошник, Р.О. Оморев, А.В. Ушаков, А.И. Скалон, В.О. Никифоров, А.А. Бобцов.

Помимо традиционной подготовки инженеров – электриков была начата подготовка бакалавров по направлению "Управление и автоматизация". С введением локальной сети и подключением к Интернет проведена модернизация компьютерного класса и учебных лабораторий. Научно-исследовательская работа ведется по целевым программам и конкурсным проектам РФФИ, Минобразования и Администрации Санкт-Петербурга. Завершилось формирование научной школы кафедры и ее основных направлений, возглавляемых профессорами В.В. Григорьевым, А.В. Ушаковым, И.В. Мирошником, В.О. Никифоровым и доцентом В.И. Бойковым. С целью расширения исследований, проводимых по теории нелинейных и адаптивных систем, роботов и микропроцессорной техники, а также активизации подготовки кадров в 1994 году образована научная лаборатория Кибернетики и Систем управления (руководитель проф. И.В. Мирошник). С 1994 года существенно расширились международные контакты кафедры, участие в международных научных мероприятиях, организации конференций и симпозиумов. Профессора кафедры В.В. Григорьев, И.В. Мирошник, А.В. Ушаков, а позднее и В.О. Никифоров становятся действительными членами (академиками) Международной Академии нелинейных наук.

В феврале 2010 года заведующим кафедрой Систем управления и информатики был избран выпускник кафедры 1996 года декан факультета компьютерных технологий и управления, доктор технических наук, профессор Алексей Алексеевич Бобцов. А.А. Бобцов является также председателем Совета молодых ученых и специалистов при Правительстве Санкт-Петер-

бурга, действительным членом академии Навигации и управления движением и членом научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации.

В последние годы профессорско - преподавательский состав кафедры пополнился молодыми кадрами: доцентами А.С. Кремлевым, С.А. Чепинским (выпуска кафедры 2002 года), Н.А. Дударенко, О.С. Нуйей (Осипцевой), Н.А. Николаевым, О.В. Слитой (выпуска кафедры 2003 года), Д.Н. Герасимовым (выпуска кафедры 2005 года), С.В. Арановским, А.А. Блинниковым (выпуска кафедры 2006 года), М.В. Сержантовой (Поляковой) (выпуска кафедры 2007 года), А.А. Пыркиным (выпуска кафедры 2008 года), С.А. Коллюбиным (выпуска кафедры 2010 года), А.А. Капитоновым и С.В. Шаветовым (выпуска каф К участие в подготовке магистров подключились профессора из Санкт-Петербургских университетов А.Л. Фрадков, Б.Р. Андриевский, В.Ю. Тертычный и И.Б. Фуртат.

Продолжает эффективно работать система подготовки кадров высшей научной квалификации, диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук защитил в 2013 году выпускник кафедры 1998 года Мельников В.Г.

В настоящее время кафедра является одним из ведущих российских научных и образовательных центров, ориентированным на фундаментальные и прикладные исследования в области автоматических систем и прикладной информатики, подготовку высококвалифицированных специалистов XXI столетия. На кафедре функционируют четыре научно-исследовательские группы: «Технической кибернетики» (основатель профессор И.В. Мирошник, научный руководитель профессор А.А. Бобцов), «Автоматизированного оптоэлектронного мониторинга технических объектов и комплексов» (основатели профессор Ю.А. Сабинин и доцент П.В. Николаев, научные руководители – доцент В.И. Бойков и профессор А.В. Ушаков) и «Технической информатики и телемеханики (основатель профессор М.Л. Цуккерман, научный руководитель профессор А.В. Ушаков), «Интеллектуальной робототехники» (основатель и научный руководитель профессор А.А. Бобцов). Усилиями ученых кафедры на кафедре создана научная школа «Управление в условиях системных неопределенностей», при кафедре вот уже второе десятилетие проводятся ежегодные «Крещенские научные чтения», имеющие статус городского семинара по теории управления. Памятным событием в юбилейный год кафедры стала защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук выпускником кафедры 2008 года тридцатилетним Антоном Александровичем Пыркиным, ставшим в 2016 году деканом факультета Систем управления и робототехники.

Ученые кафедры издают монографии, печатаются в журналах академий наук РФ и стран бывшего СССР, отраслевых журналах, известиях выс-

ших учебных заведений, а также зарубежных журналах и трудах международных конференций. Сотрудниками кафедры опубликовано более 120 монографий и учебников, 250 методических и учебных пособий, 3500 статей, из них более 380 в журналах академий наук, около 300 статей и докладов в зарубежных научных изданиях. Ученые кафедры являются авторами более 600 изобретений, постоянно принимают участие в работе российских и зарубежных семинаров, конференций и конгрессов. Кафедра поддерживает контакты с 20 техническими зарубежными университетами.

Кафедра осенью 2015 года отметила свое семидесятилетие и шагнула в будущее. На восьмом десятке своего существования кафедра систем управления и информатики представляет собой работоспособный коллектив, полный новых идей и творческих планов.

А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, П.В. Карев  
**ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ  
ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49