

50-ЛЕТИЮ МИЭМ ПОСВЯЩАЕТСЯ

ВВЕДЕНИЕ

Микроминиатюризация изделий и повышение их качества во многих областях современной техники поставили задачу обеспечения сверхточного позиционирования функциональных механизмов при выполнении установочных перемещений, в том числе по нескольким координатам одновременно. Сверхмалая, с точки зрения механики, длительность процессов в автоматизированном технологическом и аналитическом оборудовании (от 100 мс до 0,1 мс и менее) предъявляет жёсткие требования к динамическим параметрам модулей линейных перемещений.

Во многих случаях, эти модули должны работать в вакуумной среде, которая создает проблемы даже при обычных диапазонах позиционирования. Использование пьезопроводов в вакууме позволяет обходиться без дополнительных устройств передачи движения через герметичную стенку, т.е. проблема создания ввода в вакуумный объём отпадает сама собой.

В нанотехнологии перемещение и позиционирование связано с малыми размерами. В современном технологическом и аналитическом оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений, в частности, устройства на пьезопреобразователях, т.н. пьезосканеры, отличительной особенностью которых является их безынерционность. Принцип их действия основан на преобразовании электрической энергии в механическую.

Для пьезосканеров характерны: микроперемещения с погрешностью не более $\pm 0,1$ нм; высокая чувствительность и плавность перемещений,

высокое быстродействие (постоянная времени срабатывания пьезосканера составляет не более 0,2 мс); возможность реверсивных перемещений. При работе пьезосканера не происходит его нагрева и влияния температурных деформаций на точность перемещения.

Важным моментом применения пьезосканеров в нанотехнологическом оборудовании является линейная зависимость их перемещений от приложенного напряжения, то есть простота управления процессом перемещения.

Широкое внедрение пьезосканеров сдерживается сложностью их проектирования и отсутствием способов оценки конструкций на отдельных стадиях проектирования.

В настоящей монографии рассмотрены основные конструкции и применения пьезоэлектрических приводов, приведены модели их функционирования. Особое внимание уделено разработке пьезопроводов, работающих в условиях вакуума. Приведены перспективные конструкции устройств, содержащих пьезопроводы.

Весьма перспективным при создании сканеров для зондовых микроскопов является использование эффекта магнитострикции. В монографии рассмотрен данный эффект, а также некоторые технические решения приводов, функционирующих на его основе.

Издание предназначено для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами микро- и наноинженерии в электронном машиностроении.

Настоящая монография может быть также рекомендована аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и наноэлектроника» профиля подготовки «Микро- и наноинженерия в электронике».

Коллектив авторов благодарит к.т.н. Земскова Олега Владимировича и к.т.н. Павлова Александра Юрьевича за помощь в подготовке данной монографии.

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ПРЕЦИЗИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА

1.1. Пьезосканеры в приборостроении

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять перемещения зонда в плоскости образца с высокой точностью (на уровне долей нанометра). В настоящее время смещения малых величин достигаются с помощью электромеханических преобразователей движения на основе обратного пьезоэлектрического эффекта – пьезоэлектрических приводов или актюаторов. Обеспечивая перемещение от единиц до сотен микрометров с высокой точностью до 0,1 нм, они способны развивать усилия до 50 кН и находят применение в различных областях технологии приборостроения (электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности). Другие области применения пьезоэлектрических приводов следующие: прецизионная техника – современные пневматические и гидравлические клапаны с быстродействием до 10 мкс; интеллектуальное управление работой двигателя внутреннего сгорания (предварительный впрыск топлива в двигателях автомобилей и последующее управление аналоговой схемой основного впрыска); системы оптической оптоволоконной линии связи (стыковка и подстройка оптических волокон, волоконных лазеров); прецизионный контроль и точное позиционирование технологического оборудования в различных областях производства и технологии приборостроения; автоюстировка и подстройка лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики; управление и

компенсация вибрации станков, транспортных средств (активное демпфирование вибрации рамы самолетов) и т.д.

Пьезоэлектрические элементы, используемые в актюаторах, могут работать также в колебательном режиме при подаче переменного напряжения в звуковом и ультразвуковом интервалах частот. Преобразование этих колебаний в направленное движение позволяет создавать пьезоэлектрические движители.

Основным элементом сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), который и обеспечивает возможность работы прибора в режимах атомных разрешений, является пьезосканер. Сканеры СЗМ изготавливают из поликристаллических пьезоэлектрических материалов, которые с одной стороны обеспечивают высокую жесткость конструкции, а с другой – возможность перемещения на весьма малые расстояния, вплоть до единиц ангстрем. Современное состояние СЗМ таково, что возникла необходимость перехода от чисто качественных измерений поверхностных структур к количественным, метрологически выверенным измерениям, что требует углубленного изучения поведения пьезокерамических материалов, используемых для изготовления сканеров, разработки методов прецизионных измерений и, метрологической аттестации и коррекции пьезосканеров. Причем, для процедур литографии необходимы сканеры с ортогональностью в плоскости на уровне лучше десятых долей процента. Если неортогональность в плоскости еще допустимо исправлять методами программной коррекции, то неортогональность в плоскости оси Z , которая в некорректированной керамике может достигать десятков градусов, недопустима, так как приводит к тому, что низкая боковая частота сканера начинает быть существенной для работы петли обратной связи, что существенно снижает качество работы прибора. Именно эти обстоятельства привели к необходимости углубленного изучения свойств сканера и разработки технологии их коррекции на физическом уровне.

1.2. Схемы пьезоэлектрических приводов

Основное отличие пьезоэлектрических приводов от известных устройств, в которых колебательное движение ведущего звена превращается во вращательное или поступательное движение ведомого звена (например, в храповых и импульсных передачах, механизмах свободного хода, вибротранспорте и т. п.) состоит в их частотном диапазоне. Если частотный диапазон храповых импульсных передач не превышает нескольких сотен герц, то у пьезоэлектрических приводов он на несколько порядков выше. Так, например, рабочая частота одного из механизмов составляет 20000 Гц, и это не является пределом. Такие высокие частоты приводят к качественному изменению ряда параметров устройств, а также к новым явлениям, не наблюдаемым в низкочастотных механизмах.

Для большинства пьезоэлектрических приводов амплитуды колебаний преобразователей весьма малы – лежат в диапазоне $0,1 \cdot 10^{-3} \div 1,0 \cdot 10^{-3}$ мм. Предельные значения составляют, амплитуды в $0,1 \div 0,2$ мм, применяемые в быстроходных устройствах.

Существует большое разнообразие возможных схем пьезоэлектрических приводов [1], которые, однако, могут быть представлены следующими типами динамических моделей:

1. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на фрикционной анизотропности контакта колеблющегося элемента и вращаемого ротора или транспортируемой поверхности (рис. 1.1) с частотным диапазоном от нескольких сотен герц до нескольких мегагерц.

Характерным признаком данной группы устройств является невозможность реверсирования движения без изменения угла.

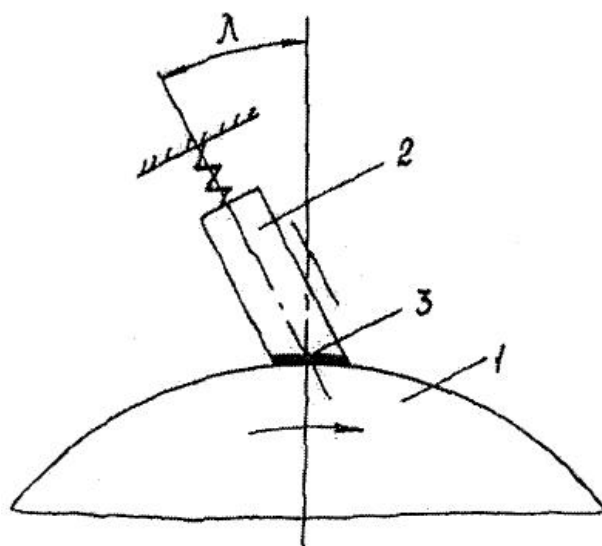


Рис. 1.1. Схема работы пьезоэлектрических приводов, основанных на фрикционной анизотропии контакта колеблющегося элемента и перемещаемой поверхности: 1 – вращаемое тело; 2 – колеблющийся элемент, совершающий продольные колебания; 3 – контактирующий элемент из специального материала

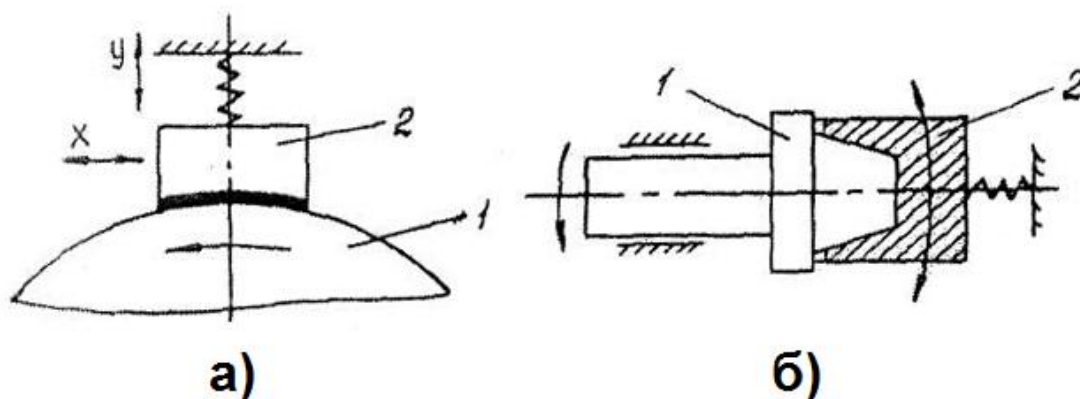


Рис. 1.2. Схемы пьезоэлектрических приводов 2-й группы: а) элемент, совершающий колебания по осям x и y с одинаковой частотой, но со сдвигом фаз; б) элемент 2, совершает крутильные и поступательные колебания.

2. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на создании различия в пределах одного цикла нормальных реакций, достигаемого положением дополнительных периодических воздействий колеблющихся элементов и ротора. Конструктивно пьезоэлектрические приводы данной группы выполняются в виде упругих систем, совершающих продольно поперечные колебания (рис. 1.2). Обязательным условием является сдвиг фаз движений по двум осям. Изменение знака сдвига фазы осуществляется реверсированием движения. Частотный диапазон приводов данной группы соответствует частотному диапазону приводов 1-й группы.

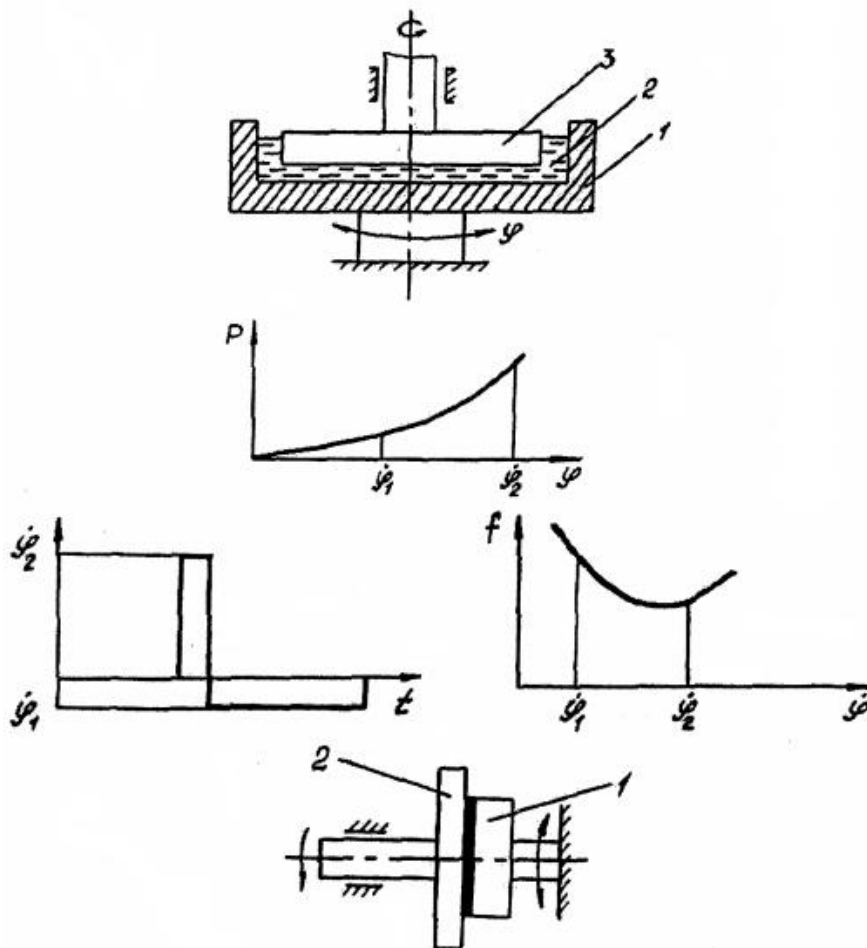


Рис. 1.3. Схемы пьезоэлектрических приводов с асимметрическими колебаниями колеблющегося элемента колебательных систем, совершающих предельно-крутильные колебания и т.п.

3. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на применении асимметрических циклов колебаний с одновременным использованием нелинейных свойств жидкости, зависимости сил трения от скорости и т.п. Так, например, используя линейную зависимость демпфирования в реальной жидкости от скорости и сообщая колеблющемуся элементу ассиметрические крутильные колебания (рис. 1.3), можно обеспечить непрерывность вращения ведомого звена. В такой схеме используется зависимость коэффициента трения от скорости.

4. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на периодически изменяемой связи между колеблющимся элементом и ротором. В качестве такой связи могут быть использованы материалы с управляемым коэффициентом трения, магнито- и электровязкие жидкости (т.е. жидкости, изменяющие свою вязкость в зависимости от величины приложенного магнитного или электрического поля, материалы, меняющие свою вязкость в ультразвуковом поле и т.п.)

5. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на фрикционном взаимодействии волновых движений преобразователя и перемещаемого тела. При этом используются несколько способов генерирования волн: применение фазосдвигающих цепочек, периодическое изменение фазы несущего высокочастотного напряжения, периодическое изменение граничных условий упругого звена применение нескольких преобразователей с различными частотами и т.п.

В зависимости от статических и динамических параметров пьезоэлектрические приводы 1-й и 2-й групп могут работать в трех динамически устойчивых режимах. В 1-м режиме контакт между колеблющимся элементом и перемещаемой поверхностью сохраняется во время всего цикла колебаний, т.е. колебания происходят в пределах упругости поверхностного слоя, а во 2-м – нарушается, т.е. система работает в виброударном режиме. При этом наблюдаются устойчивые

области параметров системы, при которых устанавливаются n -кратные периодические ударные колебания, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Режимы движения с $n > 1$ наблюдаются вплоть до $n = 8$. Они являются нежелательными, так как снижают КПД привода. 3-й режим характеризуется наличием между колеблющимся элементом и поверхностью тела сжимаемой воздушной подушки толщиной в несколько микрон. В данном случае силовое замыкание контакта также нарушается. В пьезоэлектрических приводах 2-й группы работоспособность сохраняется и в этом режиме. Это объясняется движением пленки с определенной скоростью в самом зазоре, увлекающей за собой перемещаемое тело. Такой режим исключает износ в виду отсутствия поверхности контакта звеньев. Угловую и линейную скорость пьезоэлектрических приводов можно менять путем изменения амплитуды или частоты колебаний преобразователей. К другим способам изменения скорости можно отнести, например, изменение угла λ для приводов 1-й группы, изменение фазы колебания по осям x и y для приводов 2-й группы, изменение характеристики промежуточного элемента для приводов 4-й группы и т.п.

Классификация пьезоэлектрических приводов основана на общей структурной схеме (рис. 1.4). Генератор электрических колебаний с несколькими выходами, отличающимися как по частоте, так и по фазе, подключен к управляющему устройству 2, осуществляющему соответственно с сигналом управления $H'(t, x, y)$ коммутацию и модуляцию электрического напряжения, поступающего в электроды вибропреобразователей.

Сигнал управления H' может зависеть не только от времени, но и от координат и скоростей подвижного звена привода

$$[x_i] = [X, Y, Z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^T,$$

где X, Y, Z – перемещения подвижного звена по направлениям координатных осей, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – повороты относительно тех же осей.

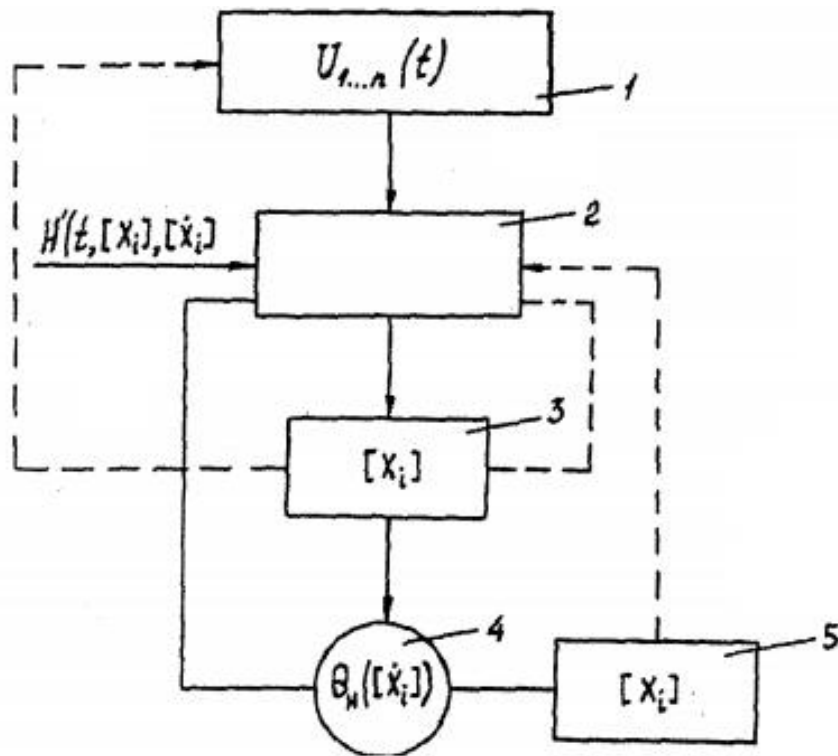


Рис. 1.4. Общая структурная схема пьезоэлектрического привода

Вибропреобразователь трансформирует электрическое напряжение в поступательные или крутильные колебания. Благодаря управляемой или неуправляемой нелинейности 4 в зоне контакта колебания вибропреобразователей преобразуются в перемещения подвижного звена 5.

Показанные на рис. 1.4 обратные связи реализуются между:

а) преобразователями 3 и генератором 1 – для стабилизации колебаний при действии различных дестабилизирующих факторов: старения, износа, температурных воздействий и т.п.;

б) преобразователями 3 и блоком управления 2 – при управлении по ускорению и силам в контакте;

в) подвижным звеном 5 и блоком управления 2 – для стабилизации скорости при позиционировании, для создания оптимальных законов движения и т.п.

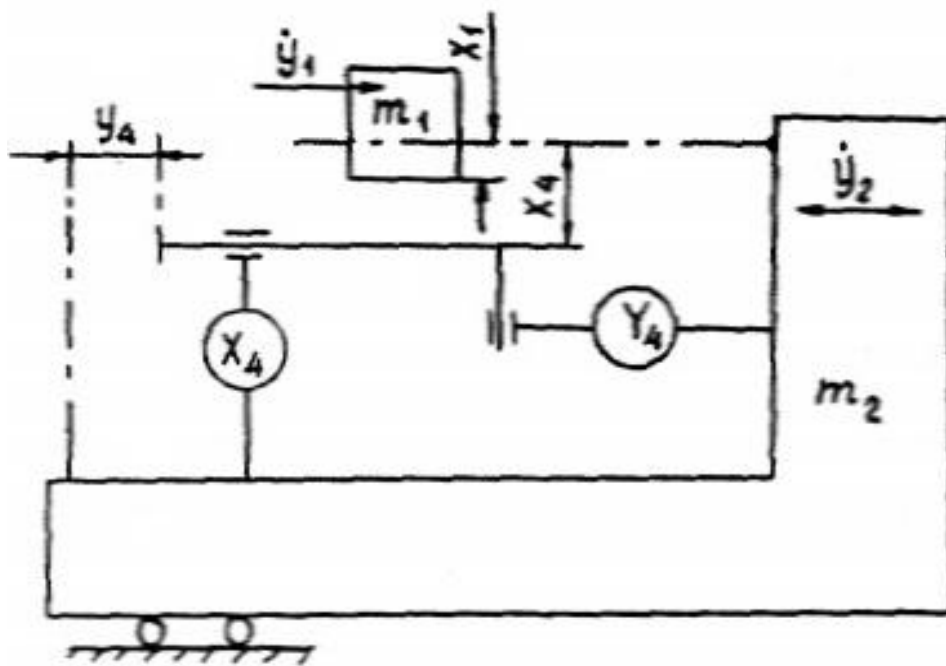


Рис. 1.5. Модель виброударного двигателя: m_1 и m_2 – массы соударяющихся тел; x_1 и x_2 – перемещения по нормали поверхностей соударяющихся тел из положения равновесия поверхности тела 2; y_1 и y_2 – скорости движения соударяющихся тел по касательной; y_4 – деформация поверхности тела 2 по касательной; X_4 и Y_4 – реакции поверхности тела 2 соответственно по нормали и касательной

Пьезоэлектрические приводы можно подразделять также на следующие группы:

1. По виду нелинейности (соответствующие, одностепенные, динамические модели);
2. По виду движения: вращательного, поступательного и сложного;
3. По режиму движения: с погружением и без погружения контакта между преобразователем и подвижным звеном, режим сжимаемой подушки;
4. По характеру движения:

- а) непрерывное движение подвижного звена;
 - б) шаговое;
 - в) старт-стопное;
- 5.** По способу управления скоростью подвижного звена:
- а) с амплитудной модуляцией колебаний;
 - б) с частотной модуляцией колебаний;
 - в) с фазовой модуляцией колебаний;
 - г) с изменением параметров управляемой нелинейности;
- 6.** По возможности изменения знака скорости:
- а) реверсивные;
 - б) нереверсивные;
- 7.** По количеству степеней подвижности;
- 8.** По наличию обратной связи.

Наряду с основными можно рассматривать и ряд других признаков.

Вибропреобразователь является основной частью пьезоэлектрического привода и определяет его параметры – рабочую частоту, механическую характеристику, мощность, динамическое качество переходных режимов движения.

Вибропреобразователи изготавливаются из материалов промышленной пьезокерамики. Характеристики и свойства промышленных составов пьезокерамических материалов регламентируются стандартами. Наиболее широко используется пьезокерамика типа ЦТС, ПОД, ПРК.

В случае силового режима, характерного для пьезоэлектрического привода, наряду с высокими значениями пьезомодуля и коэффициента электромеханической связи, материалы должны иметь широкий диапазон механической добротности (высокая добротность – для приводов непрерывного движения, низкая – для шаговых и старт-стопных режимов)

и низкие диэлектрические потери. Важна динамическая прочность материала, так как при работе пьезоэлектрического привода в преобразователе возникают сложные большие механические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Проектирование пьезоэлектрических приводов происходит в два этапа:

1) расчет параметров преобразователя, согласованного с генератором и обеспечивающего требуемые формы колебаний и режимы движения;

2) расчет параметров нелинейной системы преобразователь-ротор (или ползун), обеспечивающей заданные и скоростные характеристики привода.

Такое расчленение на этапы не является точным, так как режим движения преобразователя зависит от динамических процессов, происходящих в системе преобразователь-ротор. Однако такой подход к определению параметров привода позволяет существенно упростить процесс расчета. Кроме того, второй этап расчета иногда может быть сведен к изучению известных динамических моделей, что позволяет заранее предугадать характер динамических явлений и оценить устойчивость движения.

Высокие частоты колебаний и малые их амплитуды приводят к необходимости учитывать реологические свойства соударяющихся пар в пьезоэлектрических приводах, работающих в ударном режиме. Следует учитывать, что даже для одного и того же типа привода, в случае возбуждения вибропреобразователя на нескольких частотах, реологические модели контактной зоны могут быть различны для разных частот. Это относится и к работе одного и того же привода в различных режимах, например, непрерывном или шаговом.

Области применения пьезоэлектрических приводов определяются положительными сторонами: высокая разрешающая способность (до

10^{-7} рад), малая постоянная времени (время переходных процессов составляет единицы миллисекунд), широкий диапазон регулирования скорости (до $v_{max}/v_{min} = 10^6$), фиксация положения подвижного звена при отключении питания, малые габариты и масса.

С помощью пьезоэлектрических приводов можно достичь высокой равномерности перемещения или вращения ротора, так как отсутствуют такие характерные источники колебаний скорости, как крутильные колебания электродвигателей, погрешности редукторных элементов, переменная составляющая момента сопротивления вращению опор, биения и др. источники возмущения.

Пьезоэлектрические приводы можно успешно применять в системах, работающих на вибрирующем основании (при соблюдении условий балансировки подвески колеблющегося звена).

Эксплуатация приводов возможна в температурном диапазоне от абсолютного нуля до точки Кюри пьезоактивных материалов (т.е. $250\div 450^\circ\text{C}$), а также в вакууме и открытом космосе.

Сильные магнитные и радиационные поля не влияют на работу вибродвигателей.

Рассмотренные преимущества пьезоэлектрических приводов позволяют наиболее целесообразно их использовать в прецизионном оборудовании электронной техники.

1.3. Морфологический анализ пьезоэлектрических приводов

С учётом анализа, проведенного выше, может быть предложена морфологическая таблица. В качестве примера рассмотрим часть этой таблицы (табл.1.2).

Выделим группы признаков пьезоэлектрических приводов (табл. 1.1):

Таблица 1.1

Основные группы признаков пьезоэлектрических приводов

Характер движения	Непрерывное движение подвижного звена, шаговое, старт-стопное
Вид движения	Вращательное, поступательное, сложное
Режим движения	С погружением и без погружения контакта между преобразователем и подвижным звеном режим сжимаемой подушки
Способ управления скоростью подвижного звена	С амплитудной модуляцией колебаний, с частотной модуляцией колебаний, с фазовой модуляцией колебаний, с изменением параметров управляемой нелинейности
Возможность изменения знака скорости	Реверсивные, нереверсивные
Количество степеней свободы	1,2,3 и т.д.
Наличие обратной связи	Нет, есть
Функциональное назначение устройства	Передача линейного движения, передача вращательного движения и т.д.
Взаимосвязь пьезоэлементов	Биморф, биметалл, пьезоэлемент и т.п.
Рабочая среда	Вакуум, атмосферные условия и т.п.
Вид деформации	Продольный, изгиб и т.п.

Таблица 1.2

Морфологическая таблица пьезопроводов

Название патента	Устройство для прецизионного перемещения изделий	Механизм прямолинейного перемещения деталей
Основные элементы	1 – стол, 2 – направляющая, привод выполненный в виде шести пьезопреобразователей – 3,4,5,6,7,8	1 – корпус, 2 – стержень на опорах 3, 4 – ИП
Блок питания	Есть	Есть
Вид деформации	Уменьшение или увеличение в длине пьезопреобразователей	Изгиб опор за счёт уменьшения или увеличения в длине бипластин
Блок управления	Изменение амплитуды управляющего напряжения на преобразователях обеспечивает перемещение	Подача напряжения регулируемой величины. При подаче напряжения на бипластину она или увеличивается или уменьшается в длине, что приводит к изгибу пластины и, соответственно, к перемещению стержня
Координатные оси	Перемещение по 6-ти координатам – трём линейным и трём угловым	Строго прямолинейное перемещение
Функциональное назначение устройства	Прецизионное перемещение изделий	Прямолинейное перемещение детали
Взаимосвязь пьезоэлементов	Биморфы	Используются либо биметаллические пластины либо бипластины
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	Вакуум

Таблица 1.2 (продолжение)

Название патента	Приводное устройство	Гаситель колебаний
Основные элементы	1 – выходной вал, 2 – круглое неподвижное основание, 3 – радиально деформ. пьезоэл., установленные на основании, 4 – жесткое колесо, 5 – задающее устройство, 6 – ИП	1 – масса, 2 – упругая балка, 3 – демпфируемый объект, 4 – пьезокерамические пластины, 5 – ИП
Блок питания	Есть	Есть
Вид деформации	Увеличение длины диаметрально противоположных пьезоэлементов в радиальном направлении	Деформации балки в поперечном направлении за счёт уменьшения и увеличения длины пьезокерам. пластин
Блок управления	Эл. напряжение подаётся на противоположные пьезоэлементы. Наружняя часть всего ряда пьезоэл. принимает овальную форму и вступает в контакт с колесом. В рез. обкатывания овала жёсткое колесо приобретает угл. скорость	Путём коррекции, напряжение на пьезокерам. пластинах устанавливается такой величины, которое позволяет изменять жесткость балки и настраивать гаситель на частоту вынужденных колебаний
Координатные оси	Вращательное движение	
Функциональное назначение устройства	Привод	Гаситель колебаний
Взаимосвязь пьезоэлементов	Пьезоэлементы распределены по окружности и жестко соединены между собой своими боковыми сторонами	На упругой балке жестко закреплены пьезокерам. пластины. Продольные оси упругой балки и пластин ортогональны
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	

Таблица 1.2 (продолжение)

Название патента	Манипулятор	Подложкодержатель с гасителем колебаний
Основные элементы	1 – скрученная в спираль лента, 2 – основание, 3 – платформана которой установлены три ленты 4, 5 – схват, 6 – пьезоэл. пластины, 7 – ИП, 8 – БУ	1 – корпус, 2 – прижим-фиксатор, 3 – подложка, 4 – основание, 5 – стойка, 6 – дополнительная масса, 7 – криволинейные пружины
Блок питания	Есть	Нет
Вид деформации	Пьезоэлементы прикреплены к лентам и образуют биморф. В результате при подаче напряжения на пьезоэлемент лента 1 скручивается, 4 совершает поступательные движения, а схват 5 сжимается или разжимается	
Блок управления	Источник питания подаёт напряжение через БУ на пьезоэлектрические пластины	
Координатные оси		
Функциональное назначение устройства	Манипулятор	
Взаимосвязь пьезоэлементов		
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	

Идея использования морфологической таблицы состоит в следующем:

1. Из созданной морфологической таблицы выбираются приводы, удовлетворяющие техническому заданию.

2. Генерируются новые приводы (посредством обычной комбинации альтернатив признаков), после чего оцениваются по критериям и заносятся обратно в таблицу. Породить можно огромное число изделий. Повторяют эту процедуру до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение.

1.4. Разнообразие пьезоэлементов

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять перемещения зонда в плоскости образца с высокой точностью (на уровне долей ангстрема). Эта задача решается с помощью специальных манипуляторов - сканирующих элементов (пьезосканеров). Сканирующие элементы зондовых микроскопов могут быть изготовлены из пьезоэлектриков – материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрики изменяют свои размеры во внешнем электрическом поле. Уравнение обратного пьезоэффекта для кристаллов записывается в виде [2]

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k ,$$

где u_{ij} – тензор деформаций; E_k – компоненты электрического поля; d_{ijk} – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов.

Вид тензора пьезоэлектрических коэффициентов определяется типом симметрии кристаллов.

Рассмотрим плоскую пластину из пьезокерамики (рис. 1.6) во внешнем поле [2]. Пусть вектор поляризации \vec{P} и вектор электрического поля \vec{E} направлены вдоль оси X . Тогда, обозначая $d_{//} = d_{33}$ и $d_{\perp} = d_{31}$, получаем, что деформации пьезокерамики в направлении параллельном полю равна $u_{xx} = d_{//} \cdot E_x$, а в перпендикулярном полю направлении $u_{yy} = d_{\perp} \cdot E_x$.

Широкое распространение получили трубчатые пьезоэлементы (см. рис. 1.7). Они позволяют получать достаточно большие перемещения объектов при относительно небольших управляющих напряжениях. Трубчатые пьезоэлементы представляют собой полые тонкостенные цилиндры, изготовленные из пьезокерамических материалов.

Обычно электроды в виде тонких слоев металла наносятся на внешнюю и внутреннюю поверхности трубки, а торцы трубки остаются непокрытыми.

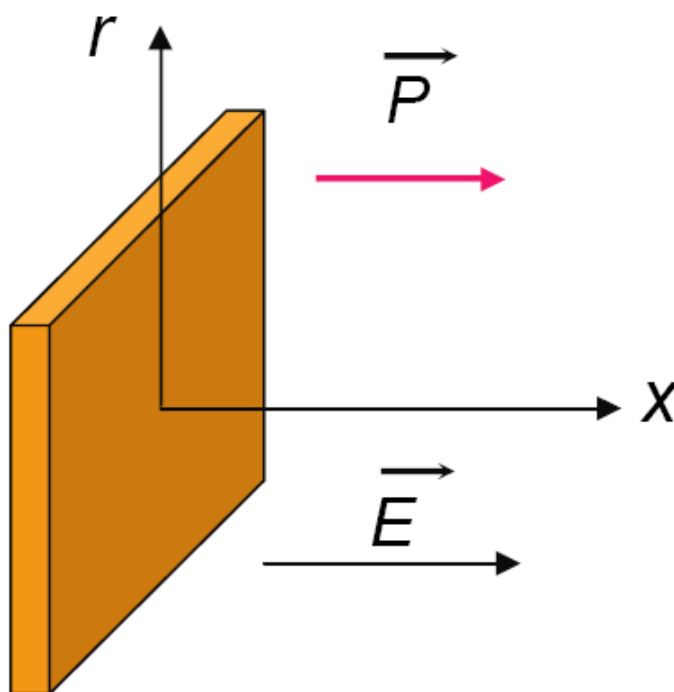


Рис. 1.6. Пластина из пьезокерамики во внешнем электрическом поле

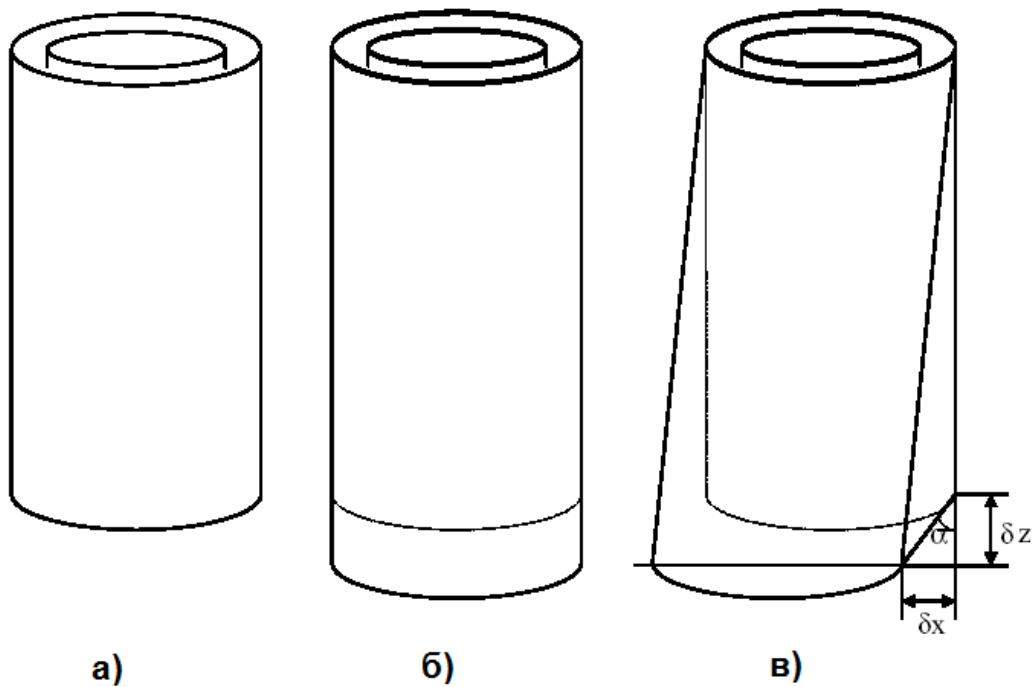


Рис. 1.7. Сканер и его работа:

- а – общий вид сканера до приложения напряжения,
- б – идеальная работа сканера,
- в – реальная работа сканера

Трубка изменяет свои продольные размеры под действием разности потенциалов между внутренним и внешним электродами. В этом случае продольная деформация под действием радиального электрического поля может быть записана в виде

$$u_{xx} = \frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r,$$

где l_0 – длина трубки в недеформированном состоянии.

Абсолютное удлинение пьезотрубки равно

$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V,$$

где h – толщина стенки пьезотрубки, V – разность потенциалов между внутренним и внешним электродами.

Таким образом, при одном и том же напряжении V удлинение трубки будет тем больше, чем больше её длина и чем меньше толщина стенки.

Соединение трёх трубок в один узел (рис. 1.8) позволяет организовать прецизионные перемещения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Такой сканирующий элемент называется триподом. Недостатками такого пьезосканера являются сложность изготовления и сильная асимметрия конструкции.

На сегодняшний день наиболее широко используются пьезосканеры, изготовленные на основе одного трубчатого элемента (см. рис. 1.9).

Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

Внешний электрод обычно сплошной. Внутренний электрод сканера разделен по образующим цилиндра на четыре секции. При подаче противофазных напряжений на противоположные секции внешнего электрода (относительно внутреннего) происходит сокращение участка трубки в том месте, где направление поля совпадает с направлением поляризации, и удлинение там, где они направлены в противоположные стороны.

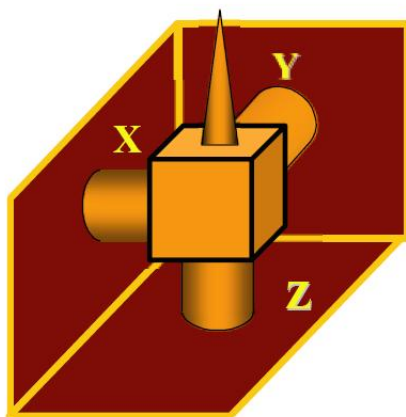


Рис. 1.8. Сканирующий элемент в виде трипода, собранный на трубчатых пьезоэлементах

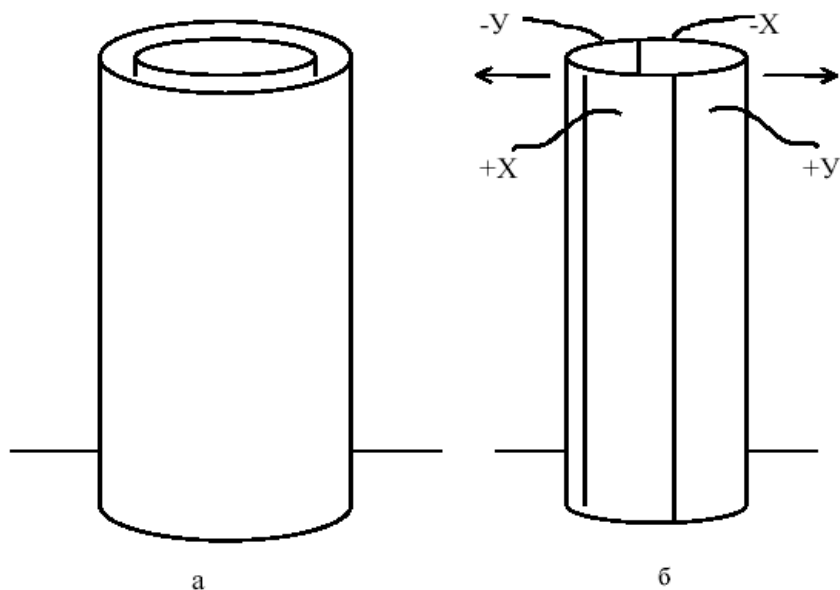


Рис. 1.9. Схематическое изображение сканера:

а – внешний вид сканера; б – внутренняя трубка

Это приводит к изгибу трубки в соответствующем направлении. Таким образом, осуществляется сканирование в плоскости XU . Изменение потенциала внутреннего электрода относительно всех внешних секций приводит к удлинению или сокращению трубки по оси Z . Таким образом, можно реализовать трехкоординатный пьезосканер на базе одной пьезотрубки. Реальные сканирующие элементы имеют часто более сложную конструкцию, однако принципы их работы остаются теми же самыми [2].

Широкое распространение получили также пьезосканеры на основе биморфных пьзоэлементов.

Биморф представляет собой две пластины пьезоэлектрика, склеенные между собой таким образом, что векторы поляризации в каждой из них направлены в стороны, противоположные подаваемому полю (рис. 1.10).

Если подать напряжение на электроды биморфа, как показано на рисунке, одна из пластин будет расширяться, а другая сжиматься, что

приведёт к изгибу всего элемента. В реальных конструкциях биморфных элементов создается разность потенциалов между внутренним общим и внешними электродами так, чтобы в одном элементе поле совпадало с направлением вектора поляризации, а в другом было направлено противоположно.

Изгиб биморфа под действием электрических полей положен в основу работы биморфных пьезосканеров. Объединяя три биморфных элемента, можно реализовать трипод на биморфных элементах (рис. 1.11).

Если внешние электроды биморфного элемента разделить на четыре сектора, то движение зонда по оси Z и в плоскости XU можно организовать на одном биморфном элементе (рис. 1.12).

Действительно, подавая противофазные напряжения на противоположные пары секций внешних электродов, можно изгибать биморф так, что зонд будет двигаться в плоскости XU (см. рис. 1.12,а,б). Изменяя потенциал внутреннего электрода относительно всех секций внешних электродов, можно прогибать биморф, перемещая зонд в направлении Z (см. рис. 1.12,в,г).

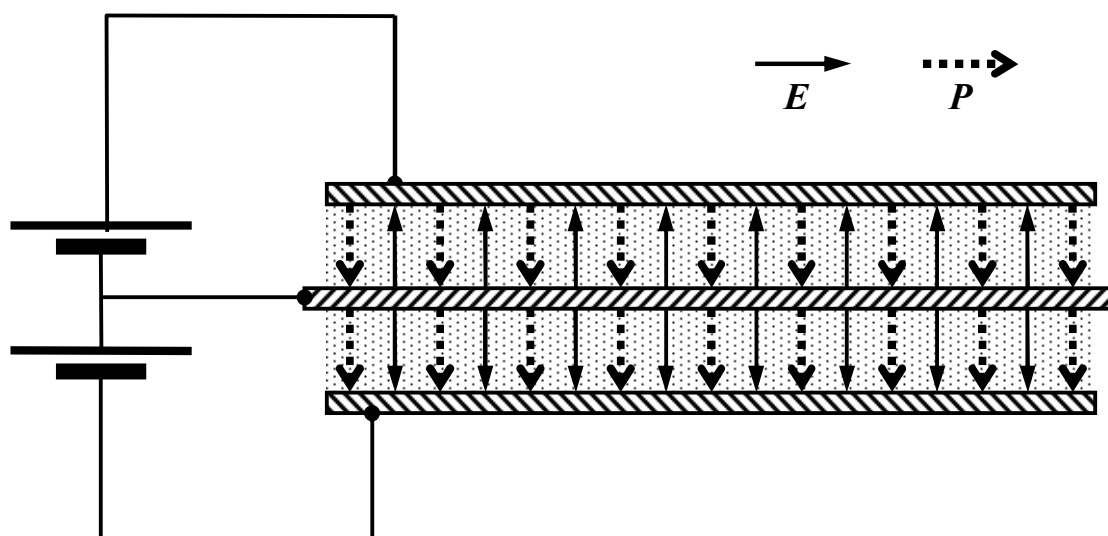


Рис. 1.10. Устройство биморфного пьезоэлемента

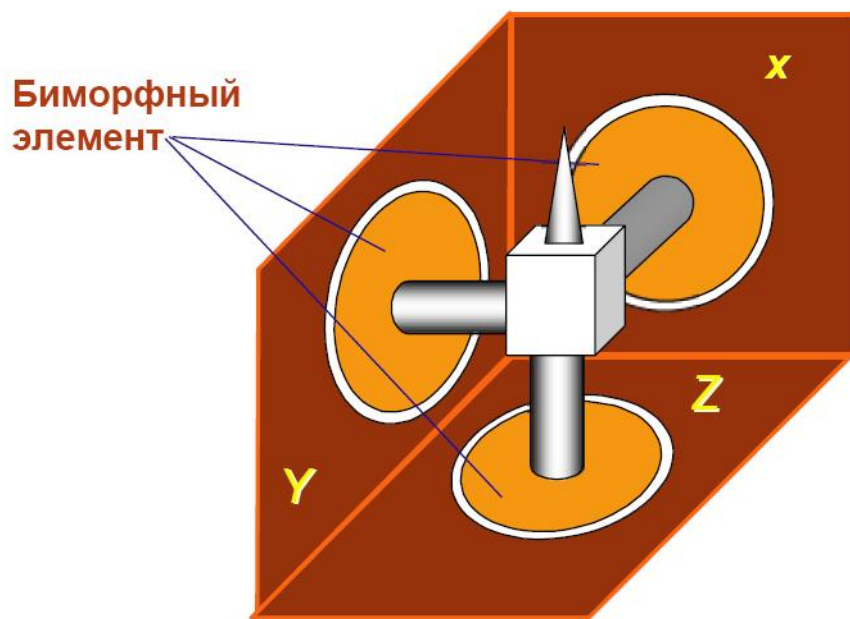


Рис. 1.11. Трёхкоординатный сканер на трёх биморфных элементах

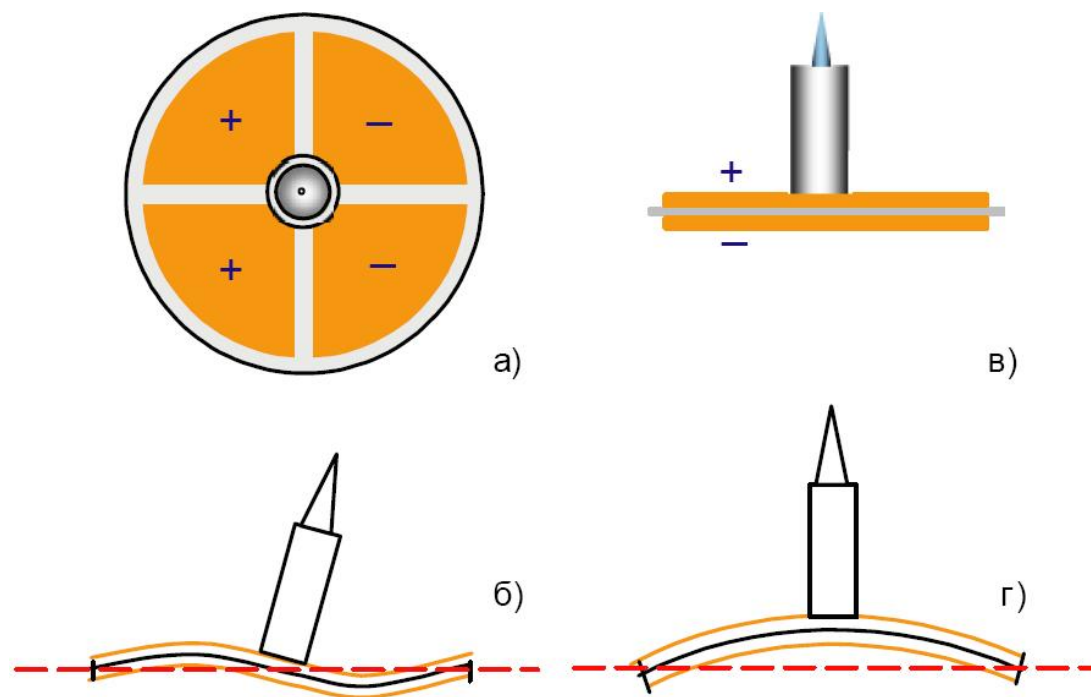


Рис. 1.12. Схематическое изображение работы биморфного пьезосканера

1.5. Пьезоэлектрический сканер зондового микроскопа

Практически во всех сканирующих зондовых микроскопах пьезоэлектрический сканер используется как очень тонкое позиционирующее устройство, для того чтобы перемещать зонд относительно образца или образец относительно зонда. Сканер обеспечивает два независимых движения: сканирование вдоль поверхности образца (в плоскости XU) и перемещение в направлении перпендикулярном к поверхности (по оси Z) [3].

Сканер зондового микроскопа перемещает зонд относительно образца по типу растровой картины как показано на рис. 1.13.

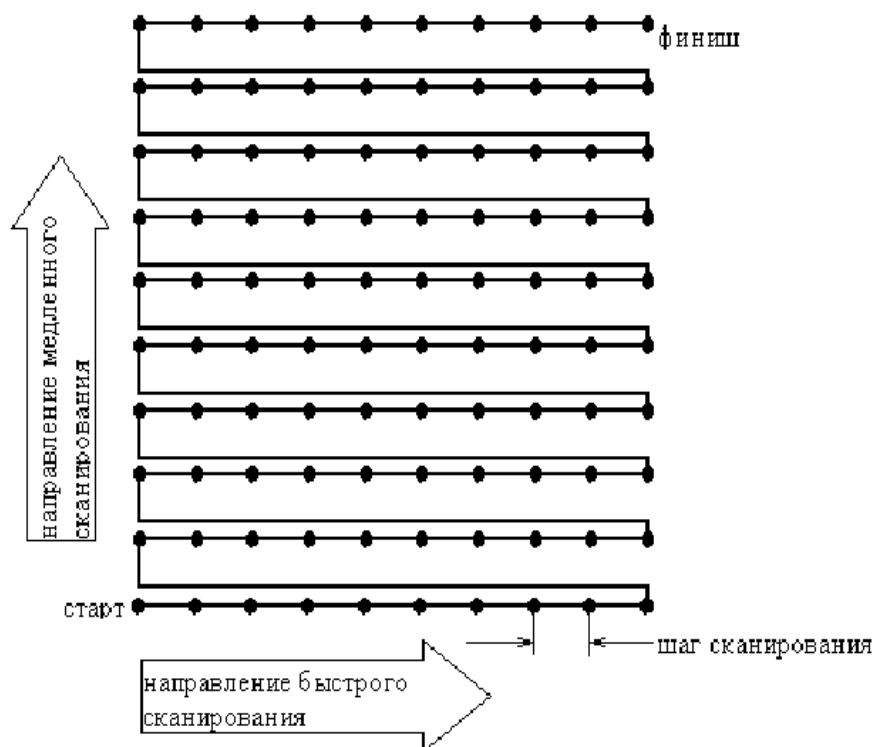


Рис. 1.13. Движение сканера СЗМ в плоскости (X , Y).

Точками показаны места сбора информации

Сканер движется вдоль первой линии скана и обратно. Затем он смещается на шаг в перпендикулярном направлении на следующую линию сканирования, движется вдоль нее и обратно, затем смещается на третью линию и таким образом дальше. Путь отличается от традиционной растровой картины тем, что чередующиеся линии данных, измеряемых сигналов, не берутся в обратных направления. Измеряемые данные при сканировании собираются только в одном направлении, обычно называемым направлением быстрого сканирования, чтобы минимизировать ошибки регистрации, которые возникают из-за гистерезиса сканера. Перпендикулярное направление, в котором сканер перемещается от линии к линии, называется направлением медленного сканирования [4].

Пока сканер движется вдоль линии сканирования, данные изображения оцифровываются через одинаково расположенные интервалы. Данными является высота сканера по направлению Z для режима постоянной силы или режима постоянного тока. Для режима постоянной высоты данными являются отклонения кантилевера или туннельный ток.

Промежуток между точками данными называется шагом сканирования. Размер шага определяется полным размером сканирования и числом точек данных на одну линию. В типичном сканирующем зондовом микроскопе размеры скана изменяются от 10 ангстрем до 100 микрон, и от 64 до 1000 точек данных на линию. Некоторые системы имеют 3000 точки данных на линию. Число линий устанавливается обычно равным числу точек на линии. Таким образом, идеальная установка данных соответствует квадратной сетке измерений [4].

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 году Джексом и Пьером Кюри. Они заметили, что в некоторых кристаллах при механическом воздействии на них появляется электрическая поляризация, причем степень ее пропорциональна величине воздействия. Позже Кюри открыл инверсионный пьезоэлектрический эффект – деформирование материалов, помещенных в электрическое поле. Эти явления еще называют прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом [5].

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющих в каждой отдельной элементарной частице. Данный эффект практически линейный, поскольку степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

2.1. Основные понятия и определения

Выделяют следующие типы пьезоэффектов.

Прямой пьезоэффект – это появление электрических зарядов разного знака на противоположных гранях некоторых кристаллов – пьезоэлектриков – при их механических деформациях. При снятии

механических напряжений кристалл приходит в ненаэлектризованное состояние. Если изменить направление деформации, т. е. не сжимать, а растягивать пьезоэлектрик, то заряды на гранях изменят знак на обратный.

Обратный пьезоэффект – проявляется в способности некоторых диэлектриков механически деформироваться при наложении электрического поля.

Количественно пьезоэффект оценивают пьезомодулем, который зависит от пьезоэлектрических свойств материала и устанавливает пропорциональную зависимость между возникающим зарядом и приложенной силой.

Продольный пьезоэффект – возникает при действии на пластину сжимающих или растягивающих сил вдоль электрической оси, перпендикулярной к плоскости пластины.

Поперечный пьезоэффект – возникает при действии сжимающих или растягивающих сил вдоль механической оси на плоскости. При этом происходит электризация тех же граней, что и при продольном пьезоэффекте. Знак зарядов на гранях зависит от направления действия сжимающих или растягивающих усилий. При воздействии сил на пьезоэлемент вдоль оптической оси Z пьезоэффект не возникает.

Пьезоэлектрические материалы условно можно разбить на две группы:

а) Пьезоэлектрические монокристаллы.

Природные пьезоэлектрические материалы имеют достаточно высокую стоимость. В связи с этим потребности бурно развивающейся электроники в настоящее время удовлетворяются синтетическими пьезоэлектрическими монокристаллами, которые выращиваются в специальных установках. Пьезоэлектрические свойства таких кристаллов с достаточно высокой повторяемостью можно задавать путем композиции входящих в него компонентов.

Выращенные кристаллы определенным образом режутся на пластины, некоторые (сегнетоэлектрики) поляризуются, и из них путем шлифования и нанесения электродов изготавливаются пьезоэлектрические элементы.

б) Пьезоэлектрическая керамика (пъезокерамика).

По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов) [6].

По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. 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). В последние годы разрабатываются новые пьезокерамические материалы со свойствами, позволяющими в некоторых случаях использовать их вместо более дорогостоящих пьезоэлектрических кристаллов. В частности, разработана и производится группа материалов на основе ниобата свинца, которая уже нашла практическое применение благодаря возможности ее использования в диапазоне частот до 30 и более МГц. Значительные исследования проводятся по созданию пьезокерамических композитных материалов, а также многослойной керамики. Зарубежные производители в зависимости от пьезоэлектрических свойств делят ее на сегнетожесткую и сегнетомягкую. В отечественной практике существует дополнительное деление на керамику средней сегнетожесткости, а также выделяются высокостабильные, высокотемпературные и т. п. материалы [6].

Качество пьезокерамики характеризуется следующими, принятыми за рубежом, основными параметрами:

K_{33}^T ($\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$) – относительная диэлектрическая проницаемость;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц в слабых полях;

T_c (T_k) – температура точки Кюри;

K_p , K_{33} , K_{31} , K_{15} – коэффициенты электромеханической связи;

d_{33} - d_{31} , d_{15} – пьезоэлектрические модули;

g_{33} , g_{31} , g_{15} – электрические коэффициенты по напряжению;

N_L , N_T , N_R – частотные постоянные;

S_{11}^E , S_{33}^E – параметр эластичности;

ρ – плотность;

Q_m – механическая добротность.

Важнейшими природными материалами, обладающими пьезоэлектрическими свойствами, являются кварц и турмалин. Наряду с природными кристаллами в технике находят применение искусственные кристаллы: сегнетова соль, дигидрофосфат аммония и другие, называемые сегнетоэлектриками.

Сегнетова соль имеет очень высокий пьезомодуль (примерно в 150 раз больше пьезомодуля кварца). Однако, низкая механическая прочность и сильная зависимость свойств от температуры и влажности делают данный материал малопригодным для практических применений.

В последнее время широкое распространение получили сегнетоэлектрики в виде пьезокерамики титаната бария и его композиций (ниобата, цирконата-титанатов свинца и другие). Все они по сравнению с кварцем имеют большой пьезомодуль, механически прочны и, кроме того, могут быть изготовлены любой формы и размеров.

Из природных пьезоэлектрических материалов предпочтение отдают кварцу, который при удовлетворительных пьезоэлектрических свойствах

нечувствителен к влажности, химическим и температурным воздействиям, имеет высокую механическую прочность, линейность, большой динамический диапазон.

В качестве пьезоматериалов в нанотехнике обычно используют пьезокерамику состава ЦТС (цирконат-титанат свинца). Эти составы отличаются наивысшей пьезоактивностью, повышенной устойчивостью к воздействию электрических нагрузок, стабильностью свойств во времени.

На основе указанных выше пьезокерамических материалов освоено производство пьезокерамических элементов традиционных геометрических форм в виде дисков, пластин, шайб, цилиндров.

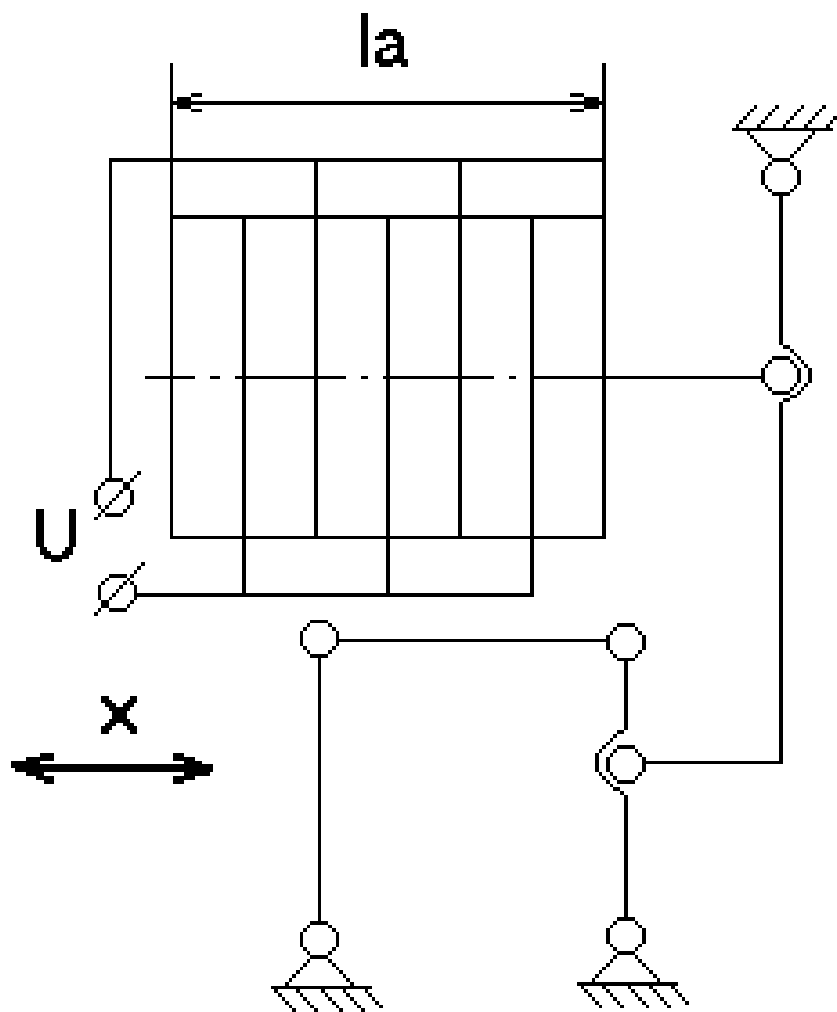


Рис. 2.1. Устройство на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

Зависимость перемещения привода от управляющего сигнала $X = f(U)$ имеет характерный для пьезоэлектриков ярко выраженный гистерезис. В качестве примера пьезопреобразователя можно рассмотреть устройство на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом. Схема устройства и его характеристики приведены соответственно на рисунках 2.1 и 2.2. Пьезостолбец с активной длиной $l_A = 50$ мм выполнен из пьезокерамики ЦТС и состоит из дисков диаметром $D = 18$ мм и толщиной $h = 1$ мм. При этом диапазон перемещения пьезостолбца равен $\zeta = 40$ мкм, диапазон перемещений равен $X = 200$ мкм при напряжении питания $U = 600$ В [7].

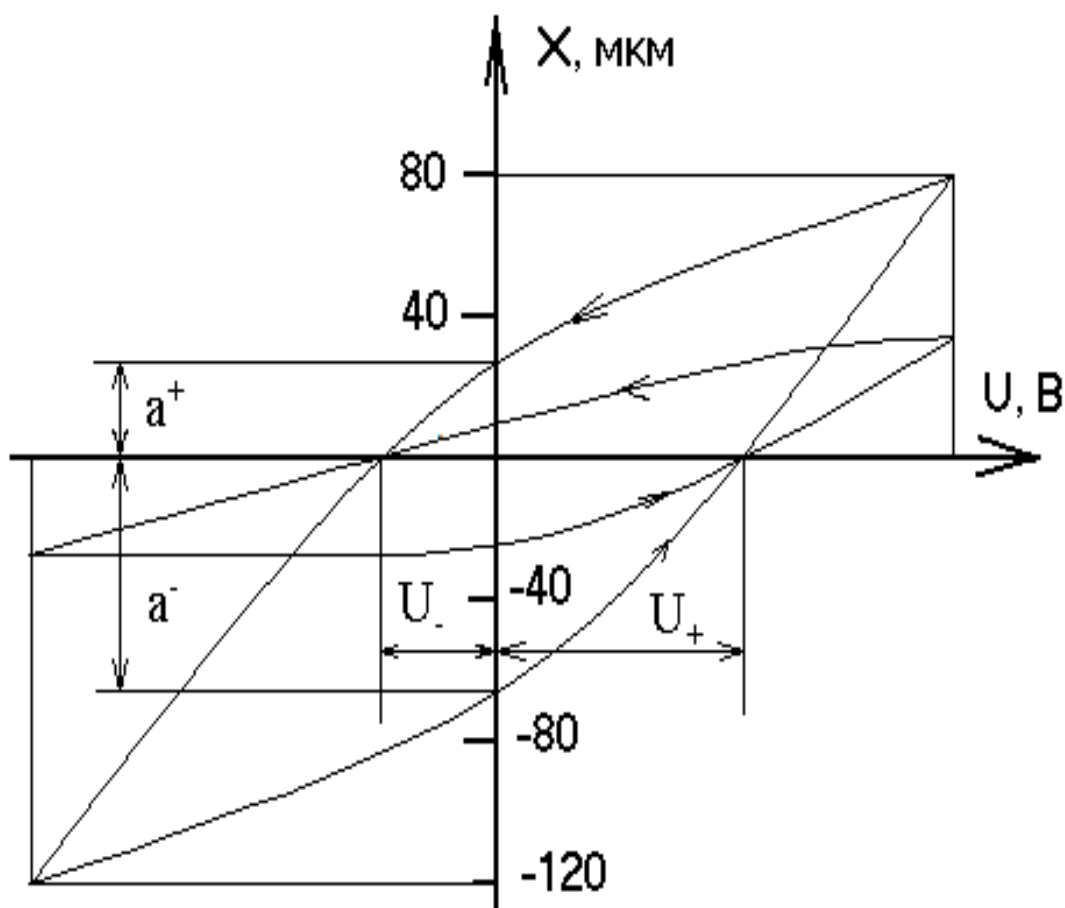


Рис. 2.2. Характеристики устройств на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

Для пьезопреобразователей характерен эффект последействия, которое заключается в возрастании деформаций пьезодвигателя при постоянной электрической нагрузке. Например, для модуля (рис. 2.1) при воздействии постоянного напряжения U в течении 4 минут деформация пьезодвигателя в зависимости от величины и полярности напряжения достигает величины $-1 \div 2,5$ мкм. Этот эффект можно устранить подачей дополнительного напряжения на пьезодвигатель.

2.2. Основные зависимости

Характеристики пьезопреобразователя выражаются простейшими соотношениями (рис. 2.3):

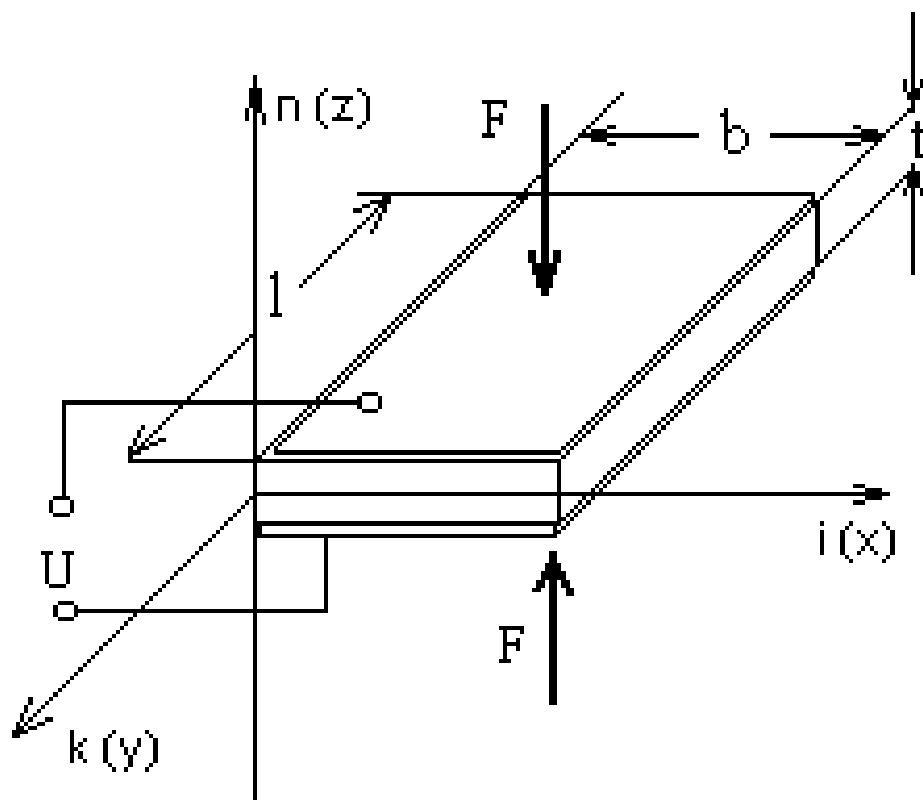


Рис. 2.3. Пьезоэлемент

$$E_i = g_{in} \times \sigma_n = -h_{in} \times \varepsilon_n; \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_n = d_{kn} \times E_k; \quad (2.2)$$

$$\sigma_n = C_{nn} \times \varepsilon_n; \quad (2.3)$$

$$U_i = E_i \times l_i; \quad (2.4)$$

$$C_n = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times F_x / l_n, \quad (2.5)$$

где E_i и E_k – напряженность поля в кристалле в направлении осей i и k в В/м;

σ_n – механическое напряжение в кристалле вдоль оси n в Н/м²;

ε_n – относительная деформация кристалла вдоль оси n ;

U_i – напряжение на гранях кристалла вдоль оси i в В;

C_n – емкость кристалла между обкладками, расположенными на гранях, перпендикулярных оси n ;

l_n и l_i – размер пластины вдоль оси i и n (обычно это толщина пластины t) в м;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная);

F_x – площадь обкладки конденсатора в м²;

g_{in} , d_{kn} , C_{nn} – пьезокоэффициенты.

Индексы i , k , n соответствуют направлениям осей или плоскостям, при этом цифрам 1, 2 и 3 соответствуют направления осей X , Y и Z , цифрам 4, 5 и 6 – плоскости ZY , ZX и XY . Первый индекс характеризует приложенное воздействие, второй – полученный результат. Так, у коэффициента g_{12} индекс 1 означает, что пластина деформируется вдоль оси X , а напряженность поля измеряется вдоль оси Y . У коэффициента d_{36} индекс 3 означает, что электрическое поле приложено вдоль оси Z . Индекс 6 означает, что кристалл претерпевает сдвиг в плоскости XY [8].

Для пьезоэлектрического материала характерно появление поляризационного заряда при его механической деформации и наоборот, если пьезоэлектрический материал внести в электрическое поле, то можно наблюдать изменение его длины. Электрическая поляризация $P = D - \varepsilon_0 E$, которая связана с поверхностным зарядом, в первом приближении увеличивается линейно относительно механического напряжения σ . Материальный закон выражен так:

$$D = P + \varepsilon_0 E = d\sigma. \quad (2.6)$$

Электрическое смещение D и напряжённость поля E - векторы, механическое напряжение σ и деформация ε – это тензоры второго ранга. Следовательно, пьезоэлектрический коэффициент d – тензор третьего ранга. Так как тензор напряжения симметричен, тензор пьезоэлектрического коэффициента в общем случае имеет $3 \times 6 = 18$ независимых компонент. В компонентном представлении мы получаем следующие отношения:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Индексы 1,2,3 относятся к кристаллическим параметрам и из можно совместить с координатными направлениями x, y, z при соответствующей ориентации. Например, положительное значение означает, что растягивающее напряжение в направлении z ведёт к положительному заряду на поверхности лежащей в направлении z .

Обратный или косвенный пьезоэлектрический эффект даёт

соотношение между напряжённостью электрического поля E и механической деформацией ε :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{33} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Коэффициенты d_{ij} тождественны прямому пьезоэлектрическому эффекту. Электрострикция определяется как эффект второго порядка, она зависит от квадрата напряжённости электрического поля, и описывается тензором четвёртого ранга:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{33} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{11}\gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{14}\gamma_{15}\gamma_{16} \\ \gamma_{21}\gamma_{22}\gamma_{23}\gamma_{24}\gamma_{25}\gamma_{26} \\ \gamma_{31}\gamma_{32}\gamma_{33}\gamma_{34}\gamma_{35}\gamma_{36} \\ \gamma_{41}\gamma_{42}\gamma_{43}\gamma_{44}\gamma_{45}\gamma_{46} \\ \gamma_{51}\gamma_{52}\gamma_{53}\gamma_{54}\gamma_{55}\gamma_{56} \\ \gamma_{61}\gamma_{62}\gamma_{63}\gamma_{64}\gamma_{65}\gamma_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2E_3 \\ E_3E_1 \\ E_1E_2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Для пьезоэлектрического эффекта характерно, что изменение направления электрического поля вызывает переход растягивающего напряжения в сжимающее напряжение. Эффект электрострикции связан с квадратом напряжённости электрического поля и значит не зависит от полярности. В зависимости от кристаллической структуры, некоторые пьезоэлектрические коэффициенты станут нулевыми или их можно приравнять друг к другу. Фактический вид тензора для пьезоэлектрического материала определяется тем кристаллографическим классом, к которому материал принадлежит. Кристаллический кварц

относится к тригональному классу: $d_{11}=-d_{12}$; $d_{14}=-d_{25}$; $d_{26}=-2d_{11}$, а остальные коэффициенты исчезают. Оксид цинка и нитрид алюминия принадлежат к гексагональному классу, где только коэффициенты $d_{31}=d_{32}$; $d_{24}=-d_{15}$ и d_{33} отличны от нуля. Кристаллы обладающие центральной симметрией (как кремний) или изотропные материалы не проявляют пьезоэлектрический эффект, однако, электрострикция имеет место во всех таких материалах, включая изотропные.

Особенно высокий пьезоэлектрический коэффициент проявляет сегнетоэлектрическая керамика с кристаллической структурой ABO_3 (рис. 2.4). А и В – это двухвалентные и трёхвалентные элементы, например, $BaTiO_2$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$. Для этих материалов эффектом электрострикции можно пренебрегать при напряжённости поля $E < 10^3$ В/м.

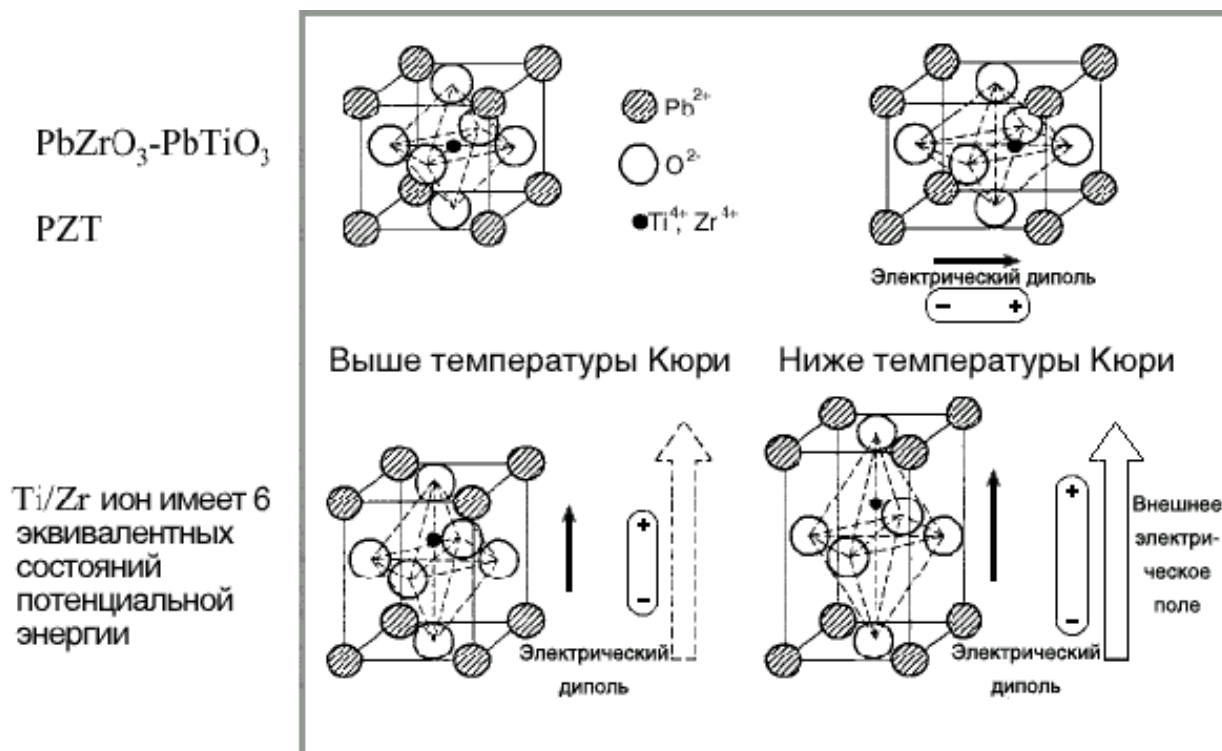


Рис. 2.4. Элементарные диэлектрические решётки

Одной из особенностей любого сегнетоэлектрического материала является то, что он изменяет свои свойства в точке Кюри T_c . При температуре $T > T_c$ кристалл не проявляет себя как сегнетоэлектрик, однако, до тех пор, пока $T < T_c$ он сегнетоэлектрик. Большинство кристаллов могут находиться в различных кристаллических фазах, которые устойчивы при различных температурах и диапазонах давлений. Переход между фазами сопровождается изменением термодинамических характеристик (упругости, оптических и тепловых свойств, объема, энтропии, и т.д.). Во время перехода атомы перемещаются таким образом, что кристалл сменяет один кристаллический класс на другой. Вообще переход происходит при различных температурах, при нагревании и охлаждении (температурный гистерезис). Фазовый переход первого порядка отличается сильными и резкими изменениями в кристаллической структуре. В течение перехода второго порядка, изменения менее сильны и переход непрерывен. Фазовые переходы второго порядка не обладают температурным гистерезисом. Фазовые переходы часто сопровождаются наличием новых физических явлений (сегнетоэлектричество, ферромагнетизм, сверхпроводимость). Для BaTiO_2 точка Кюри равняется 120°C . Выше этой температуры BaTiO_2 принадлежит кубическому кристаллическому классу и теряет таким образом свои сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства, ниже точки Кюри кристалл тетрагональный, от 0 и до -70°C дальнейшие фазовые переходы происходят от орторомбического к тригональному кристаллическому классу. Смена кристаллической группы симметрии, связанной с фазовым переходом, становится причиной появления новых коэффициентов в тензоре материала. Материалы, с пригодным для использования коэффициентом продольной деформации, охватывают минералы, монокристаллические вещества и полимеры. Обычно пьезоэлектрический эффект наиболее ярко выражен в монокристаллических веществах. Среди материалов годных к

использованию в микросистемах, пьезоэлектрический коэффициент обычно лежит в диапазоне $1 \div 100 \times 10^{-12}$ м/В.

При максимальной напряжённости поля $E=10^7$ В/м относительная продольная деформация лежит в диапазоне $\varepsilon_r = 10^{-3} \div 10^{-5}$. В результате достижимый диапазон управления мал, но при помощи напряжения можно очень точно управлять перемещением. В отличие от большинства других принципов активации, нельзя достигнуть более низкого предела, получаемого на атомном уровне. Эта особенность используется в растровом туннельном микроскопе или в микроскопе атомной силы, для получения разрешения ниже, чем атомный диаметр $10^{-10} \div 10^{-12}$ м.

Электромеханический коэффициент связи k_p показывает ту долю механической энергии, которая преобразуется в электрическую энергию. Это относится как к прямому, так и к обратному пьезоэлектрическому эффекту.

$$k_p^2 = \frac{\text{Преобразования энергия}}{\text{Накопленная энергия}}$$

Для эффективного преобразования энергии, естественно, должен быть достигнут высокий коэффициент связи. Однако коэффициент связи нельзя приравнивать к эффективности. Так как в принципе возможно восстановление накопленной энергии, эффективность может быть намного больше коэффициента связи.

2.3. Основные характеристики пьезоэлектрических материалов

Характеристики пьезокерамических материалов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.
Характеристики пьезокерамических материалов

материал	Электрофизические свойства							
	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	$\text{tg } \delta$	k_p	$d_{33},$ пКл/Н	$-d_{31},$ пКл/Н	Q_M	$T_k,$ °С	Произ- водитель
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Состав 3-1	400	0.01	0.03	90	5	10	460	Россия
PZ-35	220	0.006	—	100	—	15	500	«Ferroperm Piezoceramics», Дания
VP-M18	300	—	0.10	85	15	15	400	«Valpey-Fisher Corp.», США
VP-M58	800	—	0.30	180	65	15	400	«Valpey-Fisher Corp.», США
PMN-1	275	0.01	—	65	27	15	495	«Vernitron», США
PMN-2	240	0.01	—	70	32	10	450	«Vernitron», США
BM-900	300	0.01	0.07	75	10	15	490	«Sensor Technology Ltd», Канада
BM-940	700	0.01	0.02	180	40	15	280	«Sensor Technology Ltd», Канада
100	300	0.01	—	85	—	20	450	«SPK Electronics Co. Ltd», Тайвань

Таблица 2.1. (продолжение)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
"сегнетомягкие" материалы	PZTS-1	2200±200	<0.02	0.65	>600	>200	>60	—	—
	PZTS-2	2300±200	<0.02	0.66	—	>210	>60	—	—
	PZTS-3	4100±400	<0.02	0.62	>700	>300	>40	—	—
	PZTS-4	4400±400	<0.05	0.65	>1000	>300	>20	—	—
	PZTS-5	5500±500	<0.05	0.63	>1000	>300	>20	—	—
	PZTS-6	6000±500	<0.05	0.65	>1000	>350	>20	—	—
материалы ср. "жесткости"	PZTI-1	2200±200	<0.0008	0.58	>350	>180	>450	—	—
	PZTI-2	1800±150	<0.005	0.60	—	>150	>500	—	—
"сегнетожесткие" материалы	PZTH-1	1400±140	<0.006	0.55	>300	>140	>800	—	—
	PZTH-2	1000±200	<0.009	0.50	>230	>90	>800	—	—
	PZTH-3	1000±100	<0.008	0.52	>300	>100	>900	—	—
	PZTH-4	1400±150	<0.006	0.57	>300	>120	>800	—	—
	PZTH-5	500±50	<0.007	0.52	>200	>70	>1100	—	—
	PZTH-6	470±40	<0.007	0.57	—	—	>1600	—	—
	PZTH-7	350±20	<0.006	0.22	—	—	>1900	—	—
	PZTH-8	260±25	<0.006	0.27	—	—	>2300	—	—
	PZTH-9	650±100	<0.008	0.52	—	—	>850	—	—
ЦТС-19М	1900±100	0.025	0.62	450±50	180±30	90	300	Россия	
ЦТС-19	1700±200	0.03	0.55	350	160	80	290	Россия, Элпа	
ЦТС-26	1700	<2.0	0.60	350	170	70	350	Россия, Элпа	
ЦТС-26М	1700	<2.0	0.60	340	160	80	350	Россия, Элпа	
ЦТС-36	670	<2.5	0.57	220	90	80	350	Россия, Элпа	

Таблица 2.1. (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
НЦТС-1	4000	<2.5	0.60	550	260	50	175	Россия, Элпа
НЦТБС-1	5700	<2.8	0.62	650	310	40	140	Россия, Элпа
ЦТС-45	1750	<2.0	0.61	380	180	75	330	Россия, Элпа
ЦТС-46	2100	<2.0	0.61	430	190	70	260	Россия, Элпа
ЦТС-83Г	1200±100	0.025	—	300±20	160	—	360	Россия, Пьезоприбор
ЦТСБ	850±100	0.008	—	120±20	—	—	370	Россия, Пьезоприбор
ТВ-2	140±20	0.03	—	15±2	—	—	650	Россия, Пьезоприбор
ТВ-3	140±20	0.02	—	16±2	—	—	650	Россия, Пьезоприбор
НТВ-1	130	—	—	25±1	—	—	550	Россия
НТВ-2	140	0.0065	—	26±2	—	—	660	Россия, Пьезоприбор
ТНВ-1	105±15	0.02	—	10±2	—	—	930	Россия, Пьезоприбор
ТНВ-2	150	0.008	—	13±1	—	—	950	Россия, Пьезоприбор
ПКП-50	900±100	—	—	165±15	55±5	—	350	Россия
ТС-4	500	—	—	90±10	35±5	—	400	Россия
ЦТСТБС-1	4100	0.027	0.65	600	290	50	170	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТС-24	900	0.0075	0.50	340	100	500	270	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТС-24М	1050	0.0075	0.52	255	100	200	280	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТССТ-3	1400	0.008	0.53	290	130	800	280	Россия, “Аврора-Элма”

Таблица 2.1. (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЦТБС-3	2325	0.012	0.52	360	160	200	180	Россия, "Аврора-Элма"
ЦТСНВ-1	2325	0.022	0.59	425	200	60	240	Россия, "Аврора-Элма"
ПКВ-460	1450	0.003	0.59	215	145	1200	295	Россия, "Аврора-Элма"

$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$ – Относительная диэлектрическая проницаемость.

$tg \delta$ – Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях, не более.

k_p – радиальный коэффициент электромеханической связи.

d_{33} – Пьезоэлектрический модуль d_{33} в квазистатическом режиме пКл/Н.

d_{31} – Пьезоэлектрический модуль d_{31} в квазистатическом режиме пКл/Н.

Q_M – механическая добротность.

T_k – Температура Кюри, °С.

ГЛАВА 3. ПРЕЦИЗИОННЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНИТОСТРИКЦИИ

3.1. Магнитострикция. Основные сведения

Магнитострикция (от лат. натяжение, сжатие) – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Это явление свойственно как ферромагнитным (сильно магнитным), так и парамагнитным и диамагнитным веществам. Магнитострикция – результат проявления взаимодействий в магнитных телах. Магнитострикция неизменно привлекает внимание не только физиков, но также и инженеров с точки зрения конструирования новых приборов и технических устройств [9-11].

Магнитострикция оценивается безразмерной величиной – относительным изменением размеров магнетика

$$\lambda = \frac{dl}{l}.$$

Здесь dl – удлинение (или укорочение) при включении магнитного поля H , а l – длина образца.

В экспериментах обычно измеряется λ_{\parallel} – продольная магнитострикция, когда напряженность поля H совпадает с направлением измерения, λ_{\perp} – поперечная магнитострикция, когда указанные направления взаимно перпендикулярны. Величины λ_{\parallel} и λ_{\perp} малы (даже для ферромагнетиков), и для их измерения применяются специальные методы и установки.

Различают два вида магнитострикции: изотропную (обменную) и анизотропную (магнитодипольную и одноионную). Ниже в упрощенной и качественной форме объясняются механизмы их возникновения.

3.1.1. Обменная магнитострикция

Этот вид магнитострикции возникает в результате изменения обменного взаимодействия между магнитными моментами атомов M_{am} в кристаллической решётке. Магнетизм атома обусловлен электронами (ядро атома дает очень малый вклад в магнетизм атома, и им обычно пренебрегают). Электроны атома участвуют в создании M_{am} двояко. Во-первых, каждый электрон, вращаясь вокруг ядра, образует микроскопический замкнутый ток, величина его равна произведению микроскопического тока на площадь орбиты электрона. Этот магнитный момент называется орбитальным M_{orb} и изображается в виде вектора, направленного перпендикулярно площади орбиты. Во-вторых, каждый электрон обладает своеобразным «собственным» магнитным моментом (согласно выводам квантовой механики). Его называют спиновым $M_{сп}$ (от англ. spin — вращение).

Векторное сложение M_{orb} и $M_{сп}$ дает M_{am} . Следует отметить, что внутри атома M_{orb} и $M_{сп}$ связаны магнитными силами (спин-орбитальным взаимодействием).

В кристаллах ферромагнетиков, как было показано в 30-е годы русским теоретиком Я.И. Френкелем и немецким теоретиком В. Гейзенбергом, между электронами соседних магнитных атомов возникает особый вид взаимодействия, который они назвали обменным. Это электростатическое взаимодействие, однако, оно не простое (кулоновское), а квантовое. В механизме обменного взаимодействия электронов важная роль отводится направлению спинов соседних атомов.

Обменным его назвали потому, что в процессе данного взаимодействия электроны соседних магнитных атомов как бы обмениваются своими местами. Результатом обменного взаимодействия электронов является то, что моменты M_{cn} электронов устанавливаются параллельно друг другу, возникает спонтанная или самопроизвольная намагниченность (то есть без участия внешнего поля H). Поскольку M_{cn} и M_{orb} взаимосвязаны, то можно говорить, что спонтанная намагниченность I_s создается упорядочиванием магнитных моментов M_{am} (намагниченность I_s – это число однонаправленных M_{am} в 1 см^3 ферромагнетика).

Спонтанная намагниченность обращается в нуль при температуре T_C , называемой точкой Кюри. Величину обменного взаимодействия можно оценить по величине T_C . При этой температуре тепловое движение разрушает упорядоченное расположение моментов M_{am} , созданное обменным взаимодействием. Отсюда следует, что чем больше обменное взаимодействие в ферромагнетике, тем выше должна быть температура T_C для разрушения магнитного порядка.

Возникновение обменной магнитострикции можно наглядно пояснить следующим образом. Представим себе, что имеется цепочка магнитных атомов при температурах, близких к T_C . В области T_C большинство моментов M_{am} находятся в разупорядоченном состоянии, так как действие теплового движения на атомы больше, чем обменное взаимодействие. Пусть r_0 – равновесное расстояние между атомами, соответствующее этому состоянию ферромагнетика (рис. 3.1, а). Включим, теперь поле H . Моменты M_{am} повернутся по полю (рис. 3.1, б), но это приведёт к изменению обменной энергии (поскольку, согласно теории, данная энергия зависит от направления спинов взаимодействующих электронов, принадлежащих соседним атомам).

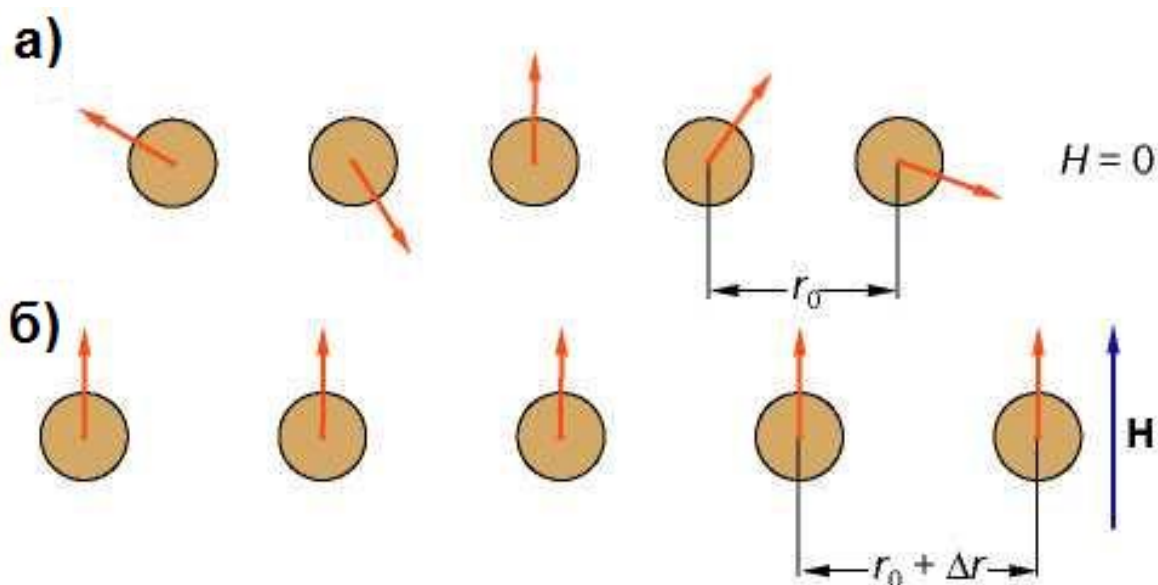


Рис. 3.1. Явление обменной магнитострикции

Состоянию ферромагнетика, представленного на рис. 3.1, б, будет соответствовать другое равновесное расстояние между атомами: $r_0 + \Delta r$, где Δr есть не что иное, как обменная магнитострикция. В ферромагнетиках, обладающих кубической симметрией, величина Δr не зависит от направления в кристалле, следовательно, обменная магнитострикция будет изотропной. Это означает, что в кубическом кристалле величина Δr будет одной и той же во всех направлениях последнего. Эта магнитострикция будет проявляться в изменении объёма кристалла $\frac{\Delta V}{V}$, при этом в большинстве ферромагнетиков она положительна, то есть при включении внешнего поля H объём образца увеличивается.

Подобного рода магнитострикция сопутствует процессу намагничивания ферромагнетика, при котором под влиянием H происходит ориентация моментов M_{am} . Процесс напоминает намагничивание парамагнетиков, поэтому он получил название парапроцесса. Парапроцесс особенно интенсивен в области точки Кюри, и обменная магнитострикция здесь достигает наибольшей величины.

В ферромагнетиках, обладающих гексагональной структурой, например, в редкоземельном металле гадолинии Gd, парапроцесс и обменная магнитострикция обладают анизотропией.

3.1.2. Спонтанная магнитострикция и инвар-эффект

Магнитострикция, обусловленная изменением обменного взаимодействия, проявляется не только при приложении магнитного поля H , но также при изменении температуры ферромагнетика (при отсутствии H). Это тепловая магнитострикция (иногда называемая термострикцией) особенно велика в области точки Кюри. В самом деле, из вида температурной зависимости спонтанной намагниченности I_s , представленной на рис. 3.2, а, следует, что число разупорядоченных моментов M_{am} особенно бурно возрастает при приближении к T_C . Это приводит к некоторому изменению обменной энергии, что, в свою очередь, вызывает обменную магнитострикцию $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_T$, однако в противоположность действию парапроцесса отрицательную, так как она сопутствует разупорядочиванию моментов M_{am} .

У некоторых ферромагнетиков эффект спонтанной магнитострикции оказывает существенное влияние на тепловое расширение, так как приводит к частичной компенсации последнего. На рис. 5.2, б штриховой линией схематически показан температурный ход коэффициента теплового

расширения $\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta T}$ ферромагнитного сплава 36%Ni + 64%Fe при

отсутствии компенсирующего действия обменной магнитострикции, сплошная кривая – зависимость $\alpha(T)$, экспериментально наблюдаемая.

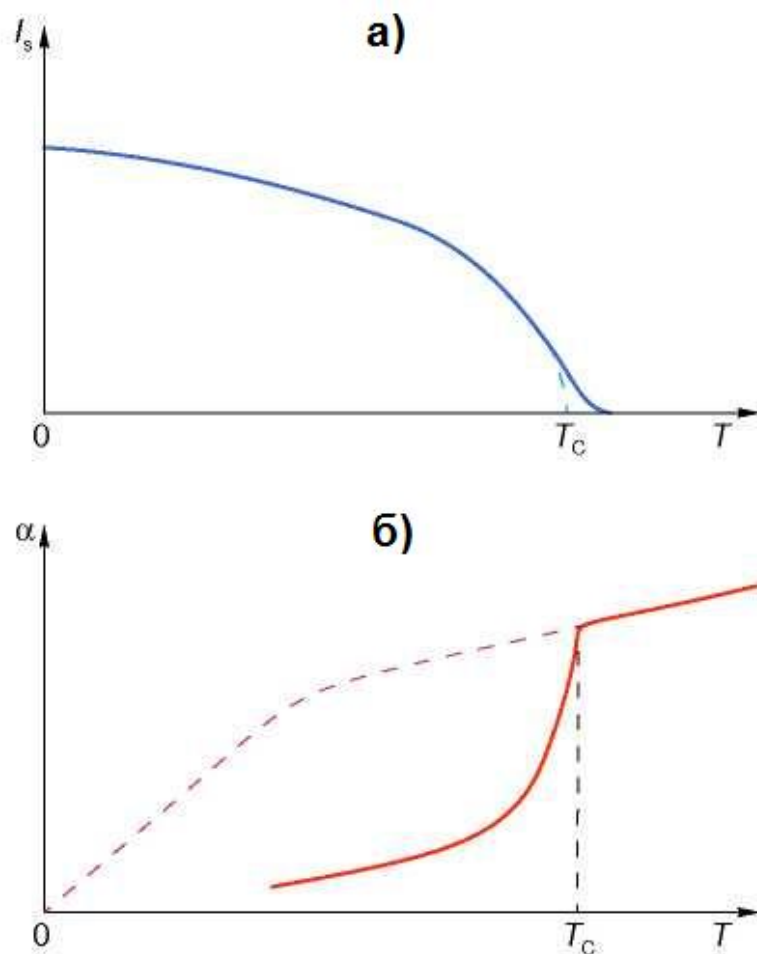


Рис. 3.2. Инвар-эффект:

а – температурная зависимость спонтанной намагниченности инварного сплава (схематически);

б – температурная зависимость коэффициента теплового расширения инварного сплава (штриховая линия – температурный ход при отсутствии влияния спонтанной магнитострикции)

Видно, что в определённом интервале температур α может приобретать очень низкие значения.

Указанный выше сплав носит название инвара (не изменяющего свои размеры при нагреве). В настоящее время существует большое число сплавов типа инвар; природа их малого коэффициента теплового расширения – магнитная. Явление компенсации коэффициента теплового

расширения спонтанной магнитострикцией получило название инвар-эффекта. В гадолинии инвар-эффект анизотропен, то есть различен по разным осям гексагонального кристалла.

3.1.3. Магнитодипольная и одноионная магнитострикция

Кроме рассмотренной выше обменной магнитострикции в ферромагнетиках при приложении поля H возникает анизотропная магнитострикция. Она сопутствует процессам намагничивания в полях более слабых, чем те, в которых проявляется парапроцесс. Анизотропия её состоит в том, что λ по различным осям кристалла имеют разные величины и знаки. Характерная черта анизотропной магнитострикции состоит в том, что при ней меняется форма образца (при ничтожно малом изменении объёма).

В теории рассматриваются два механизма анизотропной магнитострикции: 1) магнитодипольный и 2) одноионный. В первом из них рассчитывается магнитное взаимодействие магнитных моментов M_{am} , расположенных в узлах кристаллической решетки. При этом, магнитные моменты M_{am} уподобляются магнитным диполям (то есть маленьким магнетикам с северным и южным полюсами).

Магнитодипольное взаимодействие в кристаллах кубической симметрии вдоль ребра и диагоналей куба будет различным, следовательно, равновесные расстояния между магнитными атомами, в этих направлениях, будут также различными, то есть магнитострикции будут разными по величине в этих направлениях. Однако данный механизм даёт малый вклад в анизотропию магнитострикции ферромагнетиков.

Как показали исследования, главным для анизотропной магнитострикции является одноионный механизм. Определяющую роль в нём играет наличие у магнитного атома или иона (то есть заряженного атома) орбитального магнитного момента M_{orb} . Согласно теории, в этом случае, электронное орбитальное облако приобретает несферическую (анизотропную) конфигурацию (на рис. 3.3,а оно условно изображено в виде эллипсоида).

Механизм возникновения анизотропной магнитострикции можно представить следующим образом. Пусть анизотропный магнитный ион находится в кристаллической решетке в окружении других ионов, создающих электростатическое поле (оно обычно называется кристаллическим). На рис. 3.3 условно показаны, тонкими линиями, кристаллические поля создаваемые окружающими ионами, отражающими локальную симметрию кристалла.

При приложении поля H магнитный момент иона $M_{ат} = M_{сп} + M_{orb}$ ориентируется в направлении H и одновременно с ним поворачивает

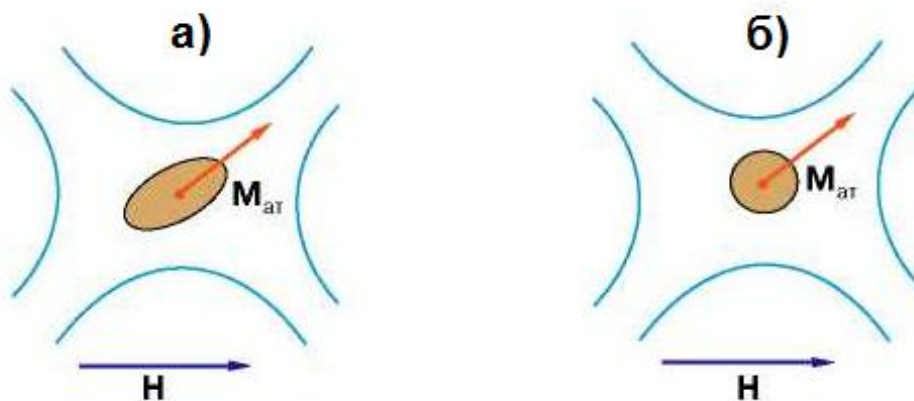


Рис. 3.3. Одноионный механизм возникновения анизотропной магнитострикции:

а – случай Tb и Dy;

б – случай Gd

анизотропное электронное облако иона, которое возмущает электростатическое поле окружающих ионов. В результате кристаллическая решетка испытывает анизотропные деформации в соответствии с симметрией кристалла. Эти деформации – анизотропная магнитострикция.

Подобного вида анизотропная магнитострикция очень велика в редкоземельных металлах (не всех), так как их ионы обладают большими величинами орбитальных моментов M_{orb} .

Редкоземельный металл гадолиний не имеет орбитального момента ($M_{orb} = 0$) и его атомный момент M_{am} содержит только спиновую составляющую ($M_{am} = M_{cn}$). Вследствие этого электронное облако его иона имеет сферическую форму. Как следует из рис. 3.3, б, при приложении поля H поворот электронного облака не приводит к возмущению кристаллического поля окружающих ионов, следовательно, здесь не работает механизм одноионной магнитострикции. В Gd и его соединениях наблюдаемая анизотропная магнитострикция, по-видимому, обязана магнитодипольному механизму.

Ситуация с анизотропной магнитострикцией в металлах Fe, Ni, их сплавах и ферритах близка к случаю Gd. Намагничивание в них происходит, в основном, за счёт спиновых моментов и в небольшой степени за счёт орбитальных моментов. В этих магнетиках кристаллическое поле так сильно воздействует на M_{orb} , что они как бы закрепляются в решетке и теряют способность вращаться в направлении магнитного поля. Это явление принято называть замораживанием орбитального момента. Однако в некоторых из этих соединений замораживание M_{orb} происходит не полностью. Поэтому в данных веществах возникает анизотропная магнитострикция одноионной природы, но много меньшая по величине, чем в редкоземельных магнетиках.

3.1.4. Гигантская анизотропная магнитострикция

Было установлено, что анизотропная магнитострикция редкоземельных металлов тербия Tb, диспрозия Dy, их сплавов и ферритов-гранатов, при низких температурах, превышает анизотропную магнитострикцию железа, кобальта, никеля и их сплавов в десятки, сотни и даже тысячи раз (в монокристаллах). Несколько позднее, такая гигантская магнитострикция была обнаружена в так называемых интерметаллических соединениях TbFe₂ и DyFe₂. В них эта магнитострикция реализуется не только при низких температурах, но и выше комнатных температур.

В табл. 3.1 приведены результаты измерений продольной магнитострикции насыщения $(\lambda_s)_{\parallel}$ (то есть в полях $H = H_s$) при температуре жидкого азота 78К в поликристаллах Tb и Dy (для сравнения даны соответствующие значения $(\lambda_s)_{\parallel}$ для поликристаллов Fe, Co и Ni).

Таблица 3.1
Результаты измерений
продольной магнитострикции насыщения $(\lambda_s)_{\parallel}$

Металл	$(\lambda_s)_{\parallel} \cdot 10^6$
Tb	1230
Dy	1400
Fe	-15
Co	-85
Ni	-40

Огромных величин достигает λ_s в гексагональных кристаллах Tb и Dy (табл. 3.2). При этом она особенно велика вдоль гексагональной оси c и несколько меньше вдоль a . (На рис. 3.4, а показаны направления этих осей). Видно, что эти значения в сотни раз больше, чем в кристалле Ni. На рис. 3.4, б показаны направления осей кубического кристалла Ni символами [111], [100] и [110].

На рис. 3.5 представлены кривые магнитострикции $\lambda(H)$ гексагонального монокристалла Tb вдоль его оси c и b базисной плоскости при разных температурах.

В поле, приложенном в базисной плоскости, магнитострикция сравнительно быстро стремится к насыщению (рис. 3.5,а), тогда как в направлении гексагональной оси c тенденция к насыщению не обнаруживается даже в очень сильном поле ($H = 150$ кЭ).

Таблица 3.2

Магнитострикция в кристаллах Tb, Dy, Gd и Ni

Металл	T, K	$(\lambda_s)_{\parallel} \cdot 10^6$	Кристаллическая ось
Tb	4,2	5460	$H \parallel a$
	4,2	22000	$H \parallel c$
Dy	4,2	8500	$H \parallel a$
	4,2	21000	$H \parallel c$
Gd	78 /	-80	$H \parallel a$
	78 /	-16	$H \parallel c$
Ni	78 /	-60	$H \parallel [111]$

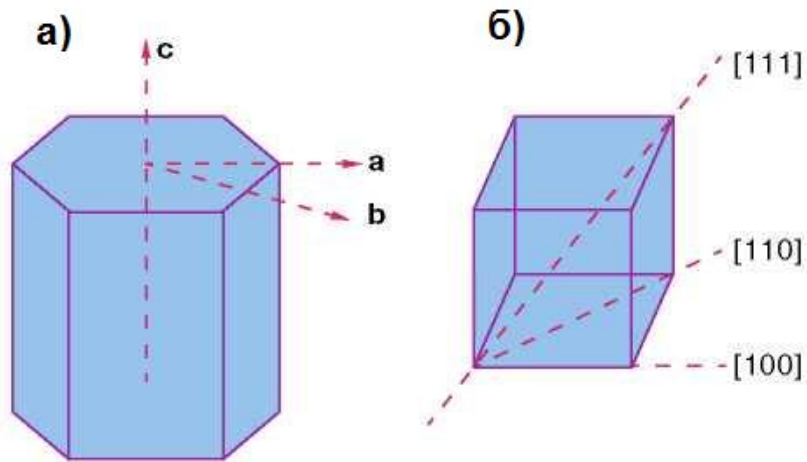


Рис. 3.4. Направления осей:

a – в гексагональном кристалле;

b – в кубическом кристалле

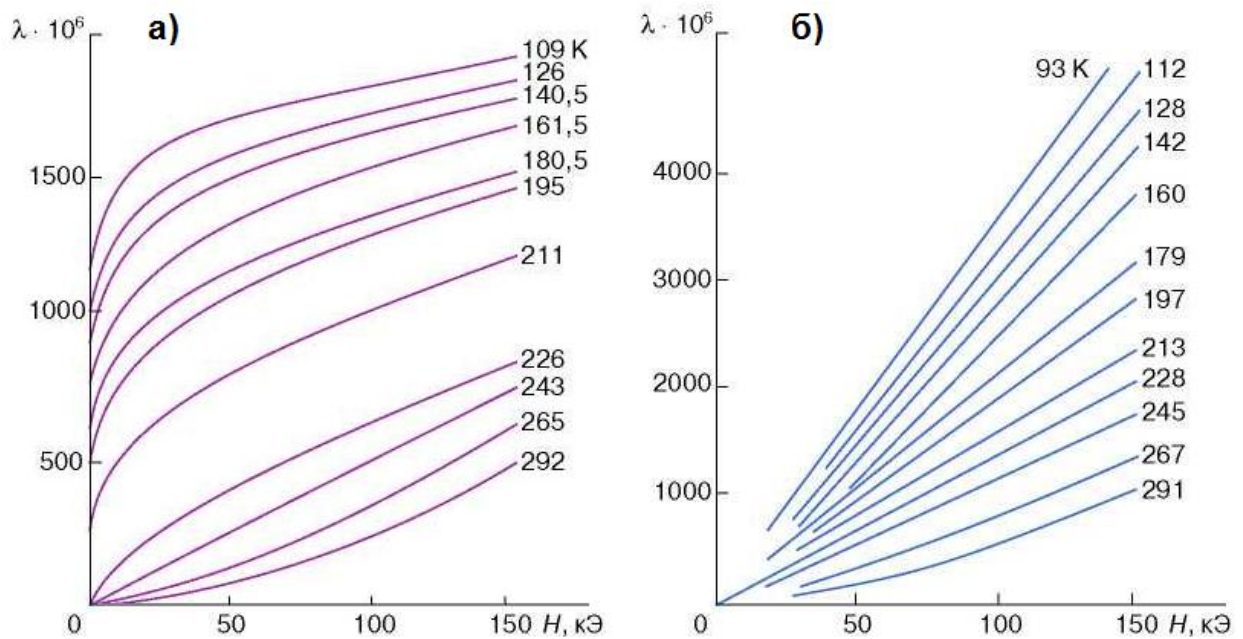


Рис. 3.5. Зависимость магнитострикции в кристалле тербия от

напряженности магнитного поля H :

a – базисная плоскость ($H \perp c$);

b – гексагональная ось ($H \parallel c$)

Анализ приведённых результатов измерений показал, что за гигантскую магнитострикцию в Tb и Dy ответственны два механизма: одноионная магнитострикция и обменная магнитострикция (возникающая вдоль оси *c*, так как в этом направлении обменное взаимодействие сильно зависит от межатомного расстояния).

Таблица 3.3

Результаты измерений гигантской магнитострикции в кристаллах ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Tb, Dy, Ho$)

Феррит-гранат	$\lambda_{[100]} \cdot 10^5$		$\lambda_{[111]} \cdot 10^5$	
	4,2 К	78 К	4,2 К	78 К
$Tb_3Fe_5O_{12}$	1270	67	2460	560
$Dy_3Fe_5O_{12}$	-1400	-254	-550	-145
$Ho_3Fe_5O_{12}$	-665	-82	-632	-56

Было обнаружено, что ряд ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Tb, Dy, Ho$) в области гелиевых и азотных температур обладает гигантской магнитострикцией (порядка 10^{-3}). В табл.3.3 приведены результаты измерений её в кристаллах этих веществ. Видно, что гигантская магнитострикция носит также анизотропный характер в направлениях [100] и [111] и возникает, как и в металлах Tb и Dy, за счёт механизма одноионной анизотропии. Дело в том, что в ионах Tb, Dy (и других редкоземельных ионах), ответственная за магнетизм $4f$ -электронная оболочка находится в "глубине" иона. Выше располагаются другие оболочки, которые экранируют её от действия внутрикристаллического поля, в результате чего орбитальный момент M_{orb} не замораживается этим полем.

Необычайно высокая анизотропная магнитострикция наблюдалась в актинидных магнетиках (урановых, нептуниевых и др.). Так, в соединениях US при $T = 4,2$ К величина $\lambda_{[111]} = 7000 \cdot 10^{-6}$, а в NpFe_2 $\lambda_{[111]} = -8000 \cdot 10^{-6}$. В этих соединениях, так же как и в редкоземельных магнетиках, орбитальные магнитные моменты $5f$ -оболочек ответственны за возникновение гигантской анизотропной магнитострикции.

3.1.5. Материалы с гигантской магнитострикцией

Магнитострикция в кристалле создает магнитоупругую (добавочную) анизотропию, которая оказывает сильное влияние на ход кривой намагничивания. Металлы Tb, Dy, Ho, Er и ферриты-гранаты этих металлов (например, $\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) при низких температурах имеют необычайно высокие эффекты магнитострикции, на два-три порядка больше, чем магнитострикция в металлах, сплавах и ферритах группы Fe (при 100К для Tb $\lambda = 5,3 \cdot 10^{-3}$, для Dy $\lambda = 8,0 \cdot 10^{-3}$, для Ni при той же температуре $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-5}$). Установлено, что такие гигантские магнитострикции могут быть получены и при комнатных температурах путём использования ферромагнитных соединений: DyFe_2 , HoFe_2 , DyFe_3 и др. Точки Кюри этих соединений выше комнатной температуры, поскольку в них входят атомы Fe. При этом здесь, как и в случае редкоземельных материалов высокого магнитного насыщения, необходимо принять меры к снижению "вредного" влияния огромной магнитной анизотропии, то есть уменьшить величину поля насыщения H_s .

Редкоземельные магнитные материалы обладают уникальными свойствами, которые нельзя получить в материалах, синтезируемых на основе группы Fe. Использование огромных величин магнитной анизотропии и магнитострикции в редкоземельных веществах и

нахождение путей управления ими, бесспорно, будут иметь большое значение для получения магнитных материалов с заданными свойствами.

3.1.6. Влияние спонтанной магнитострикции на тепловое расширение ферромагнетиков

В ферромагнетиках ситуация становится иной при температурах ниже температуры магнитного упорядочения T_C . Здесь возникает корреляция в ориентации спинов на дальних расстояниях, вследствие чего появляется кооперативный эффект – деформация образца вследствие спонтанной магнитострикции, в которой суммируются локальные деформации вблизи атомов за счёт ориентации их спинов. Благодаря этому кооперативному эффекту сумма энергий взаимодействий отдельных атомов – внутренняя энергия образца будет несколько по-другому зависеть от средних межатомных расстояний при $T < T_C$, чем при $T > T_C$. Этот эффект можно учесть рассматривая энергетические вклады в полную энергию твёрдого тела. В первую очередь необходимо учитывать энергию обменного взаимодействия, которая при охлаждении ниже T_C возрастает пропорционально квадрату спонтанной намагниченности.

Согласно теории молекулярного поля эта зависимость может быть описана формулой

$$E_0 = -AI_s^2, \quad (3.1)$$

где A – интеграл обменного взаимодействия; I_s – спонтанная намагниченность.

Так как A зависит от межатомных расстояний и атомного объёма, то следует учесть эту зависимость. Наиболее просто сделать это для атомного объёма. В этом случае магнитоупругая обменная энергия имеет вид

$$E_{0y} = -\gamma I^2 \omega, \quad (3.2)$$

где $\omega = \frac{\Delta V}{V_0}$ – относительное изменение объёма тела; $\gamma = \frac{\Delta A}{\Delta \omega}$ – крутизна обменного интеграла, которая показывает, как резко A изменяется с атомным объёмом.

При отклонении от положения равновесия атомов изменяется также и упругая энергия:

$$E_y = +\frac{k\omega^2}{2}, \quad (3.3)$$

где k – объёмный упругий модуль, характеризующий жёсткость кристаллической решетки.

Легко показать, что минимальное значение полной энергии достигается при относительном изменении объёма ω_s :

$$\omega_s = -\frac{\gamma I_s^2}{k}. \quad (3.4)$$

Величина ω_s называется спонтанной объёмной магнитострикцией. Она налагается на обычное тепловое расширение $\frac{\Delta V}{V}(T)$ при $T < T_c$ (рис. 3.6, кривая 2). В результате кривая теплового расширения существенно трансформируется (рис. 3.6, кривая 3). Для $\gamma > 0$ получим $\omega_s < 0$ и $\omega_s > 0$ для $\gamma < 0$. Отклонения кривой теплового расширения возможны как в сторону увеличения коэффициента теплового расширения, так и его уменьшения.

Коэффициент объёмного теплового расширения может быть рассчитан по кривой 3 (см. рис. 3.6) по формуле:

$$\alpha_v = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{V}{\Delta T}. \quad (3.5)$$

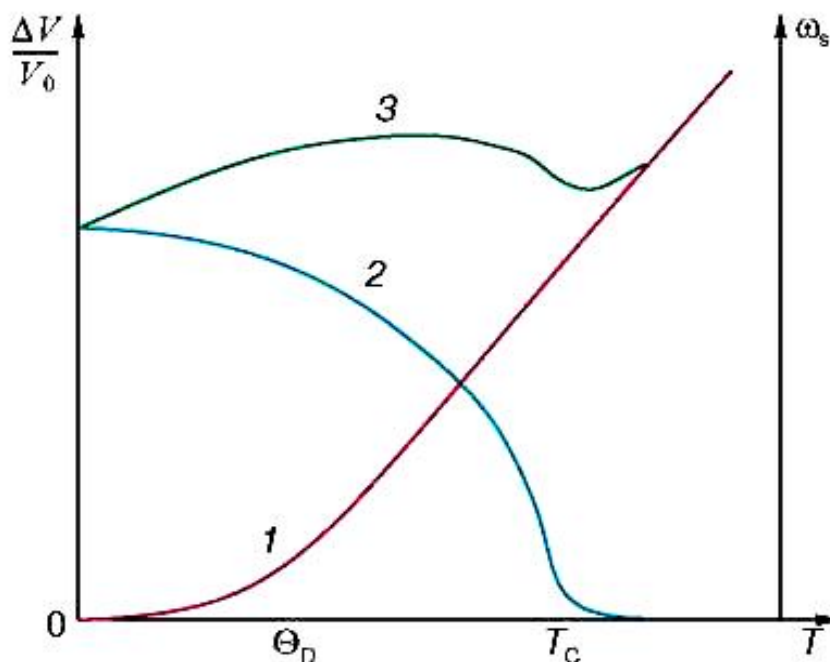


Рис. 3.6. Тепловое расширение ферромагнетика:

Температурные зависимости изменения относительного объема $\Delta V/V_0$ парамагнетика (1), спонтанной объемной магнитострикции ω_s ферромагнетика (2) и относительного изменения объема $\Delta V/V_0$ ферромагнетика (3) выше и ниже температуры Кюри T_C

Из кривой 3 (см. рис. 3.6) и формулы (3.5) следует, что a может принимать в ферромагнетике не только положительное значение, но может быть отрицательным, а также иметь нулевые значения.

Из соотношений (3.2) и (3.4) следует, что величина спонтанной магнитострикции содержит важную информацию о величине и знаке крутизны обменного интеграла γ . В анизотропных магнетиках изменение A при изменении межатомных расстояний вдоль различных кристаллографических направлений сильно отличается как по величине, так и по знаку. В этом случае аномалии теплового расширения при $T < T_C$ вдоль различных кристаллографических осей неодинаковы, а спонтанная

магнитострикция λ_c неодинакова вдоль различных кристаллографических направлений, то есть анизотропна. В ряде ферромагнетиков при $T < T_C$ существует температурная область с нулевым тепловым расширением ($\alpha = 0$). Такие температурные интервалы можно выделить на кривой 3 (см. рис. 3.6). Описанные выше аномалии теплового расширения наблюдаются не только в ферромагнетиках, но и в других магнитоупорядоченных веществах, как в кристаллических, так и в аморфных. Они получили название инварных эффектов по названию инварных Fe–Ni-сплавов, где впервые наблюдалось нулевое тепловое расширение при $T < T_C$.

Спонтанная магнитострикция и инварные эффекты наблюдаются не только в ферромагнетиках, но также и в других магнитоупорядоченных веществах (ферримагнетиках, антиферромагнетиках, спиральных магнетиках и др.). В последние годы были обнаружены гигантские аномалии теплового расширения при $T < T_C$ с относительным изменением

линейных размеров за счёт спонтанной магнитострикции $\frac{\Delta l}{l} = 10^{-2} \div 10^{-3}$ в урановых и редкоземельных магнетиках, сплавах Fe–Rh и некоторых аморфных магнетиках.

Спонтанная магнитострикция налагается на тепловое расширение, обусловленное тепловыми колебаниями атомов. Это проявляется в аномальном изменении размеров магнитоупорядоченного вещества (ферромагнетика, антиферромагнетика и других магнетиков) при нагреве и охлаждении по сравнению с неупорядоченными магнитными средами. Существует и другой родственный магнитоупругий эффект – изменение размеров магнитоупорядоченного вещества при действии магнитного поля. Этот эффект называется индуцированной полем магнитострикцией или просто магнитострикцией. Она является следствием спонтанной магнитострикции, однако на её величину влияют и другие факторы.

Рассмотрим их более подробно. Спонтанная магнитострикция

является результатом локальных деформаций, обусловленных магнитоупругим взаимодействием магнитных электронов с окружающими атомами. Его величина определяется зависимостью от межатомных расстояний обменных взаимодействий и взаимодействий электронных магнитных слоёв ионов с локальными электрическими полями.

Рассмотрим более детально магнитострикцию в ферро- и антиферромагнетиках на основе редкоземельных элементов. В них магнетизм связан с магнитным моментом $4f$ -подоболочки иона редкой земли (РЗ). Если она имеет орбитальный момент $L \neq 0$ и соответственно асимметричное распределение электронной плотности, то локальная магнитострикционная деформация (вокруг РЗ-иона) будет велика (из-за анизотропного магнитоупругого взаимодействия $4f$ -подоболочки с окружающими атомами). Суммирование этих деформаций при $T < T_C$ дает результирующую спонтанную магнитострикцию образца. Следовательно, чем больше ионов редких земель с $L \neq 0$ в магнетике, тем она больше. В общем случае она анизотропна и неодинакова при изменении угла, который образует направление магнитострикционного растяжения с намагниченностью домена I_s . Домен – это область однородного намагничивания. Известно, что реальные ферро- и антиферромагнетики имеют многодоменную структуру. Следовательно, внутри каждого домена будет существовать анизотропная магнитострикционная деформация – спонтанная магнитострикция [10].

При включении поля происходит рост тех доменов, у которых векторы спонтанной намагниченности I_s ориентированы наиболее энергетически выгодно по отношению к магнитному полю H . Поскольку магнитная энергия $E_m = -IH\cos\alpha$, то это означает рост доменов с векторами I_s , образующими наименьший угол α с полем H .

Величина спонтанной магнитострикции не изменяется, если направление вектора I_s изменить на обратное. В ферромагнетике, где

существует одна ось легкого намагничивания (ОЛН), имеются только два типа доменов с векторами I_s , направленными вдоль ОЛН. В одном домене $I_s \uparrow\uparrow$ ОЛН, в другом $I_s \uparrow\downarrow$ ОЛН. Поэтому в поле $H \uparrow\uparrow$ ОЛН процессы смещения не приводят к заметной, индуцированной полем, магнитострикции.

Иная ситуация возникает в ферромагнетике с несколькими ОЛН, ориентированными под определенными углами (например, 90° в кубической или 60° в гексагональной кристаллической решётке). В этом случае при включении поля H вдоль одной из ОЛН процессы смещения доменов с анизотропной магнитострикцией приводят к индуцированной магнитострикции, сравнимой по величине со спонтанной магнитострикцией.

Весьма существенным для величины магнитострикции является также высокая степень ориентации магнитных моментов ионов внутри доменов. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы энергия взаимодействия магнитных моментов ионов μ эффективным обменным полем H_e превышала тепловую энергию:

$$\mu_0 H > k_B T \quad (3.6)$$

где μ_0 – величина магнитного момента иона; k_B – постоянная Больцмана.

Итак, для наблюдения высоких значений магнитострикции в 4f-магнетиках необходимы:

- высокая концентрация РЗ-ионов с $L \neq 0$;
- наличие многих ОЛН;
- большие обменные поля, действующие на ионы РЗ.

Всем перечисленным условиям удовлетворяют в области температур $T < 200\text{K}$ редкоземельные ферро- и антиферромагнитные металлы (тербий, диспрозий и др.). В них наблюдаются гигантские значения спонтанной и индуцированной магнитострикции ($\Delta l/l \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$). Однако в области

комнатных температур величина H_0 в них недостаточно велика, чтобы преодолеть дезориентирующее действие теплового движения (температуры Кюри и Нееля не превышают $T = 300\text{К}$).

Величина эффективного обменного поля, действующего на РЗ-ионы, достигает более высоких значений в интерметаллических соединениях, содержащих кроме РЗ ионы $3d$ -металлов (Fe, Co). В этом случае "подмагниченные" $3d$ -электроны (коллективизированные $3d$ -электроны) "переносят" обменное взаимодействие от $3d$ -ионов к $4f$ -ионам. Такое косвенное обменное взаимодействие между $3d$ - и $4f$ - ионами приводит к сильному эффективному полю, действующему на РЗ-ионы, $H_0 \sim 3 \cdot 10^6$ Э. Это поле достаточно, чтобы ориентировать магнитные моменты РЗ-ионов даже при комнатной температуре, в результате чего, в некоторых из этих соединений с кубической кристаллической решеткой, спонтанная магнитострикция $\lambda_c \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ существует вплоть до комнатных температур. В магнитном поле в этих материалах также индуцируется гигантская магнитострикция $\lambda \sim 10^{-3}$ при $T \sim 300\text{К}$. К таким соединениям относится ферримагнетик TbFe_2 . Для снижения величины внешнего магнитного поля, необходимого для получения максимального эффекта, разработаны композиции типа $(\text{Tb}, \text{Dy})\text{Fe}_2$, где за счёт сплавления РЗ с разными знаками констант магнитной анизотропии гигантская магнитострикция достигается в сравнительно небольших магнитных полях ($\sim 10^2$ Э).

3.1.7. Влияние всестороннего сжатия на температуру магнитного упорядочения

К числу магнитоупругих эффектов следует также отнести смещение температур магнитного упорядочения при действии давления. Согласно теории молекулярного поля, температура Кюри ферромагнетика с

делокализованными атомными магнитными моментами $3d$ -ионов определяется соотношением

$$T_c = \frac{2}{3} zS(S+1) \frac{A}{k_B}, \quad (3.7)$$

где A – интеграл обменного взаимодействия между локализованными спинами S , z – число ближайших атомов.

Из формулы (3.7) следует, что изменение T_c с давлением:

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} zS(S+1) \frac{\Delta A}{\Delta P}. \quad (3.8)$$

Поскольку изменение относительного объёма тела

$$\Delta \omega = -\frac{k}{P},$$

где k – сжимаемость, то, определив смещение T_c с давлением, можно вычислить и крутизну обменных интегралов $\frac{\Delta A}{\Delta \omega}$.

Для температурного перехода парамагнетизм-ферромагнетизм при T_c в редкоземельных ферромагнитных металлах, где обменное взаимодействие между локализованными моментами $4f$ -ионов осуществляется через электроны проводимости, выполняется соотношение

$$T_c = \frac{2}{3k_B} GA_{\text{косв}}. \quad (3.9)$$

Здесь $G = (g_j - 1)^2 J(J + 1)$ – фактор де Жана;

$A_{\text{косв}}$ – интеграл косвенного обменного взаимодействия между ионами редких земель,

g_j – фактор Ланде, определяется квантовыми числами, характеризующими основные состояния иона редкой земли,

J – квантовое число полного механического момента этого иона.

Изменение T_C с давлением в этом случае:

$$\frac{\Delta T_C}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} G \frac{\Delta A}{\Delta P} . \quad (3.10)$$

Давление приводит к изменению атомного объёма и межатомных расстояний. Из формул (3.8) и (3.10) следует, что смещение температуры Кюри при всестороннем сжатии содержит информацию о зависимости обменных интегралов от давления и средних межатомных расстояний.

Проведённые исследования смещения температур T_C с давлением показали, что давление смещает T_C в кристаллических и аморфных $3d$ - и $4f$ -магнетиках со скоростью примерно $0,1 \div 10\text{K}$ на 1 кбар. В настоящее время во многих лабораториях существуют установки, которые позволяют создавать давление более 300 кбар. У большинства магнетиков T_C понижается с давлением, поэтому под действием столь больших давлений ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Зависимость обменных интегралов в кристаллических магнетиках от межатомных расстояний в кристаллах с некубической решёткой, как правило, резко анизотропна, то есть значение $\frac{\Delta A}{\Delta a}$ и $\frac{\Delta A}{\Delta c}$ (a и c – параметры кристаллической решётки) могут различаться как по величине, так и по знаку. Это связано с тем, что при всестороннем сжатии изменение перекрытия электронной плотности магнитных электронов вдоль разных осей неодинаково. Заметный вклад в эффект смещения температур Кюри с давлением вносит изменение энергетического спектра электронов проводимости, а также изменение обменного взаимодействия между локализованными магнитными электронами и электронами проводимости. Для зонных магнетиков необходимо учитывать влияние атомного объёма

на параметры зонной структуры (ширина зоны и плотность состояний на уровне Ферми).

Проведённые в последнее время исследования влияния всестороннего сжатия на температуры магнитных фазовых превращений редкоземельных магнетиков установили, что сжатие вызывает главным образом усиление антиферромагнитных взаимодействий, как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Это явление объясняется возрастанием при сжатии перекрытия электронных плотностей $5d$ - и $3d$ -электронов, которые являются "переносчиками" антиферромагнитных обменных взаимодействий. В кристаллических материалах действие высоких давлений в ряде случаев приводит к превращению ферромагнетиков в антиферромагнетики с угловым расположением магнитных моментов, а в аморфных материалах – к превращению ферромагнетиков в сперомагнетики и спиновые стёкла.

Таким образом, влияние магнитного упорядочения на упругие свойства проявляется в магнитоупругих эффектах, которые содержат важную информацию о магнитоупругих взаимодействиях в твёрдых телах, о зависимости от межатомных расстояний электронной структуры, обменных и магнитокристаллических взаимодействий. Многие магнитоупругие эффекты весьма перспективны для использования в технике, а некоторые (магнитострикция) уже нашли значительное применение.

3.2. Моделирование магнитострикционных манипуляторов

3.2.1. Описание магнитострикционного преобразователя

Рассмотрим магнитострикционный эффект подробнее.

Схема преобразования прямого магнитострикционного эффекта представлена на рис. 3.7.

В магнитострикционном преобразователе происходит композиционное преобразование энергии: из электромагнитной в механическую, а затем из механической в стрикционную (акустическую).

При этом происходит преобразование входного электромагнитного сигнала в механическое напряжение звукопровода (звено 1), вследствие которого по нему распространяется упругая (ультразвуковая) волна (звено 2).

3.2.2. Информационный метод проектирования новых технических решений

При конструировании систем перемещения перед инженерами возникают задачи поиска не только новых физических принципов действия, но и задачи сравнения и улучшения характеристик существующих технических решений. Широкое внедрение САПР, даже на начальных этапах разработки систем перемещения, позволит расширить объём используемых специалистами знаний, сократить время и трудоёмкость создания новых изделий за счёт выбора наиболее эффективных решений при их моделировании на ЭВМ, и, как следствие,

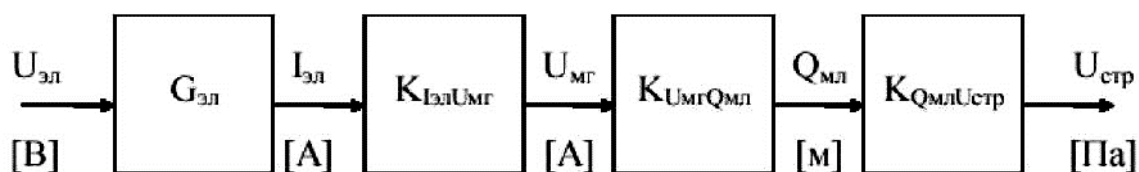


Рис. 3.7. Прямой магнестрикционный эффект:

$U_{эл}$ – электрическое напряжение, приложенное к обмотке катушки [В];

$I_{эл}$ – электрический ток, наведенный в обмотке катушки [А];

$U_{мг}$ – магнитодвижущая сила [А];

$G_{эл}$ – электрическая проводимость при постоянном потоке (при $U_{мг} = \text{const}$), т.е. величина, обратная активному сопротивлению обмотки плюс сопротивление индуктивности рассеяния [1/Ом];

$K_{элU_{мг}}$ – коэффициент электромагнитной связи [витки];

$K_{U_{мг}Q_{мл}}$ – коэффициент магнитомеханической связи [А/м];

$Q_{мл}$ – механический линейный заряд, т. е. деформация [м];

$K_{Q_{мл}U_{стр}}$ – коэффициент механострикционной связи [м/Па = м²·с²/кг];

$U_{стр}$ – стрикционное воздействие, т.е. механическое напряжение [Па]

уменьшить стоимость. Поэтому актуальной становится задача создания автоматизированной системы синтеза новых технических решений систем перемещения для систем управления различного назначения, поиска и анализа прототипов и аналогов.

Одним из способов реализации такого подхода является использование автоматизированного банка данных физико-технических эффектов (ФТЭ) и изобретений [12-15]. Увеличение объема информации в банке данных, связанное с появлением новых ФТЭ и изобретением новых промышленных образцов, значительно расширяет возможности эффективного синтеза технических решений и анализа существующих конструкций. Пополнение имеющегося банка данных, хотя бы одним ФТЭ, позволяет получить большее количество новых вариантов физического

принципа действия (ФПД) технического устройства, и, следовательно, необходимая часть системы – это автоматизированный отбор наилучших из полученных вариантов.

Информационная модель цепей (ИМЦ) различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем (ПСС) являются одним из подобных методов. Использование ИМЦ и ПСС требует большего времени для составления паспортов ФТЭ, но в то же время позволяет сделать процесс поискового конструирования технических устройств более содержательным, раскрывает качественные и количественные связи, акцентирует внимание разработчиков на наиболее ответственных узлах объекта. И, кроме того, позволяет перейти к структурной схеме устройства в целом и по ней составить уравнение, то есть дать количественную оценку характеристик устройства.

3.2.3. Основные понятия информационного моделирования

Целью определённой физической природы называется идеализированная материальная среда, имеющая определённые геометрические размеры и характеризующаяся физическими константами, присущими только явлениям данной физической природы [13].

Величины цепи одной и той же физической природы изменяются в широких пределах и характеризуют внешнее воздействие на цепь данной физической природы и её реакцию на него.

Параметры характеризуют относительную неизменность материальной среды, в которой протекают физические процессы.

Информационная модель оперирует обобщёнными величинами и параметрами:

N – мощность;

P – импульс;

Q – заряд реакции;

U – сила воздействия;

I – скорость реакции;

R – сопротивление;

$G = \frac{1}{R}$ – проводимость;

C – ёмкость;

$W = \frac{1}{C}$ – жёсткость;

L – индуктивность;

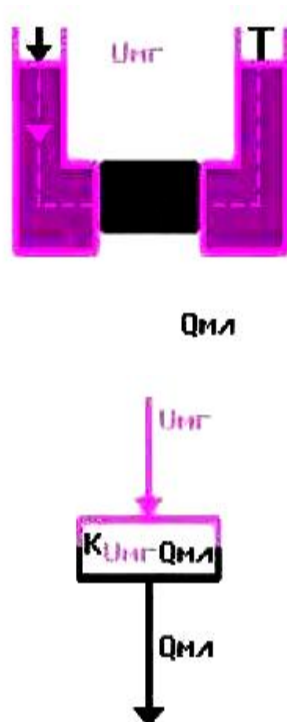
$D = \frac{1}{L}$ – дедуктивность.

Синтезированные параметрические структурные схемы в ИМЦ ранжируются с помощью 10 параметров, важнейший из которых – чувствительность.

3.2.4. Информационная модель магнитострикционного эффекта

Примем в качестве величины воздействия величину индукции магнитного поля B , с размерностью $[Тл] = \left[\frac{кг}{с^2 \cdot А} \right]$, так как именно данная величина является базовой при прямом магнитострикционном эффекте, например, линейном магнитострикционном эффекте, заключающемся в возникновении в некоторых антиферромагнетиках деформации при воздействии на них магнитного поля (рис. 3.8).

Если принять индукцию в качестве величины воздействия, то в качестве параметра реакции должна выступать величина с размерностью $\frac{м^2 \cdot А}{с}$, которая есть отношение магнитного момента p_m ко времени воздей-



Чувствительность:	4e-5	(М)/(А)
Цена:	10	руб
Надёжность:	1e-5	отк/час
Погрешность:	10	%
Нелинейность:	6	%
Диапазон:	0 ÷ 1e+9	А

Рис. 3.8. Магнитострикционный эффект

ствия t или более точно $\frac{dP_m}{dt}$. Физический смысл данной величины есть скорость изменения магнитного момента, возникающего из-за деформации образца в магнитном поле.

Тогда на основе понятия полного термодинамического потенциала внешнего воздействия, а также после применения теории подобия и анализа размерностей могут быть выведены основные величины и параметры (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Величины и параметры для расчёта магнитострикционного эффекта

Величины:	
Воздействие	$U = B \text{ [Тл]}$
Реакция	$I = \frac{dp_m}{dt} = \left[\frac{\text{М}^2 \cdot \text{А}}{\text{с}} \right]$
Заряд	$Q = p_m \text{ [М}^2 \cdot \text{А]}$
Импульс	$P = \int B * dt = \left[\frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}} \right] = [\text{Тл} \cdot \text{с}] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \right]$
Параметры:	
Ёмкость	$C = \frac{Q}{U} = \frac{p_m}{B} = \left[\frac{\text{М}^2 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{Вб}}{\text{М}^3} \cdot \frac{\text{А}}{\text{М}} \right] = \rho_m \cdot H$
Сопротивление	$R = \frac{\int B \cdot dt}{p_m} = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{А}^2 \cdot \text{М}^2} \right]$
Проводимость	$G = \frac{p_m}{\int B \cdot dt} = \left[\frac{\text{А}^2 \cdot \text{М}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}} \right]$
Жёсткость	$W = \frac{1}{C} = \frac{B}{p_m} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{М}^2 \cdot \text{А}^2 \cdot \text{с}^2} \right]$
Индуктивность	$L = \frac{P}{I} = \frac{\left(\int B \cdot dt \right) \cdot dt}{dp_m} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{А}^2 \cdot \text{М}^2} \right]$

В таблице:

 ρ_m – плотность магнитного заряда; H – напряжённость магнитного поля;

p_m – магнитный момент.

Физический смысл ёмкости C есть (с точностью до коэффициента) механический момент образца

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{B}.$$

Далее, воспользуемся известной зависимостью:

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{H^2}{2} \left[\beta \chi - \left(\frac{\delta \chi}{\delta p} \right)_T \right] \Rightarrow H \cong \sqrt{\frac{2\Delta V}{Vk}} = \sqrt{\frac{2\lambda}{k}},$$

где λ_v – объёмная магнитострикция;

H – напряжённость магнитного поля;

$\beta = -\frac{1}{V} \left(T \frac{V}{Tp} \right)_{H.T.}$ – изотермическая сжимаемость материала;

$\chi = \frac{P_m}{HV}$ – изотермическая магнитная восприимчивость (обычно χ не зависит от H и может считаться характеристическим свойством образца);

k – коэффициент, $k = \beta \chi - \left(\frac{\partial \chi}{\partial p} \right)_T$.

Из равенства

$$B = \mu_0 \left(1 + \frac{C}{T - T_c} \right) H,$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

T – температура материала;

T_c – точка Кюри;

C – постоянная Кюри,

получаем:

$$B = \mu_0 \left(1 + \frac{C}{T - T_c} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\lambda}{k}},$$

что позволяет связать величину воздействия с параметрами материала.

Здесь μ_0 – магнитная постоянная;

T – температура материала;

T_c – точка Кюри;

C – постоянная Кюри;

λ_v – объёмная магнитострикция.

Таким образом, в рамках информационного метода, можно построить модель магнитострикционного эффекта, которая пригодна для автоматизации научно-технического творчества и учитывает свойства магнитострикционных материалов.

В магнитострикционных эффектах осуществляется преобразование входной величины U_{MG} магнитной цепи в величину Q_{ML} механической линейной цепи. Таким образом, схема прямого магнитострикционного эффекта есть $U_{MG} - K_{U_{MG}Q_{ML}} - Q_{ML}$, где $K_{U_{MG}Q_{ML}}$ есть коэффициент преобразования или чувствительность магнитострикционного эффекта.

Согласно определению чувствительность – отношение изменения выходной величины $B_{ВЫХi}$ к изменению входной величины $B_{ВХj}$:

$$K(B_{-j}) = \frac{dB_{-i}}{dB_{-j}}.$$

В общем случае $B_{ВЫХi}$ и $B_{ВХj}$ – величины разной физической природы ($i \neq j$).

Известно, что для характеристики интенсивности магнитострикционных колебаний в переменном магнитном поле, при наличии постоянного подмагничивания, вводится магнитострикционная постоянная a

$$a = \frac{\Delta\sigma}{\Delta B} \text{ при } \frac{\Delta l}{l} \neq 0, \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Важным параметром магнитострикционных материалов является коэффициент магнитомеханической связи K_{MM} :

$$K_{MM} = \sqrt{\frac{4\pi a^2 \mu}{E}} = \sqrt{\frac{\mu E \lambda_s}{B}},$$

где λ_s – магнитострикция при насыщении намагничивания;

μ – действующая магнитная проницаемость материала звукопровода при наличии постоянного подмагничивающего поля, $\frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$;

E – модуль упругости, Па.

Коэффициент магнитомеханической связи:

$$K_{U_{MG} Q_{MI}} = k \cdot a = \frac{F}{\Phi} \text{ (при } x = 0) = \frac{M}{x} \text{ (при } \Phi = 0), \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

где x – деформация, м;

a – магнитострикционный коэффициент (см. выше), $\frac{\text{А}}{\text{м}}$;

k – безразмерный коэффициент, зависящий от устройства преобразователя;

Φ' – производная магнитного потока по времени, В;

Φ – магнитный поток, Вб;

F – сила, Н.

Таким образом, коэффициент магнитомеханической связи K_{MM} характеризует эффективность энергетических преобразований подводимой магнитной энергии в энергию упругих волн и наоборот может выступать в качестве параметра чувствительности при описании магнитострикционного эффекта с помощью информационного метода.

Поскольку предложенная модель магнитострикционного эффекта связывает параметры ИМЦ и параметры ФТЭ со свойствами магнитострикционных материалов, то она дает возможность учесть свойства материалов при проектировании датчиковой аппаратуры, что особенно важно при разработке прецизионной и высокочувствительной техники.

3.3. Расчет магнитного поля постоянного магнита для магнитострикционных систем перемещений

Напряжённость магнитного поля находится в точках цилиндрического волновода намагниченного кольцевым постоянным магнитом с заданной постоянной индукцией внутри магнита. Трёхмерный интеграл с дельта-функцией сводится к двумерным интегралам, по которым вычисляется продольная составляющая вдоль волновода напряжённости магнитного поля и радиальная составляющая.

Исследованиями установлено, что конструкции преобразователей перемещений на основе магнитострикционного эффекта являются наиболее простыми и надёжными в эксплуатации, и имеют наибольшее распространение в промышленности. Однако, практически нерешенной остается задача оптимизации проектирования данного класса преобразователей из-за отсутствия полной аналитической модели, описывающей электромагнитомеханические процессы в МПП на основе эффекта магнитострикции.

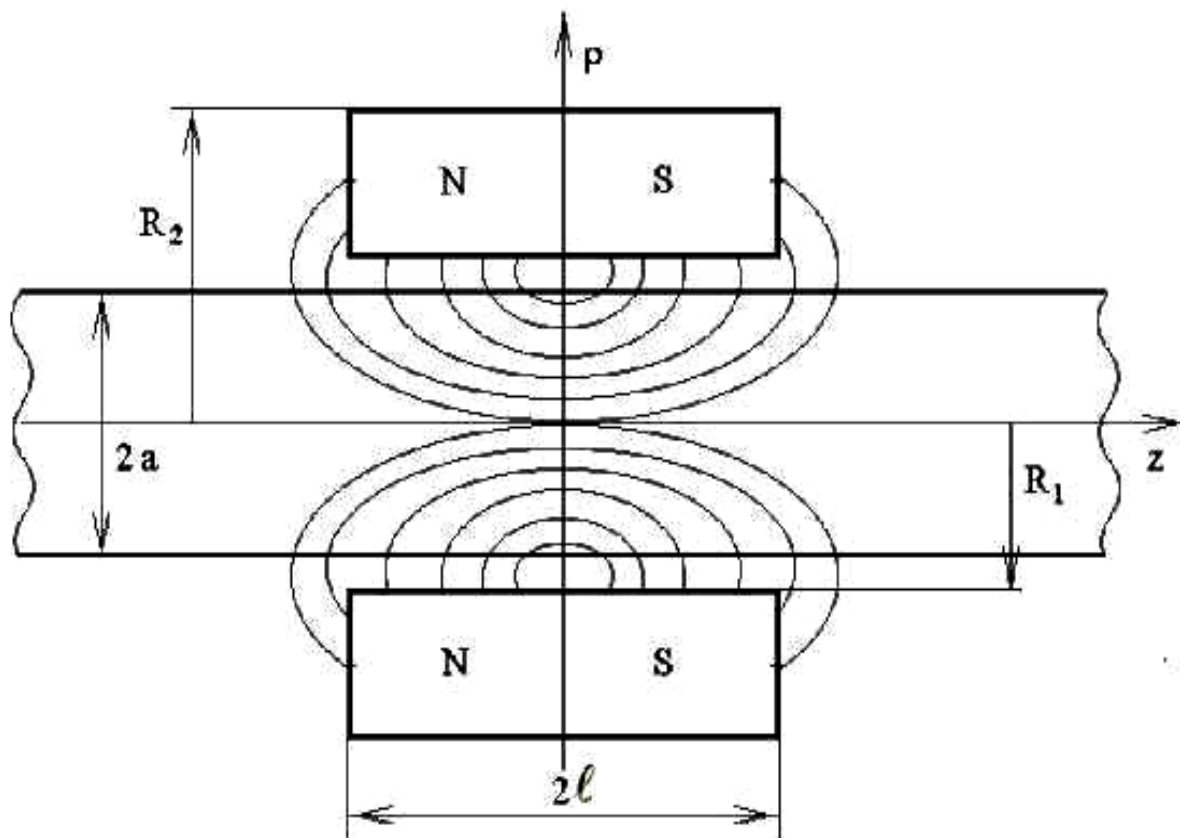


Рис. 3.9. Распределение магнитного поля в волноводе МПП в зоне действия кругового постоянного магнита

Рассмотрим один из главных этапов проектирования – расчёт постоянного магнитного поля. Магнитострикционные устройства, основанные на применении эффекта Видемана, предполагают наложение на материал постоянного магнитного поля. Чаще всего его он образуется с помощью постоянного магнита. Поле последнего зависит от конфигурации магнита. Будем рассматривать кольцевой магнит, находящийся на волноводе (рис. 3.9).

Напряжённость кольцевого постоянного магнита внутри звукопровода определяется функциями:

$$H_z(p, z) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{-l}^l \frac{(z - z_1) p_M}{R^3} p_1 dp_1 d\theta_1 dz_1 ;$$

$$H_p(p, z) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{-l}^l \frac{(p - p_1 \cos \theta_1) p_M}{R^3} p_1 dp_1 d\theta_1 dz_1 . \quad (3.11)$$

Здесь $R = \sqrt{(z - z_1)^2 + p^2 + p_1^2 - 2pp_1 \cos \theta_1} ; \quad (3.12)$

ρ_1, θ_1, z_1 – координаты точки внутри магнита;

$$\rho_M = B_0 [\delta(z_1 + 1) - \delta(z_1 - 1)],$$

где ρ_M – плотность фиктивных магнитных зарядов;

$\delta(x)$ – дельта функция Дирака.

Вычисление тройных интегралов весьма затруднительно.

Используя свойства функции (3.12), тройные интегралы (3.11) можно привести к двойным интегралам:

$$H_z(p, z) = \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(z + 1) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt{[(z + l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} -$$

$$- \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(z - l) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt{[(z + l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} ;$$

$$H_p(p, z) = \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(p - p_1 \cos \theta_1) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt{[(z + l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} -$$

$$- \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(p - p_1 \cos \theta_1) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt{[(z - l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} .$$

В интегралах уже расставлены пределы интегрирования. Их значения можно получить с помощью двойных квадратур.

Произведён расчёт в программе MatchCad и построены графики изменения напряжённости магнитного поля вдоль волновода.

Исходными данными к расчёту являются следующие значения:

- 1) длина магнита $l = 0,004$ м;
- 2) радиус волновода $a = 0,0025$ м;
- 3) внутренний радиус магнита $R_1 = 0,0026$ м;
- 4) внешний радиус магнита $R_j = 0,03$ м;
- 5) магнитная индукция внутри магнита $B_0 = 10^{-6}$ Тл.

На рис. 3.10 представлен график изменения напряженности магнитного поля в точках цилиндра с радиусами: 0,0015 м; 0,002 м; 0,0025 м вдоль оси OZ . График функции имеет колоколообразную форму, причём при приближении к поверхности волновода он возрастает.

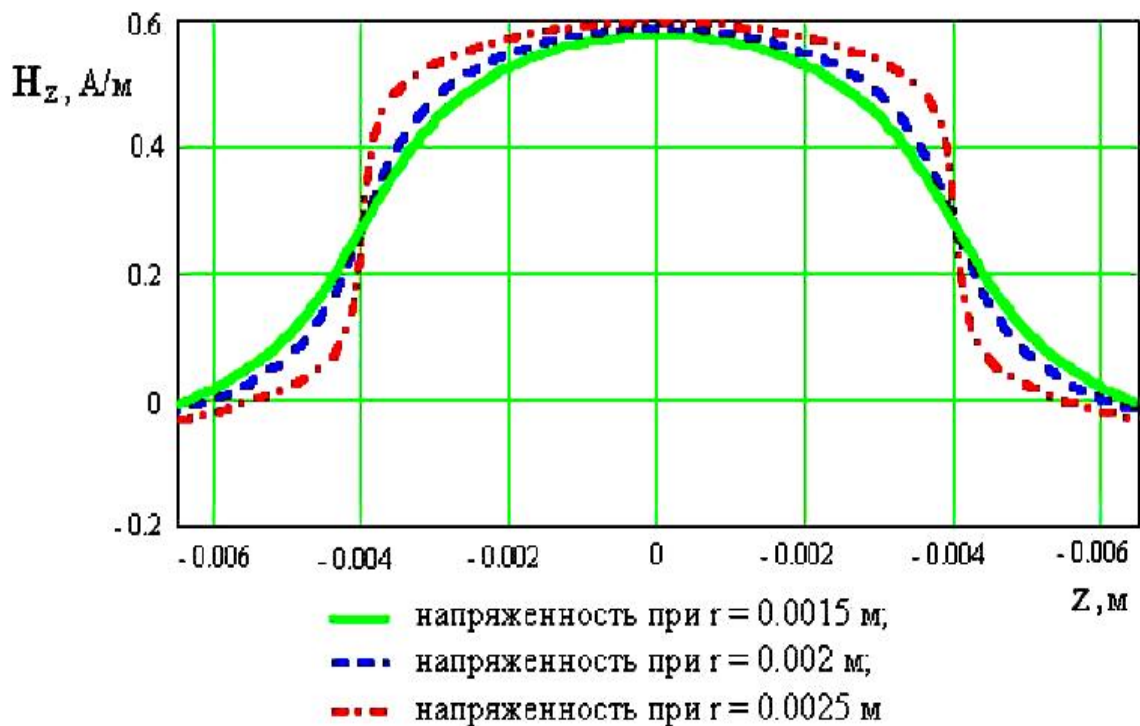


Рис. 3.10. Продольная составляющая напряжённости магнитного поля

Так как длина магнита $l = 0,004$ м, то магнитное поле выходит за пределы магнита в одну и другую сторону, причём это влияние не распространяется больше, чем на 25% длины магнита.

На рис. 3.11 показан график изменения радиальной составляющей для точек тех же цилиндров. Следует отметить, что по оси волновода $\rho = 0$ поле отсутствует и увеличивается его напряжённость, по мере приближения к поверхности волновода. На поверхности волновода, по торцам магнита, наблюдается резкое возрастание напряжённости магнитного поля и затем, на расстоянии 25% от длины магнита, затухание до нуля. Внутри магнита напряжённость, медленно изменяясь, переходит от северной стороны магнита – к южной. Для магнитострикции наиболее важный участок изображен от $-0,004$ до $0,004$ м.

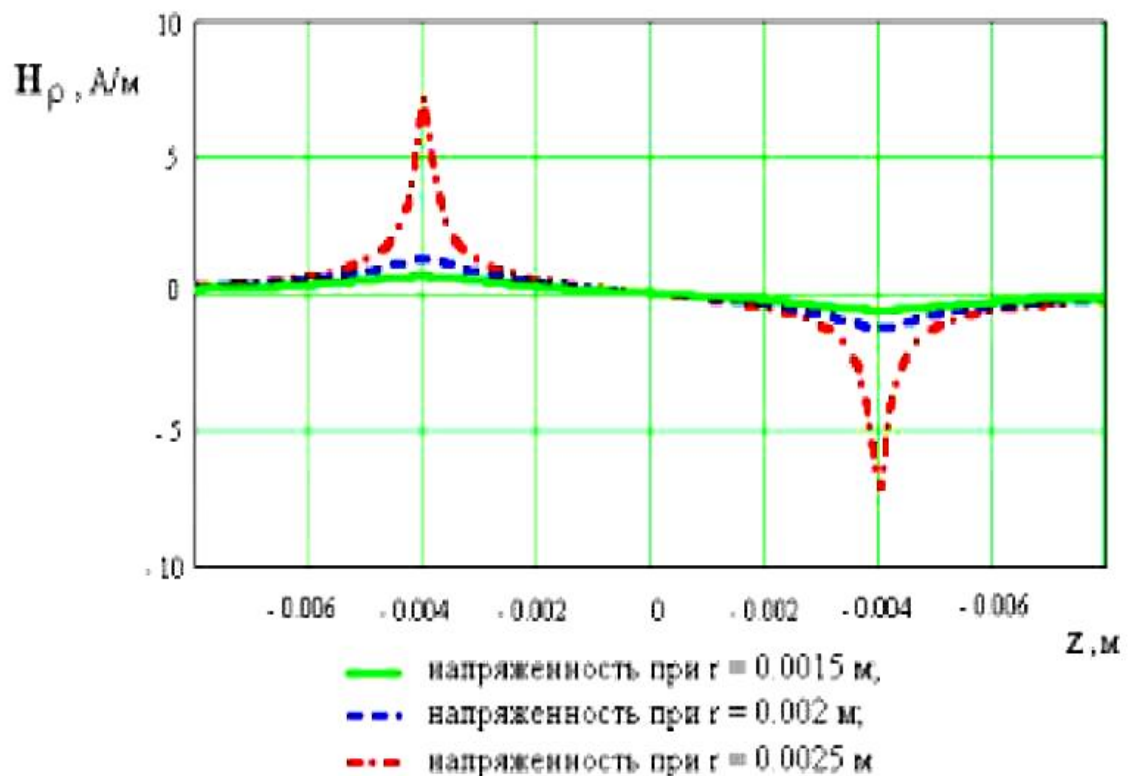


Рис. 3.11. Радиальная составляющая напряжённости магнитного поля

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

4.1. Математическая модель пьезосканера на основе пьезоэлектрического элемента

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент (рис. 4.1) поперечного сечения S_0 , закреплённый одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер l_0 которого изменяется под действием электрического поля E в направлении действия поля на значение Δ , и перемещающий исполнительный орган массой m_0 , сочленённый с его свободным концом.

Кроме исполнительного органа перемещаются также элементы объёма активной части пьезопривода (ПП), масса которого m_k чаще всего меньше, чем масса исполнительного органа. При этом инерционностями перемещающихся элементарных объёмов ПП можно пренебречь либо, имея в виду, что ПП закреплён одним концом и эта его часть не принимает участия в движении, уточнить значение суммарной приведенной подвижной массы m_Σ включив в неё кроме массы ИО m_0 часть массы ПП m_k .

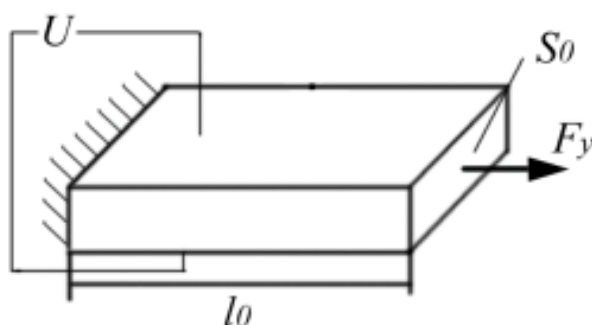


Рис. 4.1. Пьезоэлектрический элемент

Основное динамическое усилие в рассматриваемом случае действует на ПП также в направлении приложенного поля, поэтому для описания пьезоэффектов можно воспользоваться уравнением [65]:

$$P = -d_n \sigma + \varepsilon_0 \chi E , \quad (4.1)$$

где P – поляризованность пьезоэлемента;

σ – механическое напряжение в пьезоэлементе;

ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

χ – диэлектрическая восприимчивость пьезоматериала;

E – напряженность поля.

Из уравнения обратного пьезоэффекта получим

$$\frac{\Delta Y S_0}{l_0} = d_n Y S_0 E - S_0 \sigma , \quad (4.2)$$

где Δ – деформация пьезоэлемента;

Y – модуль упругости;

S_0 – поперечное сечение пьезоэлемента;

l_0 – первоначальная длина пьезоэлемента.

Выражение в левой части (4.2) описывает усилие упругой деформации F_y , первое слагаемое в правой части (4.2) – усилие в ПП, вызванное приложенным электрическим полем $F_{\text{Э}}$. Механическое напряжение, входящее во второе слагаемое правой части (4.2), определяется статическим усилием F_C , приложенным к ИО и действующим на ПП со стороны ИО, а также комплексом усилий, возникающих при движении ИО: динамическим усилием $F_{\text{дин}}$ пропорциональным ускорению ИО, и демпфирующим усилием $F_{\text{д}}$ пропорциональным скорости смещения ИО и вызванным процессами

диссипации энергии в ПП. Описанная детализация позволяет записать (4.2) в виде следующего условия равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части ПП:

$$F_Y = F_{\mathcal{E}} + F_C + F_D + F_{\text{ДИН}} , \quad (4.3)$$

где $F_Y = K_Y \Delta$ – усилие упругой деформации ПП, Н;

$F_{\mathcal{E}} = d_{11} Y S_0 E$ – усилие в ПП, вызванное приложенным электрическим полем, Н;

F_C – статическое усилие, приложенное к ИО, Н;

$F_D = -\frac{K_D d \Delta}{dt}$ – демпфирующее усилие в ПП, Н;

$F_{\text{ДИН}} = -\frac{m_{\Sigma} d^2 \Delta}{dt^2}$ – динамическое усилие в ПП, Н;

$K_Y = \frac{Y S_0}{l_0}$ – коэффициент упругости ПП, Н/м;

K_D – коэффициент внутреннего демпфирования ПП, кг/с;

m_{Σ} – эквивалентная приведенная суммарная масса подвижных частей, кг.

Воспользуемся также выражением для тока смещения в диэлектрике I_{CM} . Учитывая, что для пьезоэлектрических материалов $\chi \gg \gg 1$, запишем:

$$I_{CM} = \frac{S_0 dp}{dt} . \quad (4.4)$$

Введём σ из (4.2) в уравнение прямого пьезоэффекта (4.1) и продифференцируем полученную зависимость по времени, полагая модуль Юнга и диэлектрическую восприимчивость не зависящими от напряжённости электрического поля и от механической напряжённости в ПП.

Подставив результат дифференцирования в (4.4), получим

$$I_{CM} = \frac{C_0 dU}{dt} + K_{II} V, \quad (4.5)$$

где $C_0 = \frac{\epsilon_0 \lambda S_0 (1 + K_{ЭМ}^2)}{l_0}$ – емкость ПП, Ф;

$K_{II} = K_Y d_{II}$ – коэффициент прямого пьезоэффекта, К/м;

$U = El_0$ – напряжение, приложенное к электродам ПП, В;

$V = \dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt}$ – скорость исполнительного органа, м/с;

$K_{ЭМ}^2 = \frac{d_{II}^2 Y}{\epsilon_0 \chi}$ – коэффициент электромеханической связи.

Установим связь между усилием $F_{Э}$ и электрическим напряжением, приложенным к электродам ПП:

$$F_{Э} = K_0 U, \quad (4.6)$$

где $K_0 = K_Y d_{II}$ – коэффициент обратного пьезоэффекта, Н/В.

Отметим, что коэффициенты обратного и прямого пьезоэффектов равны между собой.

Примем, что заряд ПП осуществляется от источника ЭДС E_{II} через эквивалентное внутреннее сопротивление последнего R_{BT} . Для такой цепи справедливо уравнение

$$\frac{E_{II} - U}{R_{BT}} = I_{CM}. \quad (4.7)$$

После преобразований выражений (4.5) – (4.7) получим

$$\frac{dF_{Э}}{dt} = \frac{K_0 e_{II} - F_{Э}}{C_0 R_{BT}} - \frac{K_0 K_{II}}{C_0}. \quad (4.8)$$

Уравнение (4.8), в сочетании с двумя нижеприведёнными (4.9) и (4.10), которые могут быть выведены из выражений для составляющих усилия F_B

$$\frac{dV}{dT} = \frac{F_{\Sigma} + F_C - K_Y \Delta - K_D}{m_{\Sigma}}; \quad (4.9)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = V, \quad (4.10)$$

образуют полную систему дифференциальных уравнений, описывающих ПП с ИО при сделанных выше допущениях.

На основании уравнений (4.9) – (4.10) составлена структурная схема. Сворачивание структуры приводит к следующей передаточной функции ПП, управляемого от источника ЭДС:

$$W_{\Delta}^{\Sigma}(p) = \frac{\Delta(p)}{e_{\Pi}(p)} = \frac{K_0 / K_Y}{1 + \left(R_{BT} C_0 + \frac{K_D}{K_Y} + R_{BT} K_{\Pi} \frac{K_0}{K_Y} \right) p + \left(\frac{m_{\Sigma}}{K_Y} + R_{BT} C_0 \frac{K_D}{K_Y} \right) p^2 + R_{BT} C_0 \frac{m_{\Sigma}}{K_Y} p^3}. \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) показывает, что в ПП кроме демпфирования, обусловленного внутренними диссипативными процессами, имеет место также демпфирование, связанное с прямым пьезоэффектом [16].

Полученное выше описание ПП (4.8) – (4.11) пригодно не только для простейшего случая однородного плоского элемента. В области частот от нуля до первого механического резонанса оно удовлетворительно описывает процессы в ПП всех типовых конструкций, обеспечивающих повышенные перемещения – наборных столбцах, кольцеобразных, биморфных и мембранных ПП. Наилучшее совпадение динамических характеристик модели и объекта получается при использовании для

моделирования экспериментально определенных параметров m_{Σ} , K_Y , K_0 , K_D , C_0 , R_{BT} .

Явление прямого пьезоэффекта затрудняет формирование управляющего поля, особенно при реализации быстропротекающих динамических процессов. Усилители на мощных транзисторах имеют выходное сопротивление порядка десятков Ом. Это позволяет при анализе динамики ПП малой ёмкости (биморфные элементы) пренебрегать малой электростатической постоянной времени $T_{\Sigma} = R_{BT}/C_0$. При управлении ПП большой ёмкости для компенсации явлений, связанных с прямым пьезоэффектом, необходимо применять специальные технические меры, такие как организация специальных быстродействующих контуров регулирования управляющего поля, включение в схему усилителя дополнительных диодов, образующих цепи замыкания наведенных токов [16]. Пренебрежение в (4.11) внутренней обратной связью по скорости ($K_D \approx 0$), влиянием внутреннего демпфирования ($K_D \approx 0$) и инерционностью преобразователя ($T_{\Sigma} \approx 0$), приводит к передаточной функции консервативного звена:

$$W_{\Delta f}^{\Sigma}(p) = \frac{\Delta(p)}{e_{II}(p)} \approx \frac{\left(\frac{K_0}{K_Y}\right)}{1 + \frac{m_{\Sigma}}{K_Y} p^2}. \quad (4.12)$$

Следует отметить, что по частоте $\omega_M = \left(\frac{K_Y}{m_{\Sigma}}\right)^{\frac{1}{2}}$ и амплитудам первых колебаний реально наблюдаемая затухающая переходная функция, соответствующая передаточной функции (4.11), мало отличается от незатухающей переходной функции, отвечающей выражению (4.12). Консервативное звено (4.12) может рассматриваться как модель самого грубого первого приближения для многих ПП.

Недостатком пьезокерамики является так называемый крип-эффект (*creep* – ползучесть) – запаздывание реакции на изменение величины управляющего электрического поля. На рис. 4.2 схематично показаны временные диаграммы изменения управляющих полей и соответствующих смещений сканера по оси Z и в плоскости X, Y [1].

Крип-эффект приводит к тому, что в СЗМ изображениях наблюдаются геометрические искажения, связанные с этим эффектом. Особенно сильно крип-эффект сказывается при выводе сканера в заданную точку для проведения локальных измерений и на начальных этапах процесса сканирования. Для уменьшения влияния крип-эффекта керамики применяются временные задержки в указанных процессах, позволяющие частично скомпенсировать запаздывание сканера.

Проведем аналогию и рассмотрим пьезосканер как груз, закреплённый на неподвижном основании пружиной с жесткостью k .

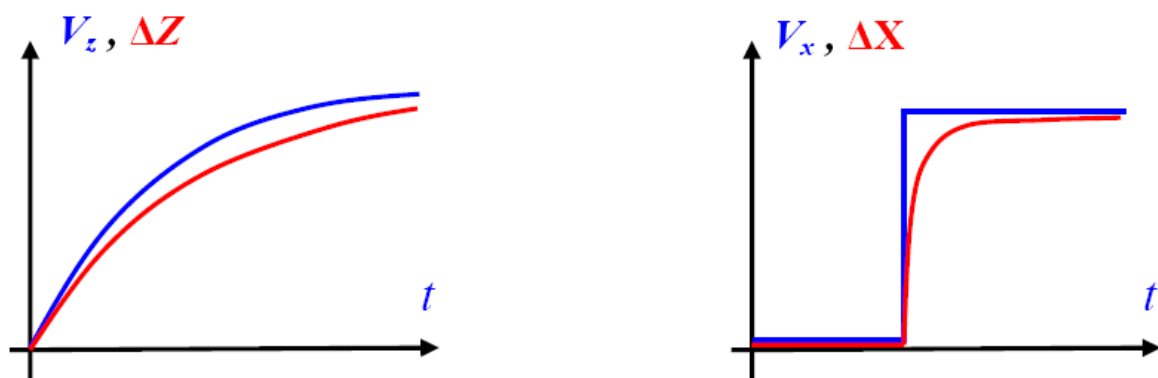


Рис. 4.2. Схематические временные диаграммы изменения управляющего поля на Z -электроде в цепи обратной связи и на X -электроде в процессе сканирования (верхние графики). на нижних графиках схематично показаны зависимости, соответствующие реакции сканера на изменение управляющих напряжений

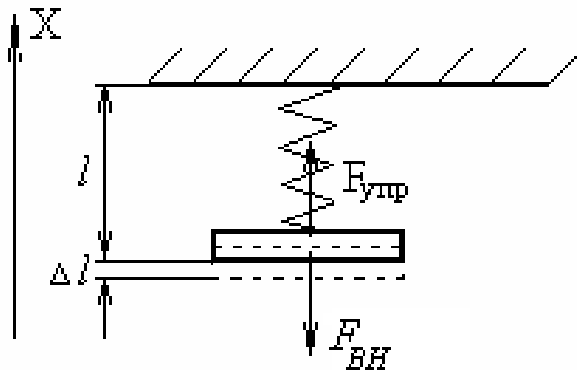


Рис. 4.3. Приближенная модель пьезосканера

В качестве модели системы с одной степенью свободы рассмотрим тело массой m , удерживаемое упругой связью с жесткостью k (рис. 4.3). На тело действует вынуждающая сила:

$$F_{BH} = \frac{Q}{d} = \frac{CU}{d},$$

где C – емкость, d – пьезомодуль, U – управляющее напряжение.

В этом случае уравнение движения груза имеет вид

$$\ddot{x}m + kx = \frac{CU}{d},$$

или после деления на m

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \frac{CU}{md}.$$

Решаем уравнение:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0, \text{ где}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

$$k = \frac{S \cdot E}{l}.$$

Решение уравнения:

$$x = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \frac{F_{BH}}{k},$$

если $t = 0$, $x = 0$,

$$\text{то } C_1 = -\frac{F_{BH}}{k},$$

$$\text{если } t = \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2\omega}, \quad \text{то } x = C_1 \cos \frac{\pi}{2} + C_2 \sin \frac{\pi}{2} + \frac{F_{BH}}{k},$$

$$\text{если } x = \frac{F_{BH}}{k}, \Rightarrow C_2 = 0, \quad x = -\frac{F_{BH}}{k} \cos \omega t + \frac{F_{BH}}{k},$$

$$x = \frac{F_{BH}}{k} (1 - \cos \omega t).$$

$$v = \dot{x} = -\frac{F_{BH}}{k} \omega \sin \omega t,$$

$$a = \ddot{x} = -\frac{F_{BH}}{k} \omega^2 \cos \omega t.$$

$$\text{если } t = 0, \quad \text{то } a = -\frac{F_{BH}}{k} \omega^2, \quad v = 0, \quad x = 0.$$

$$\text{если } t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega}, \quad \text{то } a = 0, \quad v = -\frac{F_{BH}}{k}, \quad x = -\frac{F_{BH}}{k}.$$

F_{BH} можно также записать как

$$F_{BH} = \sigma S = \frac{\Delta l_{\max}}{l} ES,$$

$$\text{выше } F_{BH} = \frac{Q}{d} = \frac{CU}{d},$$

$$\frac{C \cdot U}{d} = \frac{\Delta l_{\max}}{l} \cdot E \cdot S \Rightarrow \Delta l_{\max} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S}$$

– эта формула связывает механические и пьезоэлектрические

свойства материала.

В качестве времени выхода пьезосканера в нужную точку возьмём четверть периода ($T/4$) гармонической функции, это время соответствует максимальному значению функции, в которое она выходит за это период.

Расчётная часть

В качестве материала пьезосканера возьмём пьезокерамику состава ЦТС 19.

Её параметры:

$$D = 200 \cdot 10^{-12} \text{ В/м}, \quad E = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2, \quad \varepsilon = 1500, \quad \rho = 7 \text{ гр/см}^3.$$

Пьезосканер представляет собой цилиндр с радиусом основания $R = 10$ мм и высотой $h = 30$ мм.

$$S = \pi R^2 = 3,14 \cdot (10^{-2})^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{h} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1500 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-2}} = 13,9 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

Рассчитаем максимальное удлинение и вместе с ним и время выхода на режим для различных значений напряжения: $U = 10\text{В}; 30\text{В}; 50\text{В}; 100\text{В}$ и 200В .

$$\Delta l_{\max 1} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 9,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$\Delta l_{\max 2} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 30 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 28,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$\Delta l_{\max 3} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 50 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 47,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$\Delta l_{\max 4} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 100 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 95 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$\Delta l_{\max 5} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 200 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 190 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Как видно, увеличивая напряжение, мы увеличиваем длину пьезосканера. Найдём время выхода на данную длину пьезосканера.

$$t = \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m \cdot \Delta l \cdot d}{C \cdot U}}.$$

$$m = V \cdot \rho = S \cdot h \cdot \rho = 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^3 = 65,94 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 9,5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{13,9 \cdot 10^{-11} \cdot 10}} = 14,9 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Вычислим перемещение конца столбца по другой, известной ранее формуле:

$$\begin{aligned} \xi &= dU - \frac{4S_{33}hF_c}{\pi D^2} = \\ &= 200 \cdot 10^{-12} \cdot 10 - \frac{4 \cdot 1,43 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 1,46}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м.} \end{aligned}$$

где h, D – геометрические параметры трубки и столбца, м;

U – напряжение питания пьезодвигателя, В;

S_{33} – величины, обратные модулю упругости пьезоматериала трубки и столбца;

F_c – внешняя силовая нагрузка, Н.

$$\begin{aligned} F_{c \max} &= \frac{\pi d D^2 U}{4 S_{33} h} = \\ &= \frac{3,14 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{4 \cdot 1,43 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 1,46 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Посчитаем, какое напряжение необходимо для выхода на данную длину за время на порядок меньше.

$$t = \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m \cdot \Delta l \cdot d}{C \cdot U}} \Rightarrow U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C}.$$

Пусть $t = 10^{-5}$ с:

для $\Delta l = 9,5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C} = \frac{3,14^2 \cdot 65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 9,5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13,9 \cdot 10^{-11}} = 22,21 \text{ В};$$

для $\Delta l = 28,5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C} = \frac{3,14^2 \cdot 65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 28,5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13,9 \cdot 10^{-11}} = 67 \text{ В};$$

для $\Delta l = 47,5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C} = \frac{3,14^2 \cdot 65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 47,5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13,9 \cdot 10^{-11}} = 111 \text{ В};$$

для $\Delta l = 95 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C} = \frac{3,14^2 \cdot 65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 95 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13,9 \cdot 10^{-11}} = 222 \text{ В};$$

для $\Delta l = 190 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4t^2 C} = \frac{3,14^2 \cdot 65,94 \cdot 10^{-3} \cdot 190 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13,9 \cdot 10^{-11}} = 444 \text{ В}.$$

Результаты расчётов представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1
Результаты расчётов

U , В	$\Delta l \cdot 10^9$ м	$U_{ск}$, В
10	9,5	22,2
30	28,5	67
50	47,5	111
100	95	222
200	190	444

Таким образом, что бы за меньший интервал времени выйти на нужную величину, нужно подать скачек напряжения за этот интервал и вернуть значение напряжения на тот уровень, который обеспечивает эту величину приращения.

4.2. Выбор основных параметров пьезосканера

Электронные устройства, используемые в сканирующей туннельной микроскопии, традиционны, и вся специфика прибора в основном связана с конструкцией двигателей перемещения зонда и образца. К этим двигателям предъявляются жёсткие и отчасти противоречивые требования.

Во-первых, они должны обеспечивать, по возможности, большие перемещения при высокой жесткости устройства, что необходимо для защиты сканирующего туннельного микроскопа от механических вибраций. Поэтому они должны обладать высокими частотами

собственных механических колебаний, что желательно также и для обеспечения быстродействия.

Во-вторых, задаваемые перемещения должны быть воспроизводимы и, по возможности, линейно зависеть от управляющего напряжения.

В-третьих, учитывая, что даже в термоскомпенсированной конструкции локальные источники тепла приводят к изменению температуры по направлению (появлению градиента температур) и вызывают искажения линейных размеров деталей конструкции микроскопа, необходимо уменьшать мощность управляющих сигналов.

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют двигатели из пьезокерамики, обладающей высоким коэффициентом преобразования электрической энергии в механическую (до 40 %).

Выделим следующие параметры, по которым оценивается качество пьезосканера.

Быстродействие пьезосканера. Способность пьезосканера выполнять с необходимой скоростью сканирование, либо перемещение объекта.

Погрешность позиционирования. Точность, с которой обеспечивается сканирование или перемещение объекта.

Ход исполнительного устройства. Перемещение, которое обеспечивает пьезосканер.

Так же пьезосканеры оцениваются общепринятыми параметрами, такими, как его *габариты, стоимость, ресурс, масса.*

Для оценки линейности пьезосканера рассмотрим поперечный и продольный пьезоэффекты. Существуют две схемы пьезопреобразователей: трубка и столбец [7].

Перемещение конца пьезодвигателя-трубки (рис. 4.4) равно

$$\xi = 2 \frac{d_{31} \ell U}{D - d} - 4 \frac{S_{11} \ell F_c}{\pi (D^2 - d^2)}, \quad (4.13)$$

пьезодвигателя-столбца (рис. 4.5):

$$\xi = n d_{33} U - 4 \frac{n S_{33} h F_c}{\pi D^2}, \quad (4.14)$$

где d_{31} , d_{33} – пьезомодули, соответственно поперечного и продольного пьезоэффекта, характеризующие величину деформации образца при воздействии единичного электрического поля, м/В;

ℓ , h , d , D – геометрические параметры пьезотрубки и пьезостолбца, м;

n – количество дисков в пьезостолбце;

U – напряжение питания пьезодвигателя, В;

S_{11} , S_{33} – величины, обратные модулю упругости пьезоматериала трубки и столбца;

F_c – внешняя силовая нагрузка, Н.

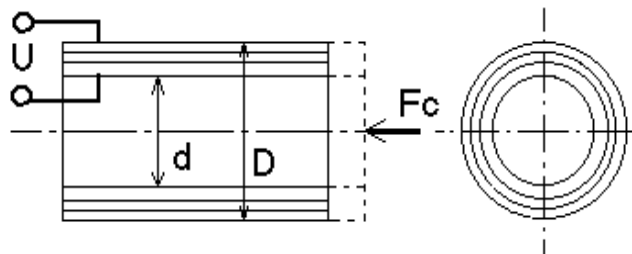


Рис. 4.4. Пьезодвигатель-трубка

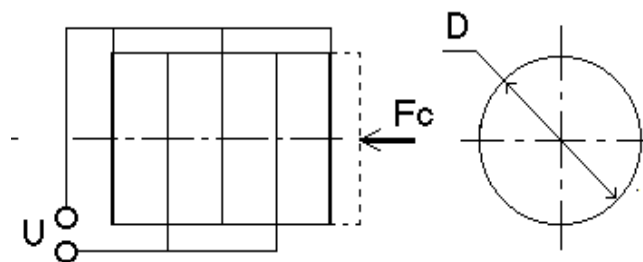


Рис. 4.5. Пьезодвигатель-столбец

Величина продольного пьезомодуля d_{33} для большинства пьезоматериалов, более чем в два раза, превышает поперечный пьезомодуль d_{31} .

Максимальное усилие $F_{c \max}$ для пьезотрубки:

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{31}(d + D)U}{2S_{11}} ; \quad (4.15)$$

для пьезостолбца:

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{33}D^2U}{4S_{33}h} . \quad (4.16)$$

На рис. 4.6 представлены зависимости изменения размера пьезосканера от приложенного напряжения.

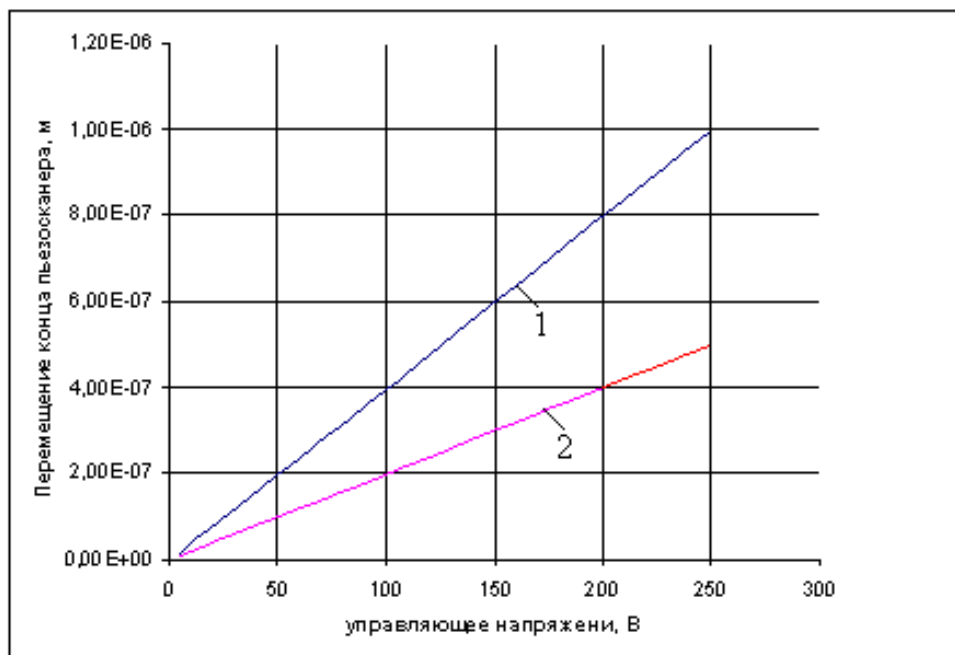


Рис. 4.6. Зависимости изменения размера пьезосканера от приложенного напряжения: 1 – для пьезодвигателя-трубки, 2 – для пьезодвигателя-столбца

4.3. Многокритериальный выбор пьезосканера

Альтернативы и критерии выбора пьезосканера представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Альтернативы и критерии выбора пьезосканера

	Пневмомеханический привод	Электромеханический привод	Пьезоэлектрический привод	Магнитострикционный привод
Быстродействие, с	0,05	0,1	0,05	0,05
Погрешность позиционирования, мкм	10	5	0,5	1
Ход исполнительного устройства, мм	100	50	3	2
Масса устройства, кг	7	9	0,3	0,5
Стоимость, у.е.	4	4	7	8
Ресурс, лет	–	–	–	–
Габариты, мм	–	–	–	–

Формирование альтернатив:

a_1 – пневмомеханический привод;

a_2 – электромеханический привод;

a_3 – пьезоэлектрический привод;

a_4 – магнитоотрицательный привод.

Формирование критериев:

K_1 – быстродействие, с;

K_2 – погрешность позиционирования, мкм;

K_3 – ход исполнительного устройства, мм;

K_4 – масса устройства, кг;

K_5 – стоимость, у.е.;

K_6 – ресурс, лет;

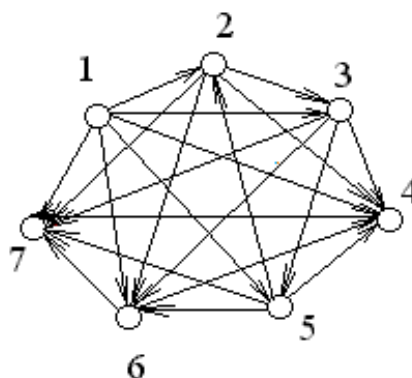
K_7 – габариты, мм.

4.3.1. Определение представительного вектора критерия

Для определения представительного вектора критерия найдём коэффициенты весомости критериев [15]. Ранжируем критерии попарным сравнением. Для это, воспользуемся результатом попарного сравнения критериев четырьмя экспертами и определим, методом Дельфи, компетентность экспертов.

Ранжирование критериев

N_1	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
k_1	0	1	1	1	1	1	1
k_2	0	0	1	1	0	1	1
k_3	0	0	0	1	1	1	1
k_4	0	0	0	0	0	0	1
k_5	0	1	0	1	0	1	1
k_6	0	0	0	1	0	0	1
k_7	0	0	0	0	0	0	0
a_μ	6	4	4	1	4	2	0
Место	1	2	2	4	2	3	5
r_i	7	6	6	4	6	5	3



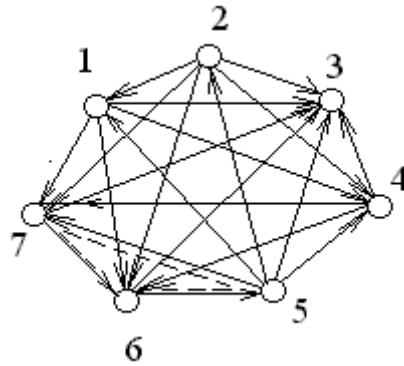
$$a_j = 1 - \left(\frac{24d}{m^3 - m} \right), \text{ если } m\text{-нечётное (} m \text{ – число объектов), } d \text{ – число циклов}$$

длиной 3.

$$a_\mu = \sum a_{\nu\mu};$$

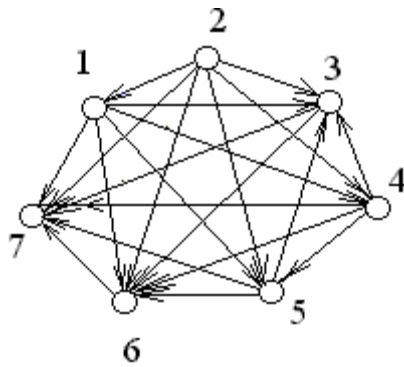
$$a_1 = 1 - \left(\frac{24 \cdot 0}{343 - 7} \right) = 1,0.$$

N_2	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
k_1	0	0	1	1	0	1	1
k_2	1	0	1	1	0	1	1
k_3	0	0	0	0	0	0	0
k_4	0	0	1	0	0	1	1
k_5	1	1	1	1	0	0	1
k_6	0	0	1	0	1	0	0
k_7	0	0	1	0	0	1	0
a_μ	4	5	0	3	5	2	2
Место2	1	5	3	1	4	4	
r_i	6	7	3	5	7	4	4



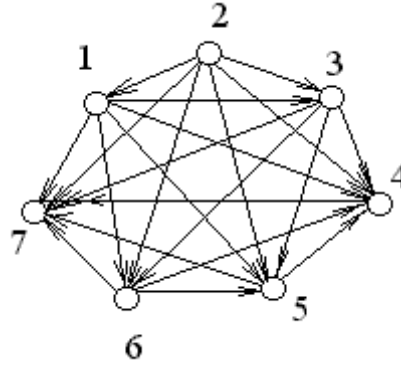
$$a_2 = 1 - \left(\frac{24 \cdot 1}{343 - 7} \right) = 0,93.$$

N_3	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
k_1	0	0	1	1	1	1	1
k_2	1	0	1	1	1	1	1
k_3	0	0	0	0	0	1	1
k_4	0	0	1	0	1	1	1
k_5	0	0	1	0	0	1	1
k_6	0	0	0	0	0	0	1
k_7	0	0	0	0	0	0	0
a_μ	5	6	2	4	3	1	0
Место2	1	5	3	4	6	7	
r_i	6	7	3	5	4	2	1



$$a_3 = 3 - \left(\frac{24 \cdot 0}{343 - 7} \right) = 1.$$

N_4	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
k_1	0	0	1	1	1	1	1
k_2	1	0	1	1	1	1	1
k_3	0	0	0	1	1	1	1
k_4	0	0	0	0	0	0	1
k_5	0	0	0	1	0	0	1
k_6	0	0	0	1	1	0	1
k_7	0	0	0	0	0	0	0
a_μ	5	6	4	1	2	3	0
Место	2	1	3	6	5	4	7
r_i	6	7	5	2	3	4	1



$$a_4 = 3 - \left(\frac{24 \cdot 0}{343 - 7} \right) = 1,0 .$$

4.3.2. Оценка компетентности экспертов (согласно методу Дельфи) по важным критериям

Среднее значение $\bar{z} = \frac{1}{N} \sum z_i$,

где N – число экспертов.

Дисперсия оценок экспертов $D = \frac{\sum (\bar{z} - z_i)^2}{N - 1}$.

Среднее квадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D}$.

Коэффициент вариации $\xi = \frac{\sigma}{\bar{z}}$.

Коэффициент компетентности $\eta = \frac{z_i - \bar{z}}{\bar{z}}$.

По первому критерию (быстродействие):

$$\bar{Z} = \frac{7 + 6 + 6 + 6}{4} = 6,25;$$

$$D = \frac{(0,75)^2 + (-0,25)^2 + (-0,25)^2 + (-0,25)^2}{4 - 1} = 0,25;$$

$$\sigma = \sqrt{0,25} = 0,5;$$

$$\xi = \frac{0,5}{6,25} = 0,08;$$

$$\eta_1 = \frac{7 - 6,25}{6,25} = 0,12;$$

$$\eta_2 = \frac{6 - 6,25}{6,25} = -0,04;$$

$$\eta_3 = \frac{6 - 6,25}{6,25} = -0,04;$$

$$\eta_4 = \frac{6 - 6,25}{6,25} = -0,04.$$

По второму критерию (погрешность позиционирования):

$$\bar{Z} = \frac{6 + 7 + 7 + 7}{4} = 6,75;$$

$$D = \frac{(-0,75)^2 + (0,25)^2 + (0,25)^2 + (0,25)^2}{4 - 1} = 0,25;$$

$$\sigma = \sqrt{0,25} = 0,5;$$

$$\xi = \frac{0,5}{6,75} = 0,074;$$

$$\eta_1 = \frac{6 - 6,75}{6,75} = -0,11;$$

$$\eta_2 = \frac{7 - 6,75}{6,75} = 0,037;$$

$$\eta_3 = \frac{7 - 6,75}{6,75} = 0,037;$$

$$\eta_4 = \frac{7 - 6,75}{6,75} = 0,037.$$

По пятому критерию (стоимость):

$$Z = \frac{6 + 7 + 4 + 3}{4} = 5,0;$$

$$D = \frac{(1)^2 + (2)^2 + (-1)^2 + (-2)^2}{4 - 1} = 3,33;$$

$$\sigma = \sqrt{3,33} = 1,83;$$

$$\xi = \frac{1,83}{5} = 0,37;$$

$$\eta_1 = \frac{6 - 5}{5} = 0,2;$$

$$\eta_2 = \frac{7 - 5}{5} = 0,4;$$

$$\eta_3 = \frac{4 - 5}{5} = -0,2;$$

$$\eta_4 = \frac{3 - 5}{5} = -0,4.$$

Из коэффициента вариации ξ видно, что мнение экспертов по первому (быстродействие) и второму (погрешность позиционирования) критериям почти совпадают, в отличие от третьего критерия. А по

коэффициенту компетентности η можно выделить наиболее компетентного эксперта, которым является третий эксперт.

4.3.3. Определение весовых коэффициентов

Определение весовых коэффициентов производится по формуле

$$\alpha_i = \frac{\sum r_i^k}{\sum \sum r_i^k}.$$

$$\alpha_1 = (7+6+6+6) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,19;$$

$$\alpha_2 = (6+7+7+7) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,21;$$

$$\alpha_3 = (6+3+3+5) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,13;$$

$$\alpha_4 = (4+5+5+2) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,12;$$

$$\alpha_5 = (6+7+4+3) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,16;$$

$$\alpha_6 = (5+4+2+4) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,12;$$

$$\alpha_7 = (3+4+1+1) / ((7+6+6+6) + (6+7+7+7) + (6+3+3+5) + (4+5+5+2) + (6+7+4+3) + (5+4+2+4) + (3+4+1+1)) = 0,07 .$$

Установим $a = 0,80$; $1 > a > 0,80$,

тогда представительный вектор критерий будет следующий:

$$K = (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5),$$

так как $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 0,19 + 0,21 + 0,13 + 0,12 + 0,16 = 0,81 > 0,80$.

Рассмотрим нечёткие множества:

F_1 – желаемое быстродействие;

F_2 – предпочтительная погрешность позиционирования;

F_3 – предпочтительный ход исполнительного устройства;

F_4 – желаемая масса устройства;

F_5 – желаемая стоимость.

4.3.4. Построение функции принадлежности

Смоделированные функции принадлежности представлены на рис. 4.7÷4.11.

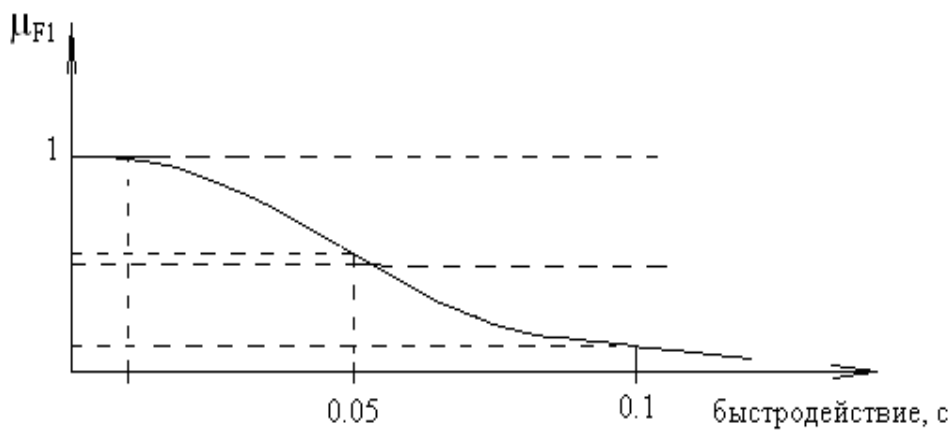


Рис. 4.7. Быстродействие привода

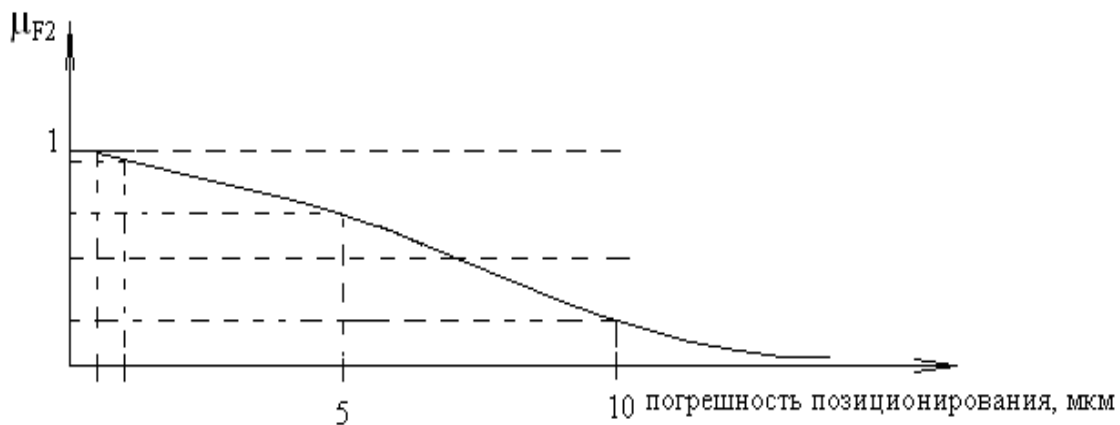


Рис. 4.8. Погрешность позиционирования привода

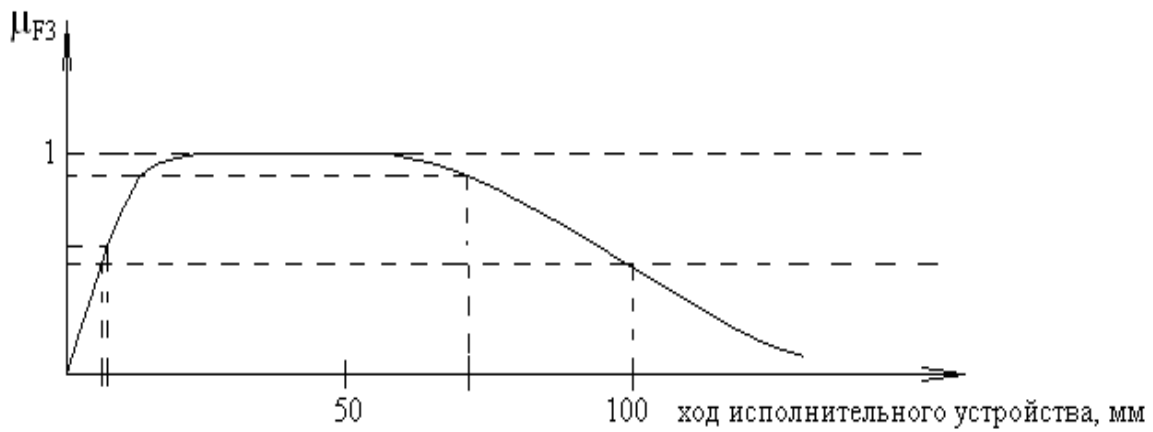


Рис. 4.9. Ход исполнительного устройства

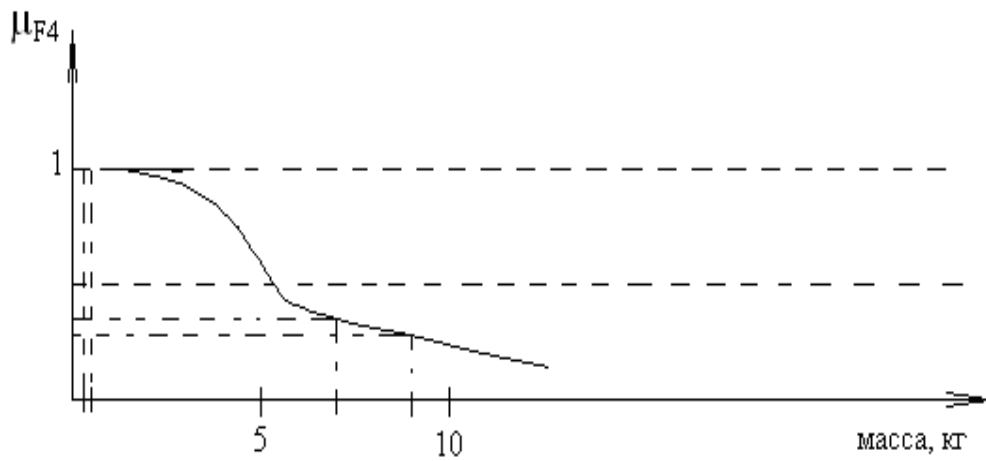


Рис. 4.10. Масса устройства

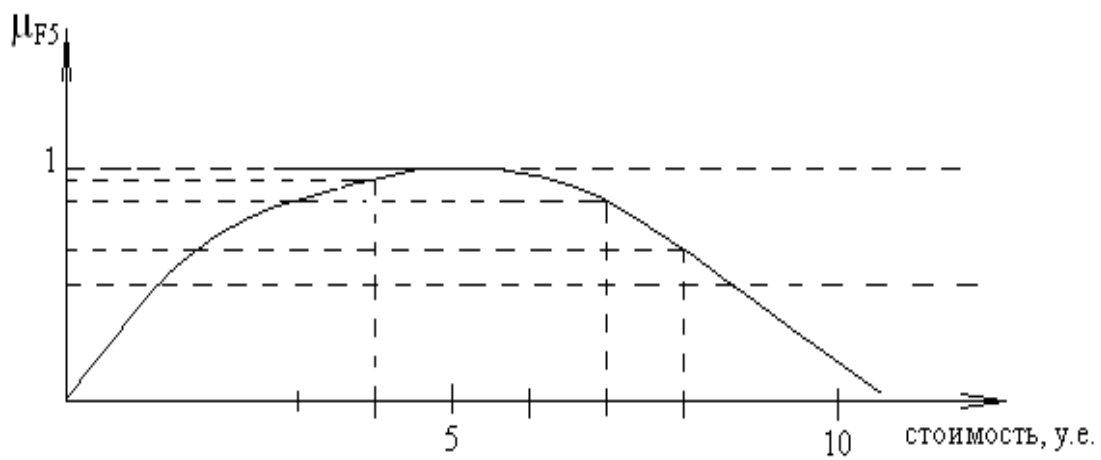


Рис. 4.11. Стоимость устройства

Значения представительного вектора критерия у альтернатив:

$$a_1 = (0,05; 10; 100; 7; 4);$$

$$a_2 = (0,1; 5; 50; 9; 4);$$

$$a_3 = (0,05; 0,5; 3; 0,3; 7);$$

$$a_4 = (0,05; 1; 2; 0,5; 8).$$

Описание нечётких множеств:

$$\mu_{F_1} = \frac{0,55}{0,05} + \frac{0,15}{0,1} + \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,05};$$

$$\mu_{F_2} = \frac{0,2}{10} + \frac{0,7}{5} + \frac{1}{0,5} + \frac{0,9}{1};$$

$$\mu_{F_3} = \frac{0,5}{100} + \frac{0,9}{50} + \frac{0,6}{3} + \frac{0,5}{2};$$

$$\mu_{F_4} = \frac{0,35}{7} + \frac{0,3}{9} + \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,5};$$

$$\mu_{F_5} = \frac{0,9}{4} + \frac{0,9}{4} + \frac{0,8}{7} + \frac{0,6}{8}.$$

4.3.5. Выбор наилучшей альтернативы

Воспользуемся принципом максимина для выбора оптимального варианта:

$$B = F_1^{\beta_1} \cap F_2^{\beta_2} \cap \dots \cap F_n^{\beta_n} \leftrightarrow \min \frac{\mu_{F_i}(a_j)}{a_j};$$

$$\beta_i = \alpha_i \cdot m,$$

где m – число критериев, по которым осуществляется выбор,

$$m = 5.$$

$$\beta_1 = 0,19 \cdot 5 = 0,95;$$

$$\beta_2 = 0,21 \cdot 5 = 1,05;$$

$$\beta_3 = 0,13 \cdot 5 = 0,65;$$

$$\beta_4 = 0,12 \cdot 5 = 0,6;$$

$$\beta_5 = 0,16 \cdot 5 = 0,8.$$

$$a_1 = \min (0,57; \underline{0,18}; 0,64; 0,53; 0,92) ;$$

$$a_2 = \min (\underline{0,16}; 0,69; 0,93; 0,49; 0,92) ;$$

$$a_3 = \min (1; 1; \underline{0,71}; 1; 0,83) ;$$

$$a_4 = \min (1; 0,9; \underline{0,64}; 1; 0,66) .$$

$$\max\{0,18; 0,16; \underline{0,71}; 0,64\}.$$

Таким образом, оптимальным вариантом является альтернатива номер 3 – пьезоэлектрический привод.

4.4. Выбор оптимального профиля пьезосканера

Скорость считывания и обработка информации, о топографии поверхности, сканирующим туннельным микроскопом напрямую зависит от быстродействия всех его систем и элементов. На сегодняшний день система прецизионного позиционирования работает с частотой 10÷15 кГц. Электронная система управления на базе современного процессора обрабатывает информацию со скоростью до 300 кГц, при этом пьезосканеры могут влиять на быстродействие всего СТМ в целом. Дело в том, что резонансная частота колебаний используемых пьезосканеров, в зависимости от их размеров, может быть ниже, чем у остальных компонентов СТМ, «тормозя» таким образом всю систему. Для того чтобы определить первую резонансную частоту используемых пьезосканеров, был произведен нижеследующий расчёт.

Оценка частоты поперечных колебаний пьезосканера сканирующего туннельного микроскопа проводилась в приближении балки с переменным

сечением.

Уравнение колебания балки с переменным профилем поперечного сечения имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + \rho S \frac{d^2 y}{dt^2} = 0, \quad (4.17)$$

где E – модуль Юнга;

$m = \rho S$ – масса единицы длины балки;

I_z – момент инерции сечения относительно нейтральной линии (оси Z),

где напряжения равны нулю [75].

Ищем решение в виде:

$$y = X(x) \cos \omega t, \quad (4.18)$$

где $X(x)$ – определяет форму колебаний.

Подстановка (4.4.2) в уравнение колебаний (4.4.1) дает:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} \right) - \rho \omega^2 S X = 0. \quad (4.19)$$

Далее рассмотрим типичные профили балок, которые схожи с профилем пьезосканеров в СТМ.

4.4.1. Цилиндрический стержень

Для цилиндрического профиля стержня существует точное решение.

Первая собственная частота колебаний стержня с одним свободным и другим закрепленным концом имеет вид:

$$\nu_1 = \frac{1,758}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4.20)$$

где r – радиус основания, l – длина стержня.

4.4.2. Призматический стержень

Рассмотрим поперечные колебания призматического стержня (рис.4.12,а) в плоскости XU , которая является плоскостью симметрии для его поперечных сечений. Через U обозначим поперечное перемещение

Алого элемента стержня, расположенного на расстоянии X от левого конца последнего. Жёсткость при изгибе $E \cdot I$ стержня следует учитывать. На рис. 4.12. б показан малый элемент стержня длиной dx , а также внутренние и внешние силы, действующие на него.

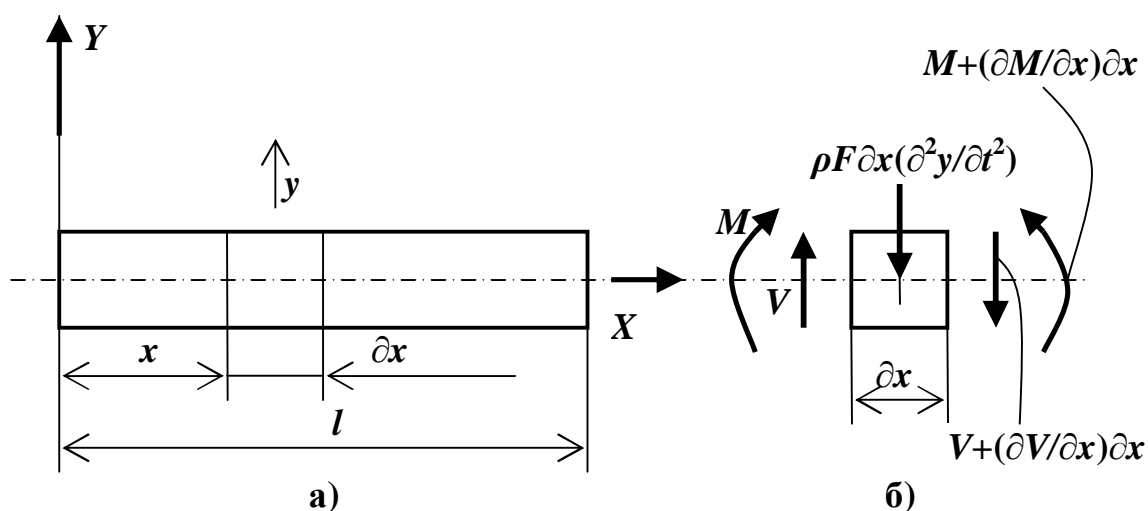


Рис. 4.12. Призматический стержень

На рисунке знаки поперечной силы V и изгибающего момента M взяты в соответствии с правилом, принятым в теории изгиба стержней. При поперечных колебаниях стержней условие динамического равновесия сил, действующих в направлении оси U , имеет вид:

$$V - V - \frac{\partial V}{\partial x} dx - \rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 , \quad (4.21)$$

а условие равенства моментов даёт:

$$-Vdx + \frac{\partial M}{\partial x} dx \approx 0 . \quad (4.22)$$

Выражая V из уравнения (4.22) и подставляя результат в уравнение (4.21), получим

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} . \quad (4.23)$$

Из элементарной теории изгиба стержней имеем соотношение

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} . \quad (4.24)$$

Подставляя это выражение в уравнение (4.23), находим

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} , \quad (4.25)$$

что является общим уравнением поперечных свободных колебаний стержней.

В частном случае призматического стержня с жесткостью EI при изгибе, не зависящей от x , имеем

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} . \quad (4.26)$$

Это уравнение может быть представлено и в такой форме:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} , \quad (4.27)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} .$$

Когда стержень колеблется в поперечном направлении, по одной из форм собственных колебаний, его прогибы в произвольной точке будут

изменяться во времени по гармоническому закону:

$$y = X(A\cos\omega t + B\sin\omega t) . \quad (4.28)$$

Для удобства записи, здесь опущен индекс i , обозначающий i -ю форму колебаний. Подставляя (4.28) в уравнение (4.26), получим

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - \frac{\rho^2}{a^2} X = 0 . \quad (4.29)$$

Учитывая необходимость решать обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка, введём обозначение

$$\frac{\omega^2}{a^2} = k^4 ,$$

и перепишем уравнение (4.29) в виде

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k^4 X = 0 . \quad (4.30)$$

В уравнении (4.4.14) примем $X = e^{nx}$, что даст

$$e^{nk} (n^4 - k^4) = 0 . \quad (4.31)$$

Откуда

$$n_1 = k; \quad n_2 = -k; \quad n_3 = ik; \quad n_4 = -ik.$$

Общее решение уравнения (4.31):

$$X = Ce^{kx} + De^{-kx} + Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} , \quad (4.32)$$

можно записать в следующей эквивалентной форме:

$$X = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx . \quad (4.33)$$

Полученное выражение является нормальной функцией задачи о поперечных колебаниях призматического стержня.

Постоянные C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , входящие в выражение (4.33), являются произвольными и должны определяться в каждом частном случае в соответствии с условиями, заданными на концах стержня. Например, для свободного конца прогиб и изгибающий момент равны нулю, что дает

$$X = 0; X'' = 0.$$

На защемлённом конце прогиб и угол наклона равны нулю, следовательно, в этом случае имеем

$$X = 0; X' = 0.$$

На незакрепленном конце изгибающий момент и поперечная сила обращаются в ноль. В результате получаем

$$X'' = 0; X''' = 0.$$

Поскольку у стержня есть два конца, всегда имеется возможность записать такие концевые условия, используя которые можно найти величины C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , а найдя их, определить частоты и формы свободных колебаний.

Концевые условия:

при $x = 0; X = 0; X'' = 0;$

при $x = l; X = 0; X'' = 0.$

Дважды продифференцируем (4.33) и с учётом концевых условий получим:

$$C_2 + C_4 = 0; C_1 \sin kl + C_3 \operatorname{sh} kl = 0;$$

$$-C_2 + C_4 = 0; -C_1 \sin kl + C_3 \operatorname{sh} kl = 0,$$

откуда $C_2 = C_3 = C_4 = 0,$

и $C_1 \sin kl = 0,$

для нетривиального решения, то есть $C_1 \neq 0$, имеем

$$\sin kl = 0.$$

Для рассматриваемого случая выражение $\sin kl = 0$ является уравнением частот, так как

$$k_i l = i\pi, \text{ или } k_i = \frac{i\pi}{l}, \quad (4.34)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$

$$\text{Из } \frac{\omega^2}{a^2} = k^4 \text{ получаем } k_i^4 = \frac{\rho F \omega_i^2}{EI}. \quad (4.35)$$

Поэтому из (4.34) и (4.35) собственные круговые частоты рассматриваемой балки будут иметь вид

$$\omega_i = k_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} = \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}, \quad (4.36)$$

в герцах:

$$\nu = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{i^2 \pi^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}. \quad (4.37)$$

Таким образом

$$\nu_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{3.512}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}.$$

Учитывая, что

$$I = \frac{hb(b^2 + h^2)}{12} \text{ и } F = h \cdot b,$$

где b – длина прямоугольного сечения;

h – ширина прямоугольного сечения,

получим:

$$\nu_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1.014 \sqrt{b^2 + h^2}}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.38)$$

4.4.3. Конус

Момент инерции конуса

$$I_z = \frac{\pi D^2}{64} = \frac{\pi(2y)^4}{64} = \frac{\pi y^4}{4},$$

где $y = \frac{r}{l} X$ такое, что конус – поверхность вращения этой линии вокруг оси X .

Таким образом, момент инерции конуса

$$I_z = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{l} \right)^4 X^4. \quad (4.39)$$

Площадь поперечного сечения конуса

$$S(X) = \pi y^2 = \pi \left(\frac{r}{l} \right)^2 X^2. \quad (4.40)$$

Подставляя (4.39) и (4.40) в уравнение (4.17), получим:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{l} \right)^4 x^4 X'' \right) - \rho \omega \pi \left(\frac{r}{l} \right)^2 x^2 X = 0. \quad (4.41)$$

Делим уравнение на $\frac{E}{4} \left(\frac{r}{l} \right)^2$ и обозначив

$$\lambda^2 = \frac{4\rho\omega^2}{E} \left(\frac{l}{r} \right)^2,$$

получим

$$(x^4 X'')'' - \lambda^2 X x^2 = 0.$$

Продифференцировав и сократив уравнение на x^2 , получаем

$$x^2 X^{IV} + 8x X^{III} + 12X^{II} - \lambda^2 X = 0. \quad (4.42)$$

Уравнение (4.42) имеет точное решение, выраженное через функции Бесселя.

Таким образом, первая частота колебаний конуса

$$v_1 = \frac{4.359}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (4.43)$$

4.4.4. Поверхности сложной формы. Поверхность вращения параболы

Резонансную частоту балки, с профилем, представляющим собой поверхность вращения параболы, находим из выражения

$$v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{42}}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx \frac{6.5}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (4.44)$$

4.4.5. Определение первой резонансной частоты пьезосканера

По приведённым выше формулам произведём расчёт резонансных частот пьезосканеров различного поперечного сечения с целью выявления оптимального сечения пьезосканера.

В качестве материала для сравнения результатов резонансных частот пьезосканеров различных поперечных сечений возьмём пьезокерамику состава ЦТС (ЦТС –19).

ЦТС –19: $E = 0,55 - 0,85 \cdot 10^{11}$ Н/м² (возьмём $0,7 \cdot 10^{11}$ Н/м²); $\rho = 1,771$ кг/ м³.

Результаты расчёта резонансных частот пьезосканеров с радиусами $r = 8; 10; 15$ мм, сторонами (для призматического стержня) $h \times b =$

12×17 мм; 15×21 мм; 22×32 мм и различными длинами, для цилиндрического, конусоидального, призматического стержня и поверхности вращения параболы представлены на рис. 4.13 ÷ 4.16.

Из зависимостей и графиков видно, что резонансная частота пьезосканера растёт с уменьшением длины и увеличением параметров сечения.

Так же из графиков видно, что наименьшими резонансными частотами обладают пьезосканеры в форме цилиндрического стержня.

первая резонансная частота цилиндрического стержня

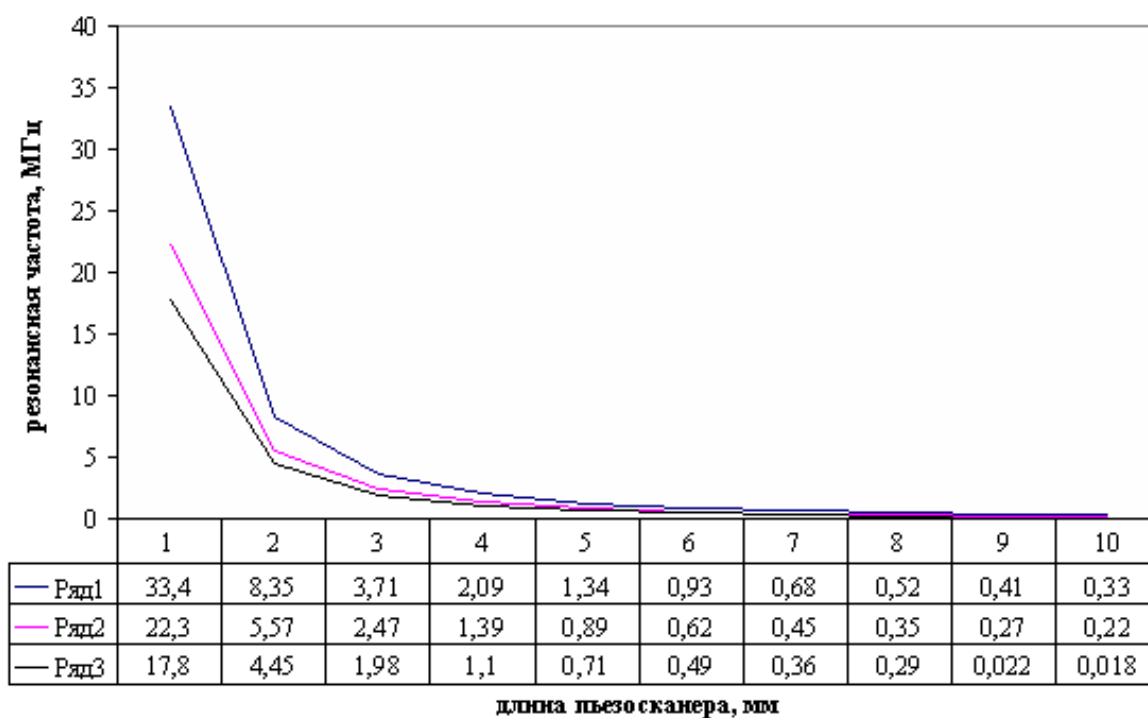


Рис. 4.13. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде цилиндрического стержня

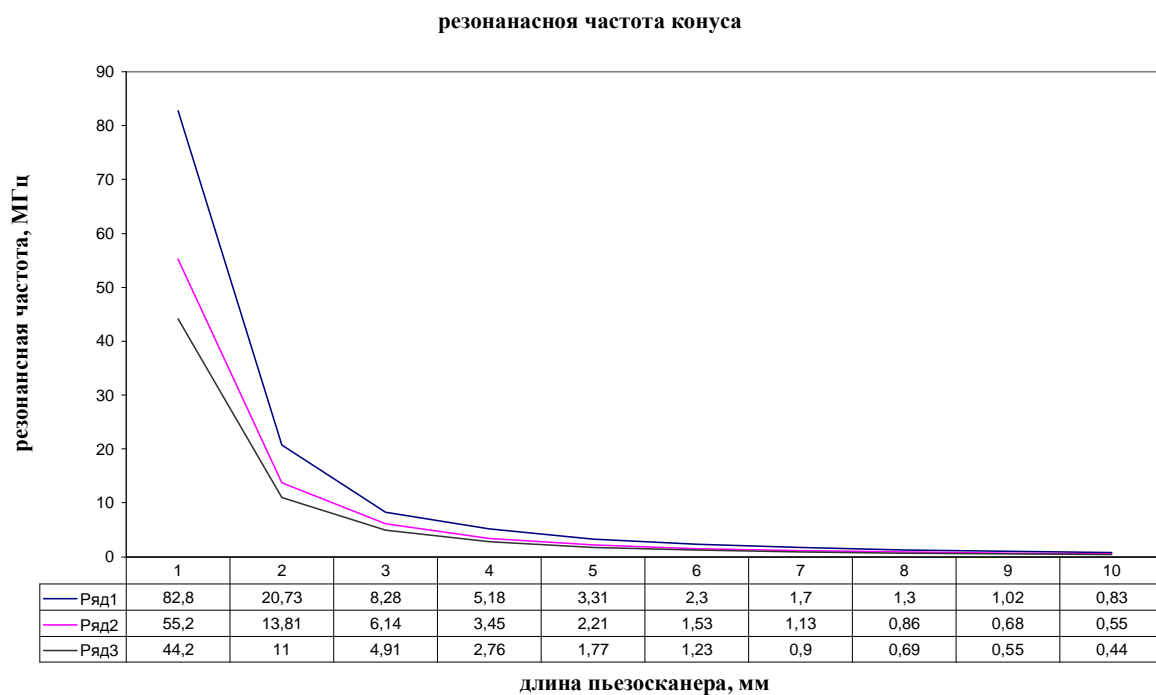


Рис. 4.14. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде конуса

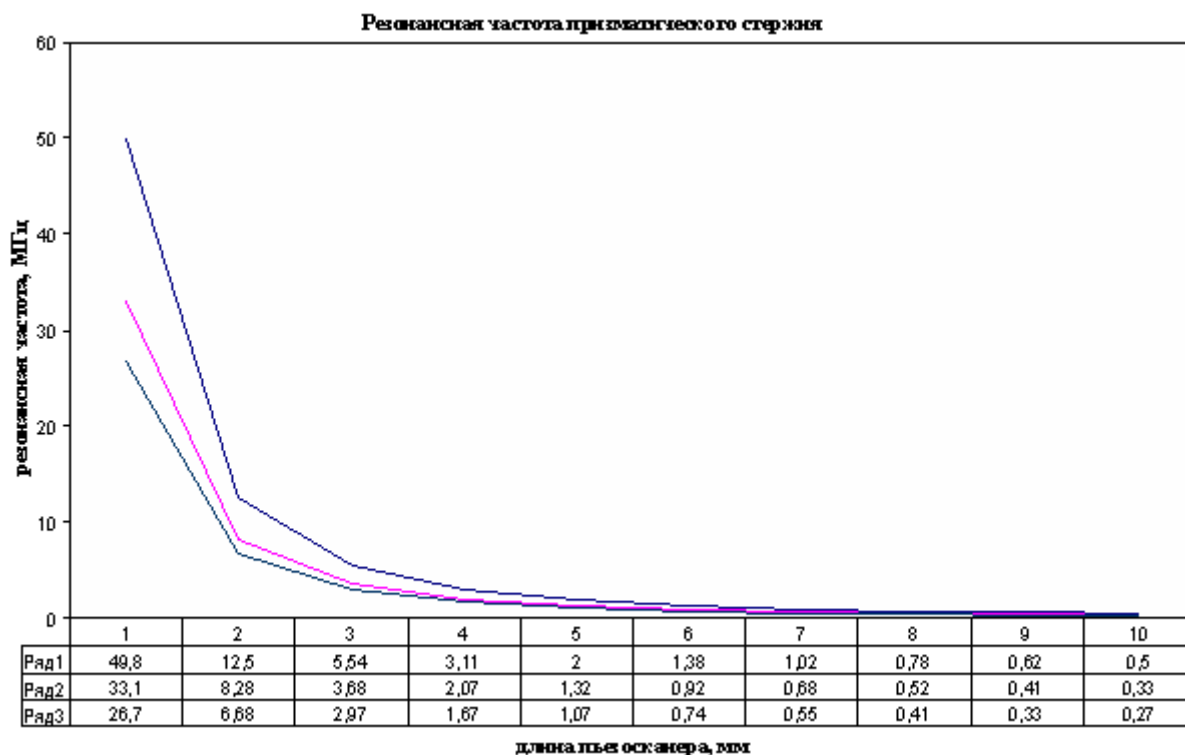


Рис. 4.15. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде призматического стержня

резонансная частота поверхности вращения

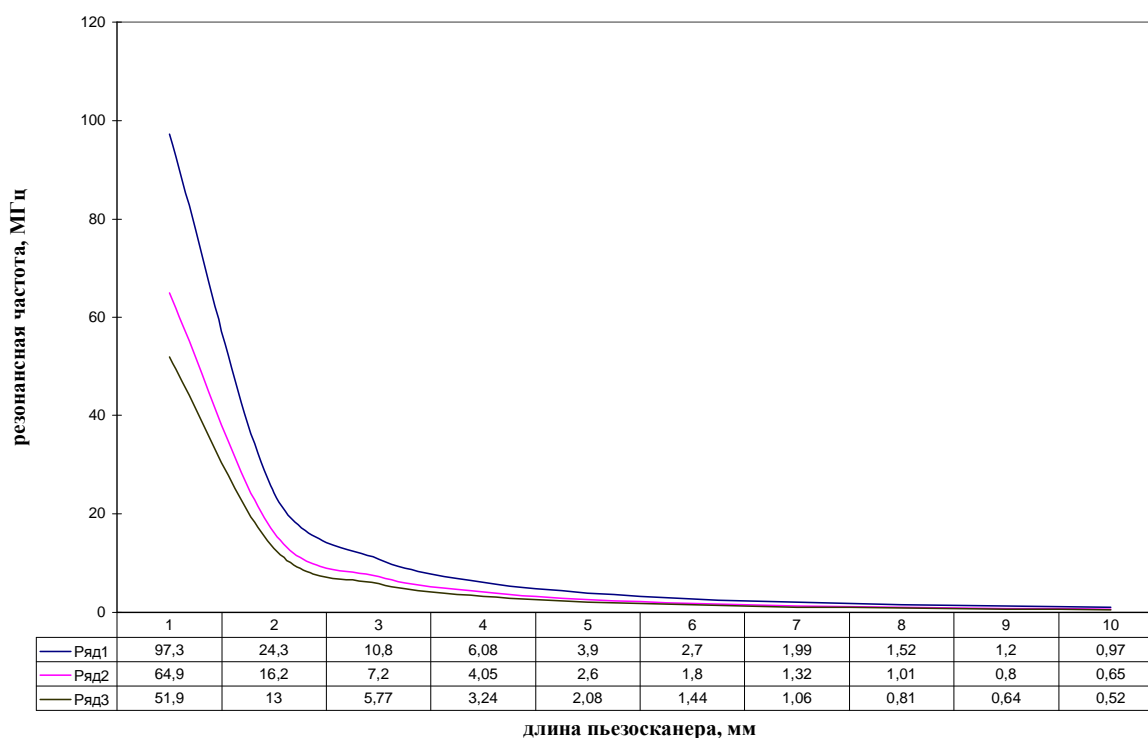


Рис. 4.16. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде поверхности вращения

4.5. Пьезосканер для нанотехнологии

Пьезосканер для нанотехнологии представлен на рис. 4.17. Устройство содержит блок питания 1, связанный с тремя пьезомодулями 2, 3, 4, последовательно соединенными между собой таким образом, что оси пьезомодулей расположены по координатным осям X, Y, Z. Основной зонд 5 жёстко связан с пьезомодулем 4. Пьезомодуль 6 связан с блоком питания 1 и закреплён на П-образном элементе. Причём на пьезомодуле 6 жёстко закреплён дополнительный зонд 7. Зонды 5 и 7 установлены соосно и направлены навстречу друг другу, обеспечивая возможность проведения двухстороннего одновременного зондирования подложки 8.

Пьезосканер для нанотехнологии работает следующим образом. При подаче напряжения от блока питания 1 на пьезомодуль 2 происходит его независимое перемещение вдоль оси Y . При подаче напряжения на пьезомодуль 3 происходит его независимое перемещение вдоль оси X . При подаче напряжения на пьезомодули 4 и 6 происходит их независимое перемещение вдоль оси Z , таким образом, что зонды 5 и 7, закреплённые на пьезомодулях 4 и 6, перемещаются навстречу друг другу и к поверхности подложки 8.

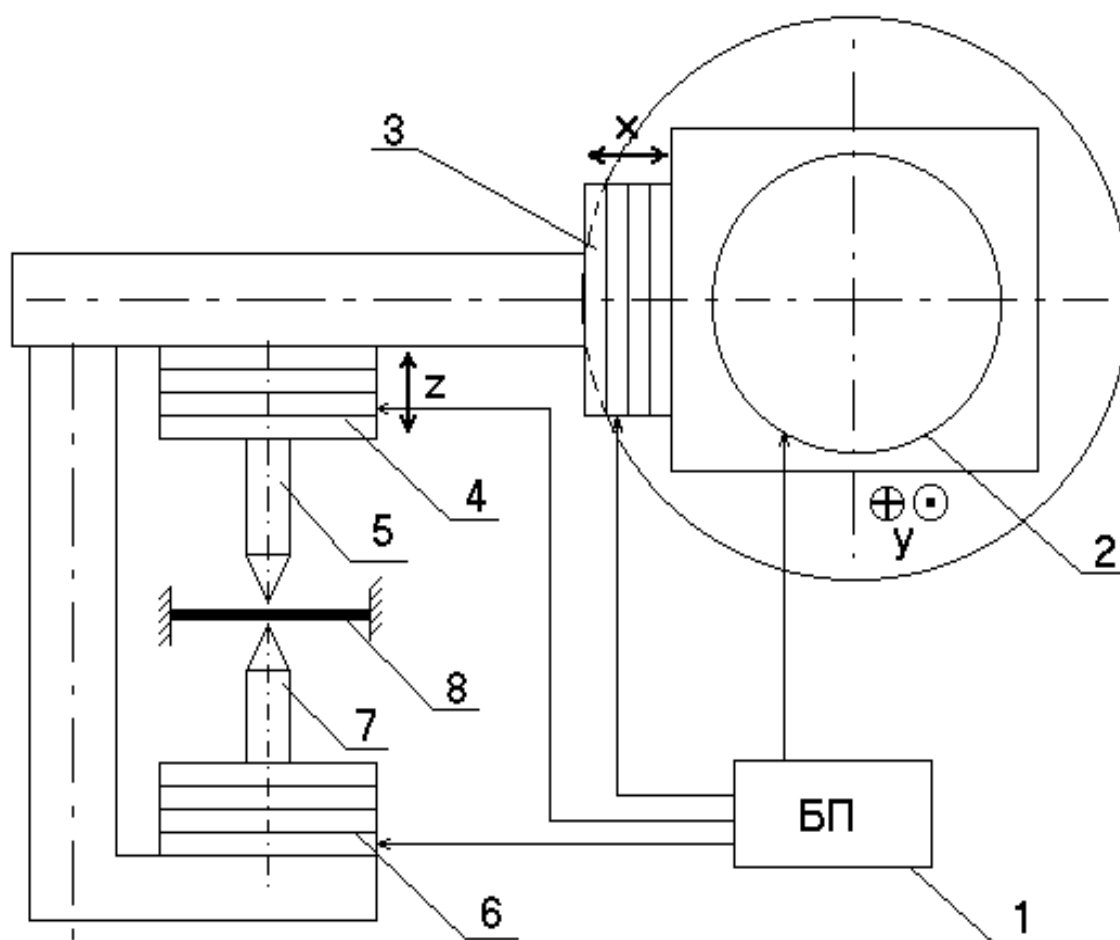


Рис. 4.17. Пьезосканер для нанотехнологии

4.5.1. Выбор материала пьезопреобразователей

Для данного нанотехнологического пьезосканера возьмем материал ЦТС-19. Выбор его обусловлен тем, что этот материал наиболее распространен в отечественных конструкциях, особенно в микроскопах типа СОЛВЕР.

Ниже в табл. 4.3 приведены основные характеристики данного материала.

Таблица 4.3

Основные характеристики материала ЦТС – 19.

Пьезомодули $d_{ik} \cdot 10^{12}, \frac{\text{К}}{\text{Н}}$, не менее	d_{31}	100
	d_{33}	200
Температура Кюри $T_k, ^\circ\text{C}$		290
Электрическая прочность $E, \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$, не менее		3,0
Диэлектрическая проницаемость $\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0}$		1500±350
Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях		0,035
Удельное объёмное электрическое сопротивление при $100 \pm 5 ^\circ\text{C}$, не менее		$1 \cdot 10^{10}$
Коэффициент электромеханической связи $k_{эс}$		0.43
Температурный коэффициент частоты $f_r \cdot 10^6, \frac{1}{^\circ\text{C}}$		150
Модуль Юнга $E_{ю} \cdot 10^{-11}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$		0,55÷0,85
Механическая добротность Q_M , не менее		50
Скорость звука $v_{зв} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{М}}{\text{с}}$		3÷3,6
Предел механической прочности при статическом сжатии, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, не менее		3000
Водопоглощение, %, не более		0,2

4.5.2. Расчет основных характеристик и параметров пьезосканера

Пьезопривод можно представить как «черный ящик» с входом и выходом рис. 4.18.

К входным параметрам отнесем электрическое напряжение на обкладках пьезосканера.

Внутренние свойства – это линейная зависимость. Здесь же зададимся геометрическими параметрами пьезопреобразователя и по выбранному материалу определим константы зависимости изменения размера пьезопреобразователя.

Внешними возмущениями являются рабочая температура и среда.

К выходным параметрам отнесем перемещение и погрешность перемещения конца пьезопреобразователя.

В качестве пьезопреобразователя возьмем пьезосталбец, составленный из нескольких пьезошайб.

Пьезосканер для нанотехнологии содержит четыре пьезомодуля, причем пьезомодули 4 и 6 (см. рис. 4.17) одинаковые и расчёты можно провести только для одного модуля.



Рис. 4.18. Обобщённая модель пьезопривода:

R_i – входные параметры пьезопривода;

F_j – внутренние свойства;

U_k – внешние возмущения;

X_i – выходные параметры пьезопривода

Пьезомодуль 2 выполним в виде пьезостолбца, составленного из 20 шайб диаметром 20 мм. Возьмём длину пьезомодуля 40 мм.

Пьезомодуль 3 выполним в виде пьезостолбца, составленного из 20 шайб диаметром 10 мм. Длина пьезомодуля – 20 мм.

А пьезомодули 4 и 6 выполним в виде пьезомодулей, составленных из 10 шайб диаметром 10 мм. Возьмём длину пьезомодулей 20 мм.

Расчёт характеристик

Рассчитаем характеристики пьезопреобразователей:

$$E_i = g_{in} \sigma_n = -h_{in} \varepsilon_n ;$$

$$\varepsilon_n = d_{kn} E_k ;$$

$$\sigma_n = E_{ю} \varepsilon_n ;$$

$$C_n = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 F_x}{l_n},$$

где E_i и E_k – напряженность поля в кристалле в направлении осей i и k в В/м;

σ_n – механическое напряжение в кристалле вдоль оси n в Н/м²;

ε_n – относительная деформация кристалла вдоль оси n ;

$E_{ю}$ – модуль Юнга в Н/м²;

g_{in} , d_{kn} , h_{in} – пьезокоэффициенты, приведённые в справочной таблице.

Пьезокоэффициенты и основные характеристики из справочных таблиц:

$$h_{in} = 1,14 \cdot 10^9, \text{ В/м}; \quad d_{kn} = 200 \cdot 10^{-12}, \text{ Кл/Н}; \quad E_{ю} = 0,7 \cdot 10^{11}, \text{ Н/м}^2;$$

Зададимся относительной деформацией кристалла вдоль оси n :

$$\varepsilon_n = 10^{-3}$$

Так как материал пьезопреобразователей одинаковый, то расчёт характеристик будет общим.

Напряженность поля в кристалле в направлении оси i :

$$E_i = -h_{in}\varepsilon_n = -1,14 \cdot 10^9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Механическое напряжение в кристалле вдоль оси n :

$$\sigma_n = E_{ю}\varepsilon_n = 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-3} = 0,7 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Расчёт максимального усилия и перемещения конца пьезостолбца

По формулам для пьезопреобразователя столбца (4.14) и (4.16), схематично показанного на рис. 4.19, произведем расчёт максимального усилия и перемещения конца пьезостолбца.

Максимальное усилие для пьезостолба:

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{33} D^2 U}{4 S_{33} h}.$$

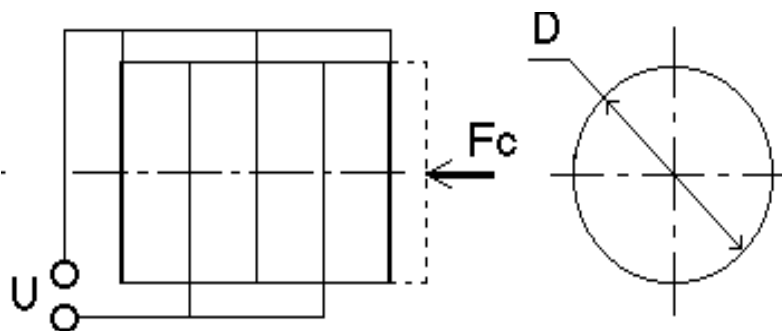


Рис. 4.19. Схема пьезостолбца

Перемещение конца пьезодвигателя столбца

$$\xi = nd_{33}U - \frac{4nS_{33}hF_c}{\pi D^2},$$

где d_{33} – модуль продольного пьезоэффекта, характеризующий величину деформации образца при воздействии единичного электрического поля, м/В;

h, D – геометрические параметры столбца, м;

n – количество дисков в пьезостолбце;

U – напряжение питания пьезодвигателя, В;

S_{33} – величина, обратная модулю упругости пьезоматериала столбца;

F_c – внешняя силовая нагрузка, Н.

Возьмём наибольшее напряжение, подаваемое на пьезопреобразователи, $U = 300$ В. Также возьмем $F_c = \frac{1}{2} F_{c\max}$.

Для пьезомодуля 2:

$D = 20$ мм, $n = 20$, $h = 40$ мм ;

$$F_{c\max} = \frac{\pi d_{33} D^2 U}{4 S_{33} h} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300}{4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 40 \cdot 10^{-3}} = 33,7 \text{ Н};$$

$$\begin{aligned} \xi &= nd_{33}U - \frac{4nS_{33}hF_c}{\pi D^2} = \\ &= 20 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 300 - \frac{4 \cdot 20 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 16,85}{\pi (20 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \end{aligned}$$

Для пьезомодуля 3:

$D = 10$ мм, $n = 20$, $h = 20$ мм;

$$F_{c\max} = \frac{\pi d_{33} D^2 U}{4 S_{33} h} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300}{4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 16,8 \text{ Н};$$

$$\xi = nd_{33}U - \frac{4nS_{33}hF_c}{\pi D^2} =$$

$$= 20 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 300 - \frac{4 \cdot 20 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 8,4}{\pi (10 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Для пьезомодуля 4(б):

$D = 10 \text{ мм}, n = 10, h = 20 \text{ мм};$

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{33} D^2 U}{4 S_{33} h} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 300}{4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 16,8 \text{ Н};$$

$$\xi = nd_{33}U - \frac{4nS_{33}hF_c}{\pi D^2} =$$

$$= 10 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 300 - \frac{4 \cdot 10 \cdot 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 8,4}{\pi (10 \cdot 10^{-3})^2} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Расчёт резонансной частоты пьезостолбца

Так как пьезомодули имеют форму цилиндрического стержня, то резонансная частота пьезостолбца рассчитывается по формуле

$$v_1 = \frac{1,758}{2\pi} \frac{r}{h^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где r – радиус основания, h – длина стержня.

Для пьезомодуля 2:

$$v_1 = \frac{1,758 \cdot 10}{2\pi \cdot 40^2} \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{11}}{7,0}} = 174,9 \text{ кГц.}$$

Для пьезомодуля 3:

$$v_1 = \frac{1,758 \cdot 5}{2\pi \cdot 20^2} \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{11}}{7,0}} = 349,7 \text{ кГц.}$$

Для пьезомодуля 4(б):

$$v_1 = \frac{1,758 \cdot 5}{2\pi \cdot 20^2} \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{11}}{7,0}} = 349,7 \text{ кГц.}$$

Расчёт чувствительности пьезоэлементов

Чувствительность пьезоэлемента равна пределу отношения приращения напряжения к приращению силы, вызвавшей его

$$S = \frac{dU}{dP_x} = \frac{d}{dP_x} \left(\frac{d_1 P_x}{C + C_0} \right) = \frac{d_1}{C + C_0},$$

то есть увеличение ёмкости схемы C_0 (присоединенной к пьезоэлектрической схеме) приведёт к снижению чувствительности.

$$U = S \cdot P_x.$$

Для повышения чувствительности пьезоэлементы набирают из n пластин, которые механически соединяются последовательно, а электрически – параллельно.

В этом случае, при действии той же силы P_x ,

$$U = \frac{nQ}{nC + C_0} = \frac{d_1}{C + \frac{C_0}{n}} P_x = S' P_x.$$

Из формулы следует, что влияние шунтирующей ёмкости C_0 уменьшилось, а чувствительность увеличилась, так как $S' > S$.

Произведём расчёт чувствительности для каждого пьезомодуля, состоящего из одной пьезошайбы и состоящей из нескольких пьезошайб.

Полученные результаты сравним. Ёмкость, присоединённая к электрической схеме: $C_0 = 15,0 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$, $\varepsilon_r = 1500$.

Пьезомодуль 2:

$$n = 20, l_n = 2 \text{ мм}, D = 20 \text{ мм};$$

$$C = \frac{\varepsilon_r^* \varepsilon_0^* F_x}{l_u} = \frac{1500 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 10^{-3}} = 20,9 \cdot 10^{-10} \text{ Ф};$$

$$S = \frac{d_{33}}{C + C_0} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{20,9 \cdot 10^{-10} + 15,0 \cdot 10^{-10}} = 0,056;$$

$$S' = \frac{d_{33}}{C + \frac{C_0}{n}} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{20,9 \cdot 10^{-10} + \frac{15,0 \cdot 10^{-10}}{20}} = 0,09.$$

Пьезомодуль 3:

$$n = 20, l_n = 1 \text{ мм}, D = 10 \text{ мм};$$

$$C = \frac{\varepsilon_r^* \varepsilon_0^* F_x}{l_u} = \frac{1500 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{1 \cdot 10^{-3}} = 10,4 \cdot 10^{-10} \text{ Ф};$$

$$S = \frac{d_{33}}{C + C_0} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{10,4 \cdot 10^{-10} + 15,0 \cdot 10^{-10}} = 0,079;$$

$$S' = \frac{d_{33}}{C + \frac{C_0}{n}} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{10,4 \cdot 10^{-10} + \frac{15,0 \cdot 10^{-10}}{20}} = 0,18.$$

Пьезомодуль 4(6):

$$n = 10, l_n = 2 \text{ мм}, D = 10 \text{ мм};$$

$$C = \frac{\varepsilon_r^* \varepsilon_0^* F_x}{l_u} = \frac{1500 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 10^{-3}} = 5,21 \cdot 10^{-10} \text{ Ф};$$

$$S = \frac{d_{33}}{C + C_0} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{5,21 \cdot 10^{-10} + 15,0 \cdot 10^{-10}} = 0,099;$$

$$S' = \frac{d_{33}}{C + \frac{C_0}{n}} = \frac{200 \cdot 10^{-12}}{5,21 \cdot 10^{-10} + \frac{15,0 \cdot 10^{-10}}{10}} = 0,298.$$

Таким образом видно, что $S' > S$, то есть чувствительность пьезомодуля повысилась с увеличением числа пьезошайб.

ГЛАВА 5. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

5.1. Физические представления о природе сухого трения в вакууме

При нормальных условиях поверхность металла покрыта слоями окислов, адсорбированных молекул и различных инородных включений. При трении в вакууме без дополнительной смазки эти слои стираются, и происходит контакт ювенильных поверхностей, что в конечном итоге, приводит к возрастанию коэффициента трения и износа. Иными словами, вакуум ухудшает антифрикционные характеристики контактирующих материалов.

В изучении вопросов трения и износа большой вклад внесли советские ученые: Епифанов Г.И., Ишлинский Ю.А., Крагельский И.В., Ребиндер П.А., Костецкий В.И., Дерягин В.В., Духовский Е.А., Демкин Н.Д., Хрущов Н.М., Чичинадзе А.В., Дроздов Ю.Н., Силин А.А., Понамарев А.Н., Михин Н.М. и другие, а за рубежом: Д. Тейбор, Ф. Боуден, Э. Рабинович, П. Мерчент, Д. Арчанд и другие.

Согласно молекулярно-механической теории трения [17], в контакте двух тел всегда присутствует "третье тело", которое представляет собой ослабленный слой-пленку, состоящую из смазок, окислов адсорбированных молекул газов, паров и различных загрязнений. Эта тонкая пленка служит демпфером между обоими телами и локализует в своем объеме основные контактные напряжения. В случае больших контактных усилий между трущимися поверхностями в деформацию вовлекаются и нижележащие слои, что и определяет двойственную, т.е. молекулярно-механическую природу трения: молекулярную, связанную с преодолением сопротивления

в пленке, адгезионных и молекулярных сил и механическую, связанную с деформированием микронеровностей подпленочного слоя и обусловленную шероховатостью и волнистостью контакта.

Сила трения в контакте равна:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{мол}} + F_{\text{мех}} = \alpha + \beta N + fN, \quad (5.1)$$

где α – прочность на срез адгезионного мостика при отсутствии нормального давления;

β – коэффициент, характеризующий увеличение прочности на срез при приложении внешнего усилия;

f - коэффициент, учитывающий механическую составляющую общей силы трения.

Согласно работам проф. Г.И. Епифанова [18, 19], поверхности твердых тел, как бы тщательно они не были изготовлены, всегда обладают шероховатостью и волнистостью. Внедрение микронеровностей одной поверхности в другую и зацепление неровностей сопряженных поверхностей сопровождается адгезией, возникающей на предельно чистых поверхностях, сближенных до расстояния порядка радиуса действия молекулярных сил. Поэтому основным содержанием процесса трения предельно чистых поверхностей является пластическое сдвигообразование, развивающееся в тонких поверхностных слоях трущихся тел [18].

Для уменьшения в этих условиях явлений пластического сдвигообразования и адгезии в отечественной и зарубежной практике применяется ряд новых видов смазок, самосмазывающих материалов и покрытий.

Проблема повышения работоспособности пьезоэлектрических приводов, работающих в вакууме, связана с уменьшением в узлах

коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Для оценки этих параметров необходимо выбрать модель поверхности трения.

В соответствии с работой [20] поверхности трения можно моделировать в виде сферы, цилиндра или конуса (рис.5.1, а, б, в).

Наиболее пригодной для расчетов на трение и изнашивание является сферическая модель (рис.5.1, а), которая отражает изотропность трения. Две другие формы способны описать анизотропные эффекты. В этих формах нормальные напряжения на периферии (рис.5.1, б), и в центре (рис.5.1, в) пятна контакта являются неопределенными.

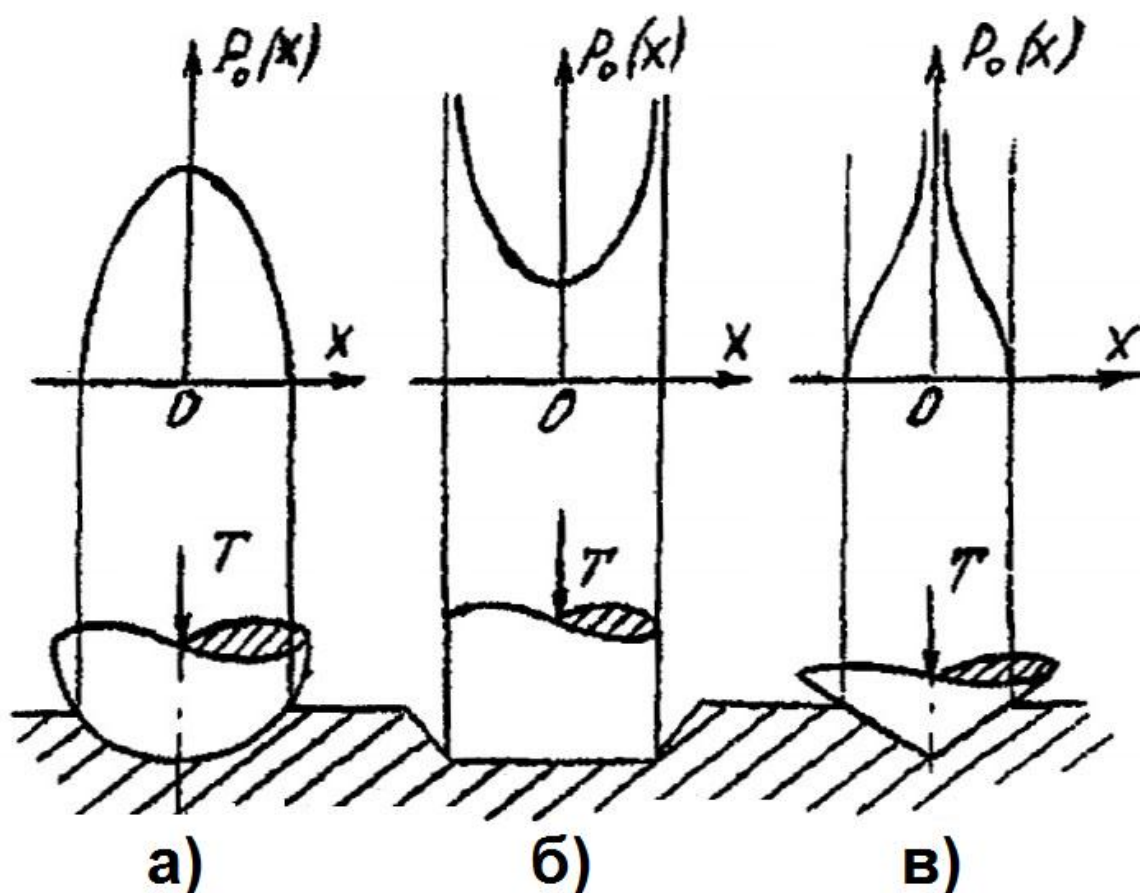


Рис. 5.1. Моделирование поверхностей трения в виде сферы (а), цилиндра (б) или конуса (в)

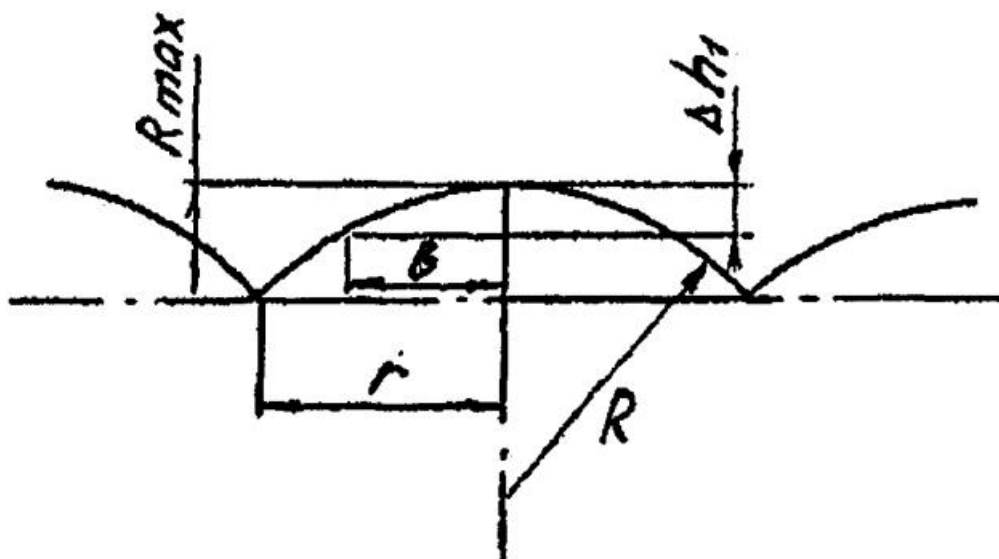


Рис. 5.2. Моделирование поверхностей трения в виде сферических сегментов

Однако, сферическая модель, где микронеровности моделируются в виде полусфер, не всегда отражает картину реальной шероховатости. Поэтому поверхность трения моделируем в виде сферических сегментов, форма которых близка к реальной поверхности (рис. 5.2).

При этом контактное взаимодействие, а следовательно, и изнашивание происходят в зоне вершин микронеровностей, а влияние температуры в зоне трения учитывается изменениями механических свойств материалов [21].

При взаимодействии микронеровностей возникает колебательный процесс, оказывающий влияние на трение и износ контактирующих пар.

5.2. Закономерности процесса газовыделения при трении сопряженных тел в пьезоэлектрическом приводе

Процесс газовыделения [22] при трении в вакууме сопряженных тел сложен и неоднозначен. Количественная оценка суммарного газового потока в зоне трения может быть выполнена на основе рассмотрения физического механизма образования каждой из составляющих потока, поступающего при работе исполнительного устройства в вакууме.

Условие равновесия потоков в зоне трения может быть представлено следующим выражением:

$$q_{\Sigma} = q_{\text{исп}} - q_{\text{изн}} + q_{\text{диф}} + q_{\text{кон}}, \quad (5.2)$$

где q_{Σ} – поток, направленный в зону трения;

$q_{\text{исп}}$ – поток испарения, образованный термической десорбцией;

$q_{\text{изн}}$ – поток, образованный износом контактирующих поверхностей материалов;

$q_{\text{диф}}$ – поток, образованный диффузией газов в объеме материала;

$q_{\text{кон}}$ – поток, образованный конденсацией в результате адсорбции молекул газа на поверхность материала.

Рассмотрим каждую из составляющих суммарного потока в отдельности.

Поток, образованный износом контактирующих поверхностей материалов, определяется исходя из следующих допущений:

1. В момент фрикционного контактного взаимодействия на поверхности контакта не происходит осаждение молекул.

2. Поверхность контакта смоделирована в виде сферических сегментов одинаковой высоты.

3. За одно контактное взаимодействие происходит «срезание» всех адсорбированных молекул, осажденных на поверхности контакта.

4. Износ происходит в зоне вершин микронеровностей.

Время, в течение которого происходит процесс "срезания" всех адсорбированных молекул:

$$t_a = 2b/V_{ск}, \quad (5.3)$$

где b – радиус единичного пятна контакта;

$V_{ск}$ – скорость скольжения.

Так как износ [22] происходит в зоне вершин микронеровностей, то необходимо рассматривать только лишь те молекулы, которые осаждаются на поверхности контакта, т.е. на площадке $A_b = \pi b^2$, и те, которые растворены в толще изношенного материала с концентрацией S .

Иными словами:

$$q_{изн} = q_{изн}^n + q_{изн}^m, \quad (5.4)$$

где $q_{изн}^n$ – поток с поверхности материала, образованный износом;

$q_{изн}^m$ – поток из толщи материала, в результате его изнашивания.

Принимая во внимание, что поверхность контакта по микронеровностям составляет часть общей поверхности сегментной модели шероховатостей, получим:

$$q_{изн}^n = \theta a/t_a, \theta = A_b/A_r, \quad (5.5)$$

где A_b – площадь поверхности контакта единичной микронеровности;

A_r – полная площадь сегментной модели, $A_r = 4r^2$;

a – количество молекул, адсорбированных на единицу поверхности тела.

Поток из толщи материала в результате его изнашивания определяется из следующих соотношений:

$$a = S\Delta h, \quad (5.6)$$

где S – концентрация газа в материале;

$$S = S_0 p^{1/n} e^{\pm \theta_s / (nRT)}. \quad (5.7)$$

Здесь n – число атомов в молекуле газа;

θ_s – энергия активации при растворении;

S_0 – постоянный коэффициент;

p – давление газа.

Как указывается в работе [23], знак «плюс» в формуле характерен для газов, образующих с данным металлом химические соединения, а знак «минус» – для газов, образующих истинные растворы.

$\Delta h = LJ_h$ – толщина изношенного слоя, здесь J_h – линейная интенсивность изнашивания материала; L – путь трения. Тогда

$$a = S\Delta h = SLJ_h = SV_{ck}tJ_h, \quad (5.8)$$

$$q_{изн}^m = \frac{da}{dt} = SV_{ck}J_h, \quad (5.9)$$

где V_{ck} – скорость движения во фрикционном контакте.

Поток, образованный диффузией газов из объема материала, в общем виде может быть определен по формуле [23]:

$$q = D \frac{dS}{dx}, \quad (5.10)$$

где $D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_D}{nRT}\right)$ – коэффициент диффузии,

D_0 – постоянный не зависящий от температуры коэффициент;

n – число атомов в молекуле газа;

Q_D – энергия активации при диффузии.

С учетом того, что $S = \frac{da}{dx}$, диффузный поток равен:

$$q_{\text{диф}} = D \frac{d^2 a}{dx^2}. \quad (5.11)$$

Поток, образованный конденсацией в результате адсорбции молекул газа на поверхность материала, равен:

$$q_{\text{кон}} = \mu \left(1 - \frac{a}{a_m}\right), \quad (5.12)$$

где μ – скорость конденсации;

T – температура поверхности материала.

$$\mu = fp\sqrt{2\pi mkT}, \quad (5.13)$$

где a_m – количество молекул, образующих монослой на единице поверхности;

f – вероятность адсорбирования молекул газа на поверхности материала;

m – масса молекулы;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

p – остаточное давление в вакуумной камере.

Поток испарения, образованный термической десорбцией, равен:

$$q_{исп} = (1 - \theta)a / \tau_a, \quad (5.14)$$

где τ_a – время адсорбции;

$$\tau_a = \tau_0 \exp\left(\frac{Q_a}{RT}\right), \quad (5.15)$$

здесь τ_0 – минимальное время пребывания молекулы в адсорбированном состоянии;

Q_a – энергия активации при адсорбции;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура.

С учетом выражений, подставленных в формулу, получим

$$\frac{da}{dt} = -(1 - \theta) \frac{a}{\tau_a} - \theta \frac{a}{t_a} - SV_{ск} J_h + D \frac{d^2 a}{dx^2} + \mu \left(1 - \frac{a}{a_m}\right). \quad (5.16)$$

Рассматривая достаточно медленный диффузионный процесс, полагая, что изменение концентрации газа по объему тела мало, можно

получить, что $D \frac{d^2 a}{dx^2} \rightarrow 0$. Тогда

$$\frac{da}{dt} = -(1 - \theta) \frac{a}{\tau_a} - \theta \frac{a}{t_a} - SV_{ск} J_h + \mu \left(1 - \frac{a}{a_m}\right) \quad (5.17)$$

или

$$\frac{da}{dt} = -Ba + F, \quad (5.18)$$

где

$$B = \frac{1-\theta}{\tau_a} + \frac{\theta}{t_a} + \frac{\mu}{a_m}; F = \mu - SV_{ck}J_h \quad (5.19)$$

Решение имеет вид:

$$a = \left(a_m - \frac{F}{B} \right) e^{-Bt} + \frac{F}{B}. \quad (5.20)$$

При $t = 0$: $a = a_m$; при $t = \infty$: $a = F/B$.

С учетом диффузионного потока дифференциальное уравнение (3.4.16) примет вид:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -Ba + F + D \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}. \quad (5.21)$$

Подстановка $a = Ue^{-Bt} + \frac{F}{B}$, где $U(x, t)$ - новая функция, приводит к новому уравнению:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (5.22)$$

Решаем дифференциальное уравнение методом Фурье, т.е. методом разделения переменных:

$$U(x, t) = X(x)T(t). \quad (5.23)$$

Тогда, обозначив $V^2 = D$, получим:

$$\begin{aligned} \frac{X''}{X} &= \frac{T'}{V^2 T} = -\lambda^2 = const; \\ T' + V^2 \lambda^2 T &= 0; X'' + \lambda^2 X = 0; \\ T &= C_1 e^{-V^2 \lambda^2 t}; X = C_2 \sin \lambda x + C_3 \cos \lambda x; \\ U(x, t) &= C_1 e^{-V^2 \lambda^2 t} (C_2 \sin \lambda x + C_3 \cos \lambda x) \end{aligned} \quad (5.24)$$

или

$$\begin{aligned} U(x,t) &= e^{-v^2\lambda^2 t} (K_1 \sin \lambda x + K_2 \cos \lambda x), \\ K_1 &= C_1 C_2; K_2 = C_1 C_3 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Принимая во внимание, что $U = \frac{aB - F}{Be^{-Bt}}$, получим для a :

$$a = e^{-(v^2\lambda^2 + B)t} (K_1 \sin \lambda x + K_2 \cos \lambda x) + \frac{F}{B}. \quad (5.26)$$

На границе раздела двух сред «газ-твердое тело» функция для a имеет разрыв, т.к. концентрация газа на поверхности тела и в самом теле вблизи поверхности неодинаковы.

Поэтому для поверхности тела имеют место следующие начальные условия:

$$t = 0, x = 0, a = a_m;$$

$$\text{тогда } a_m = K_2 + F/B,$$

$$\text{откуда } K_2 = a_m - F/B,$$

и уравнение (5.26) для поверхности тела имеет вид:

$$a = \left(a_m - \frac{F}{B} \right) e^{-(v^2\lambda^2 + B)t}. \quad (5.27)$$

Выражение для a применительно к объему твердого тела определяется из следующих начальных и граничных условий:

$$t = 0, x = 0, a = S_0 d, \frac{\partial a}{\partial x} = S_0;$$

$$t = 0, x = l, \frac{\partial a}{\partial x} = S_0,$$

где l – толщина тела;

S_0 – начальная концентрация газа в твердом теле;

d – диаметр молекулы.

С учетом указанных начальных и граничных условий имеем:

$$S_0 d = K_2 + F/B. \quad (5.28)$$

Откуда $K_2 = S_0 d - F/B$

$$\frac{\partial a}{\partial x} = \lambda e^{-(v^2 \lambda^2 + B)t} (K_1 \cos \lambda x - K_2 \sin \lambda x). \quad (5.29)$$

При $t = 0$, $x = 0$, $S_0 = \lambda K_1$, откуда $K_1 = S_0/\lambda$. Тогда выражения для a имеют вид:

$$a = e^{-(v^2 \lambda^2 + B)t} \left(\frac{S_0}{\lambda} \sin \lambda x + \left(S_0 d - \frac{F}{B} \right) \cos \lambda x \right) + \frac{F}{B};$$

$$\frac{\partial a}{\partial x} = e^{-(v^2 \lambda^2 + B)t} \left(S_0 \cos \lambda x - \lambda \left(S_0 d - \frac{F}{B} \right) \sin \lambda x \right). \quad (5.30)$$

При $t = 0$, $x = l$ имеем

$\lambda = 2\pi n/l$, где $n = 0, 1, 2, \dots$

Окончательно

$$a = e^{-\left[D \left(\frac{2\pi n}{l} \right)^2 + B \right] t} \left(\frac{S_0 l}{2\pi n} \sin \left(\frac{2\pi n}{l} x \right) + \left(S_0 d - \frac{F}{B} \right) \cos \left(\frac{2\pi n}{l} x \right) \right) + \frac{F}{B}. \quad (5.31)$$

Полученные формулы позволяют теоретически оценить количество молекул газа на поверхности твердого тела и внутри него, а также величину газового потока из зоны трения. Так исходя из формулы

$$q_{\Sigma} = \frac{da}{dt} = -B \left(a_m - \frac{F}{B} \right) e^{-Bt}, \quad (5.32)$$

при $t = 0$:

$$q_{\Sigma} = \frac{da}{dt} = -a_m B + F, \quad (5.33)$$

а с учетом диффузионного процесса в соответствии с формулой

$$q_{\Sigma} = \frac{da}{dt} = - \left[D \left(\frac{2\pi n}{l} \right)^2 + B \right] e^{- \left[D \left(\frac{2\pi n}{l} \right)^2 + B \right] t} \left(\frac{S_0 l}{2\pi n} \sin \left(\frac{2\pi n}{l} x \right) + \left(S_0 d - \frac{F}{B} \right) \cos \left(\frac{2\pi n}{l} x \right) \right), \quad (5.34)$$

при $t = 0, x = 0$ имеем:

$$q_{\Sigma} = - \left[D \left(\frac{2\pi n}{l} \right)^2 + B \right] \left(S_0 d - \frac{F}{B} \right) \quad (5.35)$$

Знак минус в формулах указывает на то, что газовый поток идет из зоны трения в вакуумную камеру, и на расположенные в ней технологические объекты.

Остаточное давление вблизи зоны трения может быть определено по формуле:

$$p = \frac{q_{\Sigma}}{S_{\text{эфф}}}, \quad (5.36)$$

где $S_{\text{эфф}}$ – эффективная скорость откачки.

Давление газов вблизи зоны трения выше, чем в вакуумной камере. Это обстоятельство следует учитывать при рассмотрении моделей трения и изнашивания.

5.3. Энергетический баланс в зоне контакта деталей

В процессе трения в зоне контакта двух деталей происходит преобразование энергии [24]. Подведенная энергия трения в виде работы сил трения преобразуется в другие вида энергии, такие, как энергия упругих и пластических деформаций или внутренняя энергия в твердом теле. Также происходит теплопередача энергии вглубь материала, тепловое и электромагнитное излучение. Часть энергии расходуется на химические реакции и сорбционно-десорбционные процессы в зоне трения. Рассмотрим более подробно отдельные составляющие общего энергетического потока в зоне функционального контакта рис.5.3.

Энергия упругих деформаций

При взаимодействии двух микронеровностей на площадках контакта возникают нормальные и тангенциальные напряжения. Выражения для энергии упругих деформаций в этом случае имеют следующий вид.

Для нормальных деформаций:

$$W_{\varepsilon} = \frac{\sigma * \varepsilon}{2} * V_R = \frac{\sigma^2}{2 * E} * V_R . \quad (5.37)$$

Для тангенциальных деформаций:

$$W_{\tau} = \frac{\tau * \gamma}{2} * V_R = \frac{\tau^2}{2 * C} * V_R ,$$

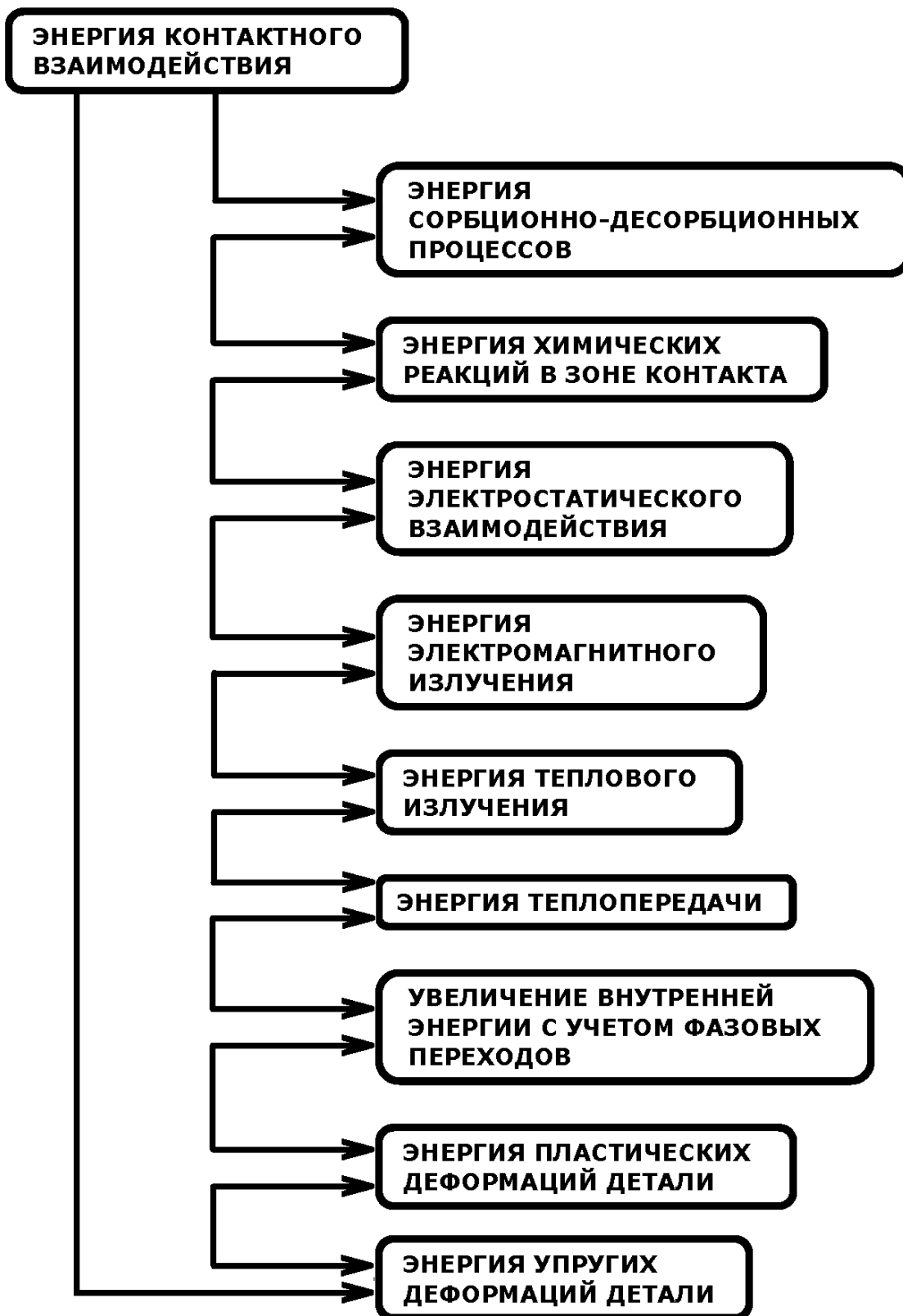


Рис. 5.3. Схема формирования энергетического потока в зоне функционального контакта [24]

Здесь τ и σ – значения тангенциальных и нормальных напряжений в зоне контакта соответственно, МПа;

ε , γ – относительные угловые и линейные деформации соответственно;

E , C – модули упругости 1-го и 2-го рода материалов контактирующих тел соответственно, МПа;

V_R – объем деформируемого материала.

В общем случае при наличии как нормальных так и тангенциальных напряжений относительно координатных осей X , Y , Z полная энергия упругих деформаций равна:

$$W_{\varepsilon\gamma} = \int_0^{\varepsilon_b} \int_0^{\gamma_b} (\sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z + \tau_x d\gamma_x + \tau_y d\gamma_y + \tau_z d\gamma_z) V_R . \quad (5.38)$$

Здесь $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z$ – составляющие тензоров напряжения;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ – составляющие относительных и угловых деформаций единичной микронеровности, смоделированной в виде сегмента радиуса R (рис. 5.4).

Величина энергии упругих деформаций ввиду малости $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ незначительна.

Энергия пластических деформаций

Пластическую деформацию следует рассматривать как деформацию за пределами упругости. Энергия деформации может быть определена при наличии диаграммы напряжений и деформаций, полученных экспериментальным путем.

$$W_\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_b} \sigma^* V_R d\varepsilon ; \quad (5.39)$$

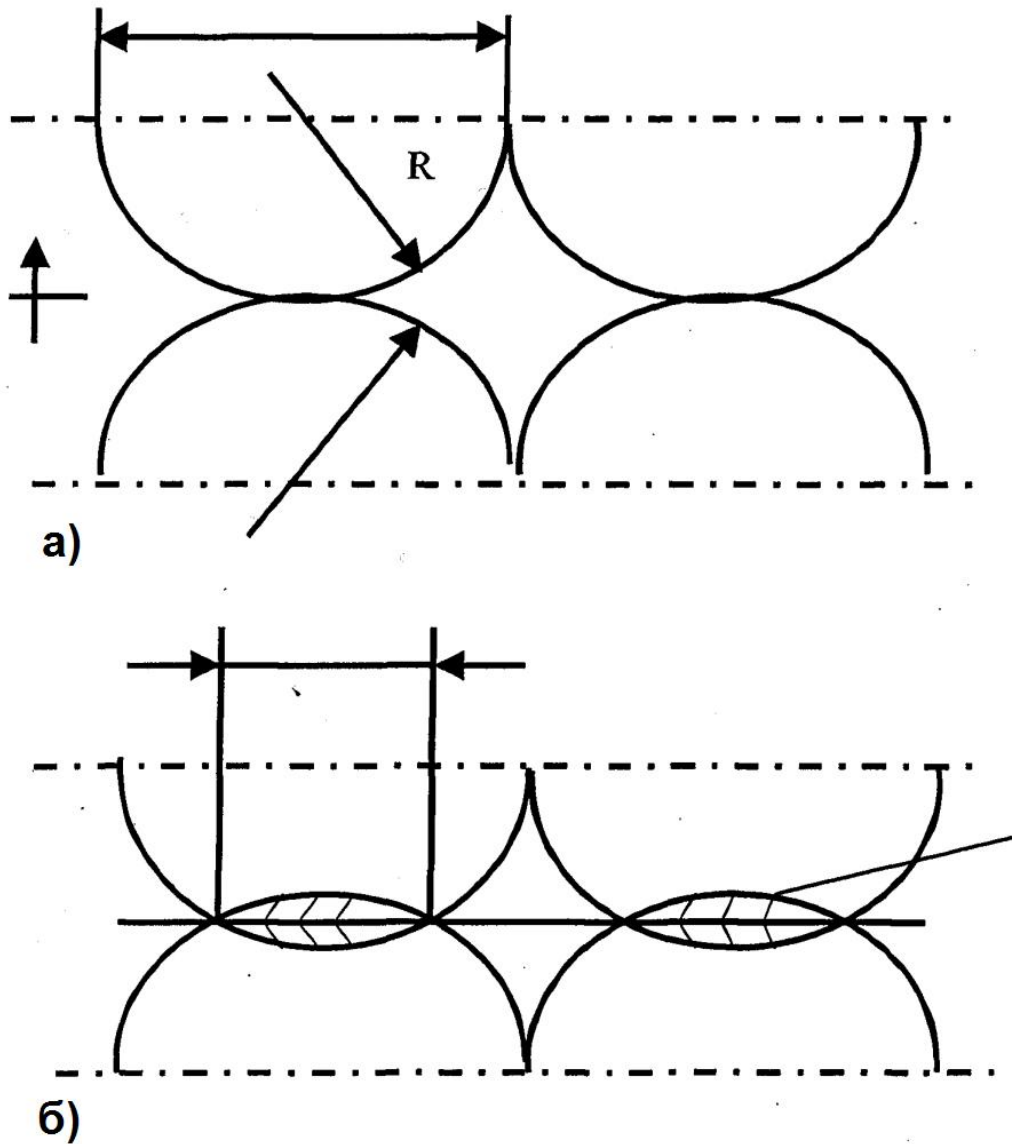


Рис. 5.4. Модель шероховатости реальной поверхности в виде сегментов радиуса R : а) до контактного взаимодействия; б) после контактного взаимодействия

$$W_{\gamma} = \int_0^{\gamma_b} \tau^* V_R d\gamma . \quad (5.40)$$

Если контактирующие поверхности полностью отделены одна от другой слоем твердой смазки или ТСП, то в этом случае все процессы преобразования энергии протекают в вязко-упругом или пластическом

промежуточном слое материала смазки с учетом релаксации материала.

Увеличение внутренней энергии в твердом теле с учетом фазовых переходов

Увеличение внутренней энергии в твердом теле в интервале температур от T_1 до T_2 равно

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_V * m * dT = \int_{T_1}^{T_2} c_V * \rho * V * dT . \quad (5.41)$$

Как видно из рис.5.5, изменение внутренней энергии может происходить плавно и скачкообразно вследствие фазовых переходов. При этом следует иметь в виду, что удельная теплоемкость c_V также зависит от температуры.

Скачкообразное изменение внутренней, энергии связано с фазовыми переходами, плавлением и испарением материала:

$$\Delta u_{\alpha \rightarrow \beta} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{\alpha \rightarrow \beta} * dm = \int_{V_1}^{V_2} \lambda_{\alpha \rightarrow \beta} * \rho * dV ; \quad (5.42)$$

$$\Delta u_{nl} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{nl} * dm = \int_{V_1}^{V_2} \lambda_{nl} * \rho * dV ; \quad (5.43)$$

$$\Delta u_{исп} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{исп} * dm = \int_{V_1}^{V_2} \lambda_{исп} * \rho * dV , \quad (5.44)$$

где $\lambda_{\alpha \rightarrow \beta}$, λ_{nl} , $\lambda_{исп}$ – соответственно удельная теплота фазового перехода, плавления и испарения;

ρ , m , V – плотность материала, масса и объем соответственно.

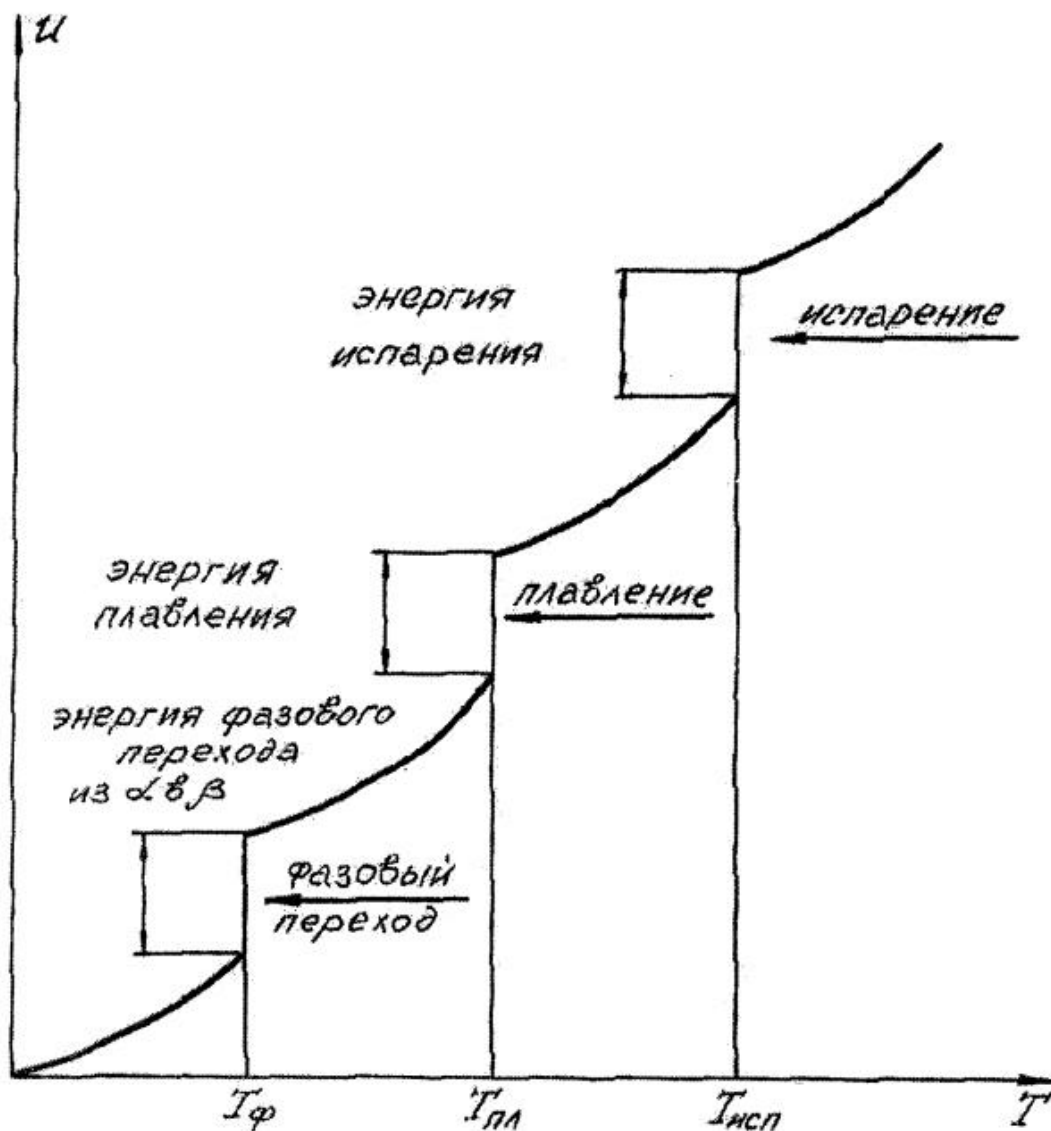


Рис. 5.5. Изменение внутренней энергии кристаллического твердого тела с изменением абсолютной температуры ($T_{\text{ф}}$ – температура фазового перехода; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; $T_{\text{исп}}$ – температура испарения)

В общем случае, в соответствии с законами термодинамики изменение внутренней энергии будет равно:

$$\Delta u = F + \Delta T * s, \quad (5.45)$$

где F – свободная энергия, т.е. та энергия, которую можно превратить в работу;

$\Delta T * s$ – связанная энергия, т.е. та энергия, которую нельзя превратить в работу, а лишь в тепло;

s – энтропия.

Энергия теплопередачи

Теплопередача с точки зрения физики проявляется двояко – в виде теплопроводности и конвекции. Конвективный теплообмен в вакууме практически невозможен за счет малого остаточного давления газов в вакуумной камере, поэтому будем рассматривать лишь теплопередачу энергии из области контактирования микронеровностей вглубь материала.

Количество тепла, протекающее через поверхность контактирования пропорционально площади контакта скорости изменения температуры в направлении, перпендикулярном площади контакта, и промежутку времени Δt :

$$\Delta Q_{mn} = k * A * \frac{dT}{dX} * \Delta t . \quad (5.46)$$

А при $\frac{dT}{dX} = const$ последнее выражение примет вид:

$$\Delta Q_{mn} = k * A * \frac{T_2 - T_1}{X} * \Delta t , \quad (5.47)$$

если микронеровности смоделированы в виде цилиндров. Здесь:

k – коэффициент теплопроводности;

A – площадь контакта;

$T_2 - T_1$ – перепад температур;

$\frac{dT}{dX}$ – градиент температуры в направлении, перпендикулярном

площади контакта;

Δt – продолжительность процесса теплопередачи.

Энергия теплоизлучения

Теплоизлучение в виде электромагнитных волн с длиной волны $8 \div 400$ мкм осуществляется посредством фотонов по закону Стефана-Больцмана

$$W_{изл} = c_s * A * \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] * \Delta t, \quad (5.48)$$

где c_s – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

A – площадь излучения;

Δt – продолжительность процесса теплоизлучения.

Энергия электромагнитного излучения

Работа сил трения может быть преобразована в электромагнитные волны, например, световые ультрафиолетовые лучи, гамма-излучение и др. Энергия электромагнитного излучения определяется выражением

$$W_{эм} = \beta * V_F * \sum_v n_v * h_v, \quad (5.49)$$

где β – коэффициент, учитывающий геометрию излучений и отражения от огибаемых волнами микронеровностей;

n_v – пространственная плотность излучения (количество фотонов различной частоты в объеме излучаемого материала) ;

h_v – энергия фотонов различной частоты;

V_F – диапазон частот, излучаемых материалом микронеровности.

Энергия электростатического взаимодействия

В результате интенсивного соприкосновения микронеровностей возникает электризация трением. В граничном слое в результате перехода зарядов создается дипольный слой с определенным напряжением контакта; Общая энергия поля в упрощённом виде определяется, исходя из уравнения:

$$W_F = \frac{\beta_F}{2} * \vec{E} * \vec{D} * V_F. \quad (5.50)$$

Здесь β_F – коэффициент, учитывающий способ создания электрического потенциала;

\vec{E} – напряженность электрического поля;

\vec{D} – диэлектрическая плотность смещения;

V_F – объем, заполненный электрическим полем.

Энергия химических реакций в зоне трения

Повышенная склонность к вступлению в реакции связано со снижением энергии активации вследствие ослабления межмолекулярных связей в результате, так называемой, механической деструкции. При наличии соответствующих экспериментальных результатов энергию химических реакций можно определить, используя выражение:

$$W_{XP} = \frac{\beta_{XP} * E_{XP} * \rho}{J * M} * V_J, \quad (5.51)$$

где β_{XP} – коэффициент, учитывающий долю активизированного объема в объеме трения;

J – интенсивность износа;
 E_{XP} – удельная энергия активации;
 ρ – плотность материала;
 M – молекулярная масса;
 V_J – объем изношенного материала.

Энергия сорбционно-десорбционных процессов

При наличии в зоне трения сорбционно-десорбционных процессов количество энергии рассчитывают и использованием следующего уравнения

$$W_{CD} = \frac{\beta_{CD} * E_{CD} * \rho}{J * M} * V, \quad (5.52)$$

где β_{CD} – коэффициент, учитывающий долю сорбционно-десорбционного объема в объеме трения;

E_{XP} – удельная энергия сорбции-десорбции.

Основные составляющие энергетического баланса

Современный уровень разработки проблемы по составлению энергетического баланса для процесса трения позволяет сделать вывод о том, что из основных составляющих работы сил трения, преобразованных в различные виды энергии, будут иметь превалирующее значение следующие:

1. Энергия пластических деформаций.
2. Внутренняя энергия с учетом фазовых переходов.
3. Энергия теплопередачи.

С учетом сказанного и будем проводить дальнейшие рассуждения.

Исходя из молекулярно-механической теории, можно получить, что работа сил трения равна

$$W_{TP} = W_{МОЛ} + W_{ДЕФ}, \quad (5.53)$$

где $W_{МОЛ}$ – работа, затраченная на разрыв молекулярных связей во фрикционном контакте;

$W_{ДЕФ}$ – работа, затраченная на деформирование единичных микронеровностей.

Можно принять [24], что

$$W_{МОЛ} = P * \frac{E_{СВ} * n}{КЧ}, \quad (5.54)$$

$$W_{ДЕФ} = \frac{1}{2} * F_M * (R - \sqrt{R^2 - b^2}). \quad (5.55)$$

Здесь:

$E_{СВ}$ – энергия связи в кристаллической решетке, Дж;

P – вероятность образования адгезионных связей в кристаллическом материале зависит от координационного числа кристаллической решетки КЧ и определяется следующим образом:

$$P = P_1 + P_2 = \frac{КЧ}{12} + \frac{КЧ}{12}; \quad (5.56)$$

n – число граничных атомов на площадке контакта;

$F_M = 4 * p_0 * r^2$ – сила, действующая на единичную микронеровность;

b – радиус пятна контакта;

p_0 – удельное давление в контакте;

r – радиус основания сегмента.

Выражение (5.53) представляет собой работу сил трения за один цикл деформации единичной микронеровности, т.е. при перемещении контактирующих тел друг относительно друга на расстояние. При этом в зоне трения выделяется квант энергии. Тогда «количество квантов» равно

$$N = \frac{h}{2 * r} = \frac{v_{ск} * \Delta t}{2 * r}, \quad (5.57)$$

$v_{ск}$ – скорость скольжения.

Полагая, что вся эта энергия преобразуется в тепло, которое распространяется вглубь микронеровностей, можно записать:

$$W_{\Sigma TP} = W_{TP} * N = (W_{МОЛ} + W_{ДЕФ}) * \frac{v_{ск} * \Delta t}{2 * r} = k * A * \frac{dT}{dx} * \Delta t; \quad (5.58)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{W_{МОЛ} + W_{ДЕФ}}{2 * r * k * A} * v_{ск}. \quad (5.59)$$

Так как $A = \pi * (R^2 - x^2)$, где x – текущая координата (рис. 5.6),

$$T = \int_{\sqrt{R^2 - b^2}}^R \frac{W_{МОЛ} + W_{ДЕФ}}{2r * k * \pi(R^2 - x^2)} * v_{ск} * dx + T_0. \quad (5.60)$$

Производя интегрирование последнего выражения, получим:

$$T = \frac{W_{МОЛ} + W_{ДЕФ}}{2r * k * \pi(R^2 - x^2)} * v_{ск} * \ln \frac{1 + \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{R}}{1 - \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{R}} + T_0. \quad (5.61)$$

Здесь T_0 – начальная температура контактирующих материалов при $b = 0$.

Разложим выражение $\ln \frac{1 + \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{R}}{1 - \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{R}}$, входящее в последнее

выражение, в ряд Маклорена и, ограничив его первым членом, окончательно получим выражение для температуры на поверхности трения, которое позволит теоретически определить температурный режим в любом узле сухого трения:

$$T = \frac{(W_{МОЛ} + W_{ДЕФ})(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{2r * k * \pi R^2} * v_{ск} + T_0. \quad (5.62)$$

Последнее уравнение является начальным условием для решения уравнения теплопроводности.

Рассмотрим однородную полусферу, теплоизолированную с боков. Контактное пятно будем считать достаточно большим, чтобы в любой момент времени температуру во всех очагах поперечного сечения можно было считать одинаковой.

Величина теплового потока считается положительной, если тепло течет в сторону возрастания x . Рассмотрим процесс распространения температуры в полусфере с достаточно большим контактным пятном. Этот процесс описывается функцией $u(x, t)$, представляющей температуру в сечении x в момент времени t . Найдем уравнение, которому должна удовлетворять функция $u(x, t)$.

Физические закономерности

1. Закон Фурье: если температура тела неравномерна, то в нем возникают тепловые потоки, направленные из мест с более высокой температурой в места с более низкой температурой.

Количество тепла, протекающее через сечение $A(x)$ за промежуток $(t, t + \Delta t)$, равно:



Рис. 5.6. Однородная полусфера

$$\Delta Q = -k * A * \frac{du}{dx} * \Delta t, \quad (5.63)$$

где k – коэффициент теплопроводности.

2. Количество тепла, необходимое для нагревания однородного тела, чтобы его температура повысилась на Δu , равно

$$\Delta Q = c * m * \Delta u = c * \rho * V * \Delta u, \quad (5.64)$$

где c – удельная теплоемкость, m – масса, ρ – плотность, V – объем.

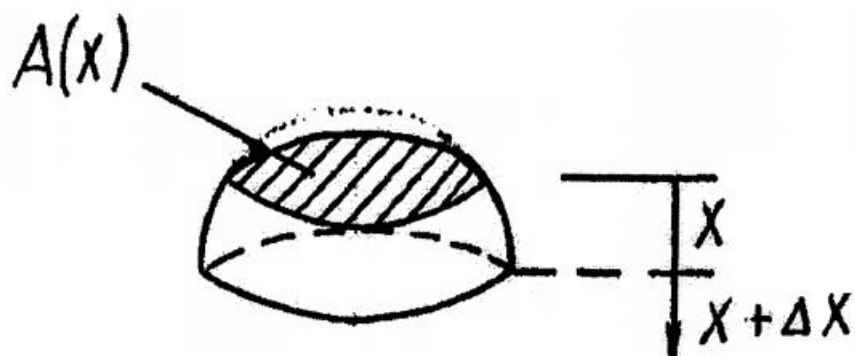


Рис. 5.7. Участок полусферы, ограниченный поперечными сечениями $A(x)$ и $A(x+\Delta x)$ с абсциссами x и $x+\Delta x$ соответственно

Выделим участок полусферы, ограниченный поперечными сечениями $A(x)$ и $A(x+\Delta x)$ с абсциссами x и $x+\Delta x$ соответственно (рис.5.7).

Составим уравнение теплового баланса.

$$\Delta Q(x) = -k * A(x) * \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} * \Delta t \quad (5.65)$$

– количество тепла, входящего через поперечное сечение $A(x)$ за промежуток времени Δt ;

$$\Delta Q(x + \Delta x) = -k * A(x + \Delta x) * \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial x} * \Delta t \quad (5.66)$$

– количество тепла, выходящего через сечение $A(x+\Delta x)$ за промежуток времени Δt .

Количество тепла, сообщенного объему, ограниченному рассмотренным участком полусферы за время Δt , равно:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q(x) - \Delta Q(x + \Delta x) = -k * A(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} * \Delta t + \\ &+ k * A(x + \Delta x) * \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial x} * \Delta t = \\ &= k * A(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} * \Delta t + k [A(x) + A'(x)\Delta x + O(\Delta x^2)] * \\ &* \left[\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \Delta x + O(\Delta x^2) \right] \Delta t = \\ &= k * A(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} * \Delta x * \Delta t + \\ &+ k * A'(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} * \Delta x * \Delta t + O(\Delta x^2). \end{aligned} \quad (5.67)$$

Из (5.67) получаем ΔQ с точностью до бесконечно малых величин высшего порядка в виде

$$\Delta Q = -k * A(x) * \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} * \Delta x * \Delta t + k * A'(x) * \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} * \Delta x * \Delta t. \quad (5.68)$$

С другой стороны, по формуле (5.64):

$$\Delta Q = c * \rho * A * \Delta x * \Delta t \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5.69)$$

– количество тепла, сообщенного телу. Приравнявая (5.68) и (5.69), получаем:

$$k \left(\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \frac{A'(x)}{A(x)} * \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) = c * \rho * \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (5.70)$$

Обозначив $a^2 = \frac{k}{c * \rho}$, получим уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + a^2 \frac{A'(x)}{A(x)} * \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}. \quad (5.71)$$

Запишем $A(x)$ в явном виде: полусфера радиусом R , $A(x)$ – пятно контакта.

$$\begin{aligned} A(x) &= \pi \left(\sqrt{R^2 - (R-x)^2} \right)^2 = \pi * x * (2R-x); \\ A'(x) &= 2\pi(R-x); \\ \frac{A'(x)}{A(x)} &= \frac{2(R-x)}{x(2R-x)}. \end{aligned}$$

В этом случае уравнение (5.71) примет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + a^2 \frac{2(R-x)}{x(2R-x)} * \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}. \quad (5.72)$$

При $x \ll R$ имеем:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{x} * \frac{\partial u}{\partial x} \right).$$

Применим к решению последнего уравнения метод Фурье, полагая $U(x,t) = X(x) * T(t)$.

$$\frac{T'(t)}{a^2 T(t)} = \frac{X''(x) + \frac{1}{x} * X'(x)}{X(x)} = -\lambda^2. \quad (5.73)$$

Отсюда $T(t) = c * e^{-\lambda^2 * a^2 * t}$.

Для функции $X(x)$ получаем уравнение:

$$X''(x) + \frac{1}{x} * X'(x) + \lambda^2 * X(x) = 0. \quad (5.74)$$

Это уравнение Бесселя 0-го порядка, одно частное решение которого выражается через функцию Бесселя нулевого порядка [25]:

$$X(x) = J_0(\lambda x).$$

Второе линейно независимое решение уравнения – функцию Неймана N_0 – мы не принимаем в расчет, так как она обращается в бесконечность при $x = 0$.

Чтобы решение удовлетворяло однородному краевому условию, нужно положить $J_0(\lambda R) = 0$.

Таким образом, собственными числами задачи являются величины

$\lambda_k = \frac{\mu_k}{R}$, где μ_k – корни функции Бесселя нулевого порядка.

$$\mu_1 = 2,4; \mu_2 = 5,52; \mu_3 = 8,65; \mu_4 = 11,79.$$

Каждому собственному числу μ_k соответствует собственная функция

$$u_k(x, t) = e^{-\lambda_k^2 a^2 t} * J_0(\lambda_k x), \quad (5.75)$$

а в общем случае

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda_k^2 a^2 t} * J_0(\lambda_k x) \quad (5.76)$$

или

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_k}{R}\right)^2 a^2 t} * J_0\left(\frac{\mu_k}{R} x\right) \quad (5.77)$$

В практических расчетах в основном используются только первые два корня μ_1 и μ_2 .

ГЛАВА 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

В настоящей главе рассматривается функционирование пьезоэлектрического привода вращения, предназначенного для работы в условиях вакуума.

6.1. Характеристика пьезоэлектрического привода вращения

Пьезоэлектрический привод вращения (рис.6.1) состоит из корпуса 1, в котором в гайке 2 закреплена масса 6, к которой припаяны два кольца 3 из пьезокерамики и электровводы 12. К крайнему торцу керамического кольца припаян концентратор 4, оканчивающийся торцом, выполняющим роль вибратора. Торцев-вибратор находится в постоянном контакте с комплексом пластин 13 расположенных под углом плоскости торца и жестко закрепленных в шайбе 8.

Шайба 6 жестко соединена с ротором пьезоэлектрического привода, вращающимся на подшипниках 10. Ротор представляет собой стаканчик, имеющий радиальные прорезы, и закрепленную в нем втулку 7, в которой установлена шайба 8. Ротор пьезоэлектрического привода жестко соединен с валиком 11 диаметром 2,5 мм.

Поворотом гайки 2 перемешают торцев-вибратор, обеспечивая оптимальное силовое замыкание между ним и шайбой 8.

С помощью двух отверстий с резьбой М2,5 в торце корпуса электрический привод можно установить на объекте. Центрирование

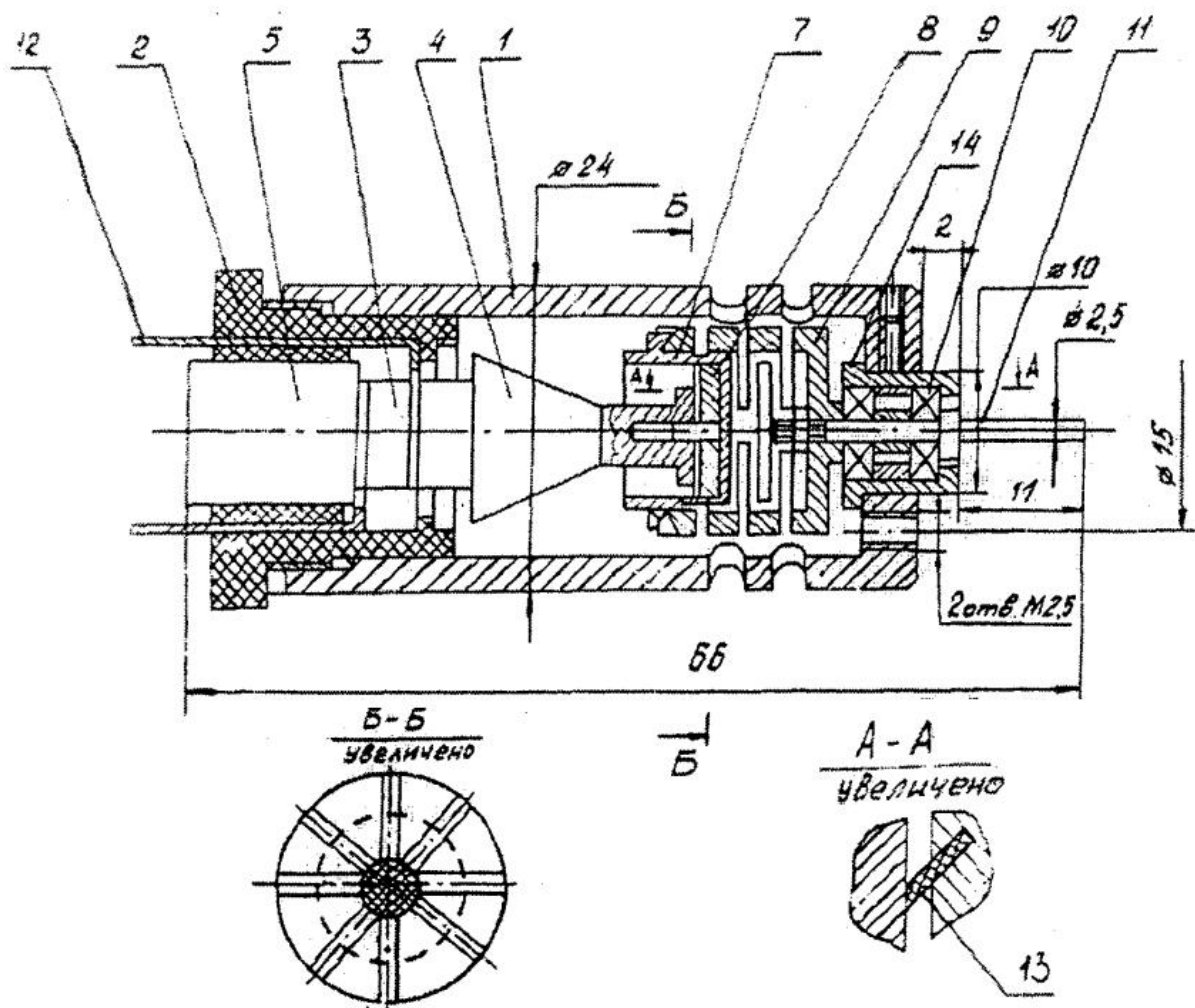


Рис. 6.1. Пьезоэлектрический привод вращения

пьезоэлектрического привода осуществляется с помощью буртика 10, образованного выступающим корпусом 14 подшипников.

При подаче на электровводы 12 переменного напряжения торцевик вибратор начинает совершать вынужденные колебания, которые через пластины 13 передаются шайбе 8.

За счет того, что пластины 13 расположены под углом к плоскости торца и упруго поджаты к нему благодаря упругим свойствам стаканчика 9, имеющего прорези, возникает вращение шайбы 8 (а значит, и всего ротора). Оно возможно за счет возникновения виброупругого режима

трения между торцом-вибратором и пластинами 13. Регулировка режима осуществляется поворотом гайки 2, при котором:

- при смещении торца-вибратора вправо за счет сил трения покоя на пластины 13 передается импульс силы, окружная составляющая которого заставляет повернуться шайбу на определенный угол;
- при смещении торца-вибратора влево имеет место проскальзывание между ними и пластинами 13, что не приводит к изменению углового положения шайбы 8.

Габариты блока управления: 130x86x25 мм.

Питание привода осуществляется от стабилизированного источника постоянного тока напряжением 15 В.

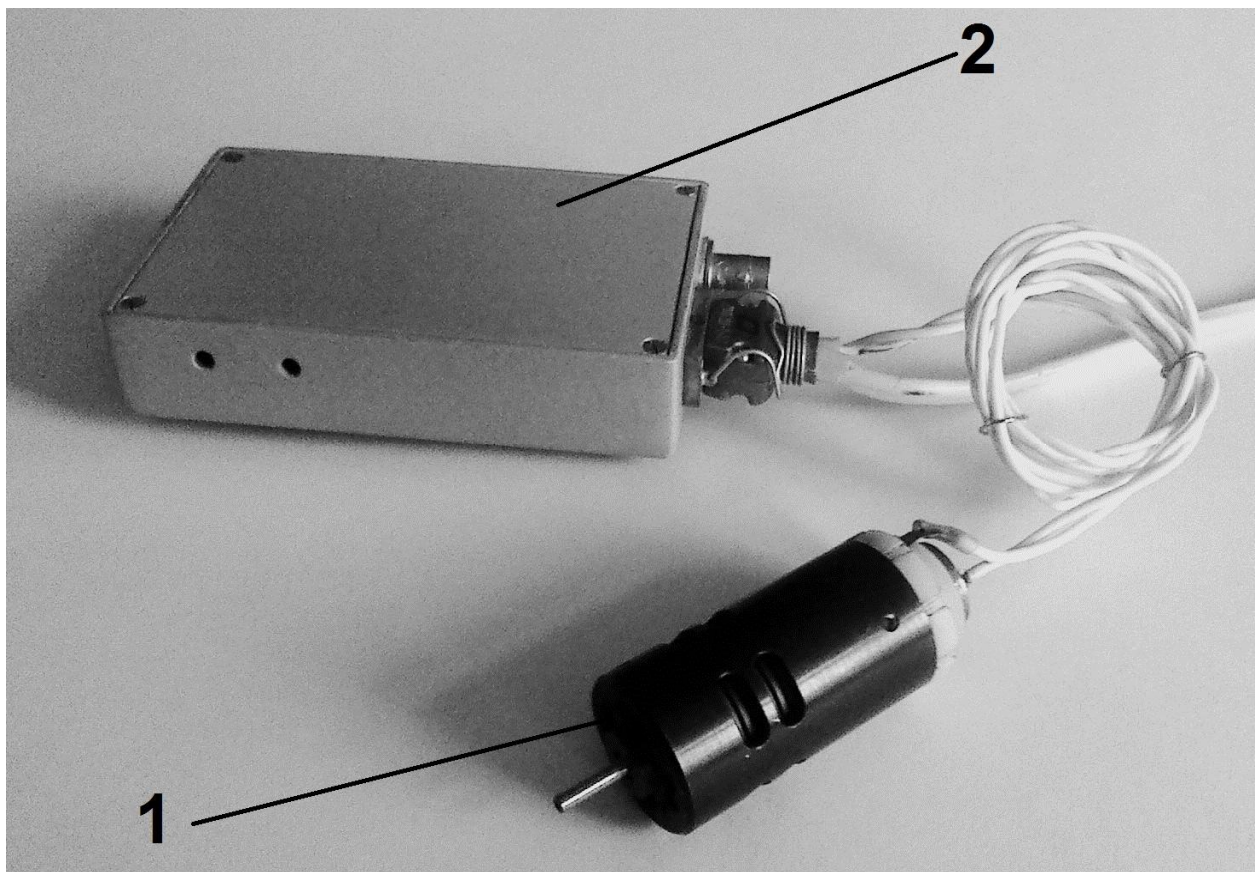


Рис. 6.2. Пьезоэлектрический привод вращения, общий вид:
1 – пьезопривод; 2 – блок управления

Режим работы пьезоэлектрического привода: квазинепрерывный, дискретный и непрерывный. Потребляемая мощность не более $2 \text{ Вт} \pm 10\%$. Выходной момент на валу: не менее $1,5 \text{ Н}\cdot\text{мм}$. Габариты пьезоэлектрического привода: $25 \times 50 \text{ мм}$. Вес: 65 г .

Фото общего вида описанного привода с блоком управления приведено на рис.6.2.

Фото составных частей привода приведено на рис.6.3

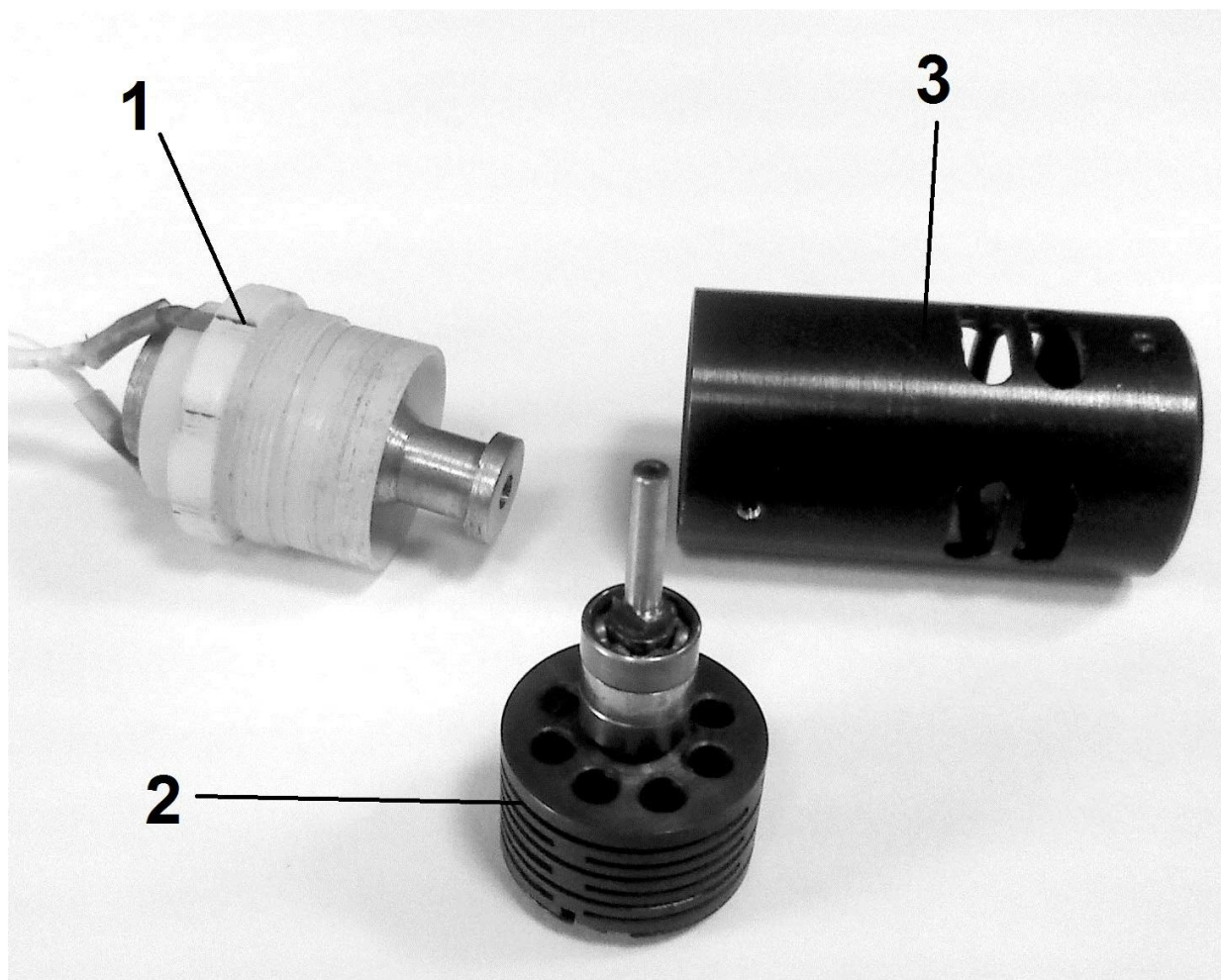


Рис. 6.3. Составные части пьезоэлектрического привода вращения:
1 – вибратор с пьезокерамическими кольцами; 2 – упругий элемент с выходным звеном;
3 – корпус

Аналогичный пьезопривод вращения, оптимизированный для работы в вакууме, изображен на рис.6.4. Пьезопривод содержит корпус 1, установленные в нем пьезокерамические кольцо 2, вибратор 3, комплект упругих пластин 4, расположенных под углом к плоскости торца 5 выходного звена 6 и жестко закрепленных в ней, упругий элемент связанный с шайбой 6 и валиком 8. Шайба 6 жестко установлена в цилиндрическом кожухе 9, один торец 10 которого закреплен на шайбе 6, а другой 11 выполнен свободным. На вибраторе 3 установлено кольцо 12 из теплопроводящей резины, которое расположено в цилиндрическом кожухе 9, со стороны свободного торца 11, с зазором не более 0,1 мм. Внутри кожуха 9, между кольцом 12 из теплопроводящей резины и выходным звеном 6 размещено смазывающее вещество 13. Это может быть как сухая смазка (например, дисульфид молибдена), так и легкоплавкий металл (например, галлий, имеющий температуру плавления 29,8°С), который расплавляется за счет тепла, выделяемого в зоне трения, и оказывает смазочное действие на поверхности контакта.

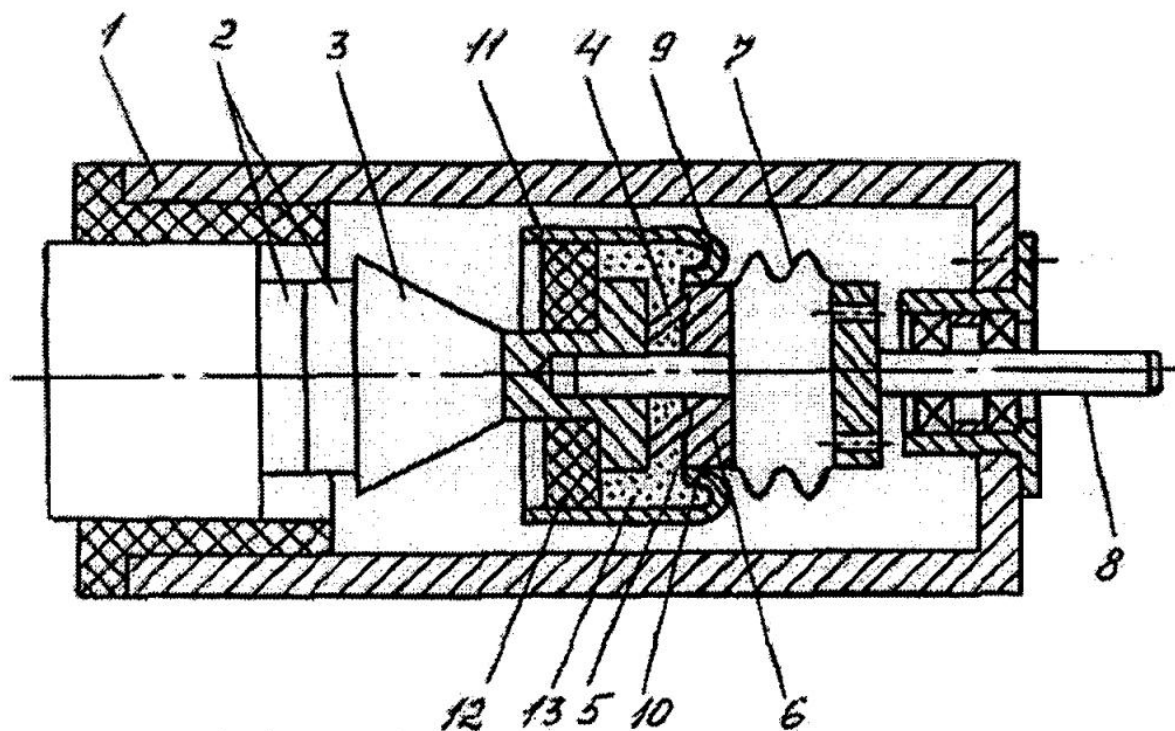


Рис. 6.4. Пьезопривод вращения для работы в вакууме

Одновременно галлий является и хорошим теплопроводящим материалом, что способствует интенсивному теплоотводу.

Наличие смазывающего вещества 13 в зоне контакта пластин 4 и выходного звена 6 обеспечивает наличие «третьего тела» и, как результат, снижение износа контактирующих элементов.

Пьезопривод для работы в вакууме работает следующим образом. При подаче на пьезокерамические кольца 2 напряжения, вибратор 3 начинает совершать осевые колебания. За счет того, что пластины 4 расположены под углом к плоскости торца 5 выходного звена 6, образуется окружная составляющая усилия, которая и обеспечивает вращение валика 8.

6.2. Расчет опорных узлов вакуумного пьезоэлектрического привода

Рассматриваемая методика предназначена для проектного проверочного расчётов однорядных радиальных шарикоподшипников пьезоэлектрического привода, работающих в условиях прогреваемого вакуума. Проектный расчёт заключается в определении необходимого типоразмера шарикоподшипника по расчётной динамической грузоподъёмности.

Динамическая грузоподъёмность однорядных радиальных шарикоподшипников в пьезоэлектрических приводах

$$c = \bar{L}^{\frac{1}{3}} P_r, \quad (6.1)$$

где L – номинальная долговечность шарикоподшипника, млн.об.;

P_r – эквивалентная нагрузка, Н.

Номинальная долговечность шарикоподшипника (в млн.об.) определяется по формуле:

$$L = \frac{60nL_h}{10^6}, \quad (6.2)$$

где n – частота вращения шарикоподшипника, об/мин;

L_h – номинальная долговечность шарикоподшипника, ч.

Эквивалентная нагрузка для рассматриваемого шарикоподшипника:

$$P_r = (XVF_r + YF_a)K_B K_T K_V K_C, \quad (6.3)$$

где X, Y – соответственно коэффициенты радиальной и осевой нагрузки; V – коэффициент вращения; K_B – коэффициент безопасности, зависит от степени точности изготовления деталей и величин перегрузок; K_T – температурный коэффициент; K_V – коэффициент вакуума; K_C – коэффициент смазки; вакуума; F_r, F_a – радиальная и осевая нагрузки соответственно. Более подробно см., например, [26].

В Приложении 1 приведен код программы (на языке Delphi), реализующей данный расчет.

6.3. Расчет скорости движения выходного звена вакуумного пьезоэлектрического привода

Для расчёта скорости движения выходного звена пьезоэлектрического привода рассмотрим схему взаимодействия входного и выходного звеньев пьезоэлектрического привода, представленную на рис.6.5.

Следует иметь в виду, что

$$F_B = F_B^{stat} + F_B^{дин} - \text{сила, действующая со стороны выходного звена,}$$

причем:

$$\begin{aligned}
 F_B^{\text{дин}} &= F_L^{\text{дин}} = F_A^{\text{дин}}; \\
 F_B^{\text{стат}} &= F_L^{\text{стат}} = F_A^{\text{стат}};
 \end{aligned}
 \tag{6.4}$$

$$\begin{aligned}
 F_B^{\text{дин}} &= c_B \Delta_B^{\text{дин}}; \\
 F_L^{\text{дин}} &= c_L \Delta_L^{\text{дин}},
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

где c_B, c_L – жесткости выходного звена и упругой пластины соответственно, Н/м; $\Delta_B^{\text{дин}}, \Delta_L^{\text{дин}}$ – деформации выходного звена и упругой пластины соответственно, м.

С учётом выражений (6.4) и (6.5) имеем:

$$\begin{aligned}
 c_B \Delta_B^{\text{дин}} &= c_L \Delta_L^{\text{дин}}; \\
 c_B (\Delta_A^{\text{дин}} - \Delta_L^{\text{дин}}) &= c_L \Delta_L^{\text{дин}}; \\
 \Delta_L^{\text{дин}} &= \Delta_A^{\text{дин}} \frac{c_B}{c_B + c_L}.
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

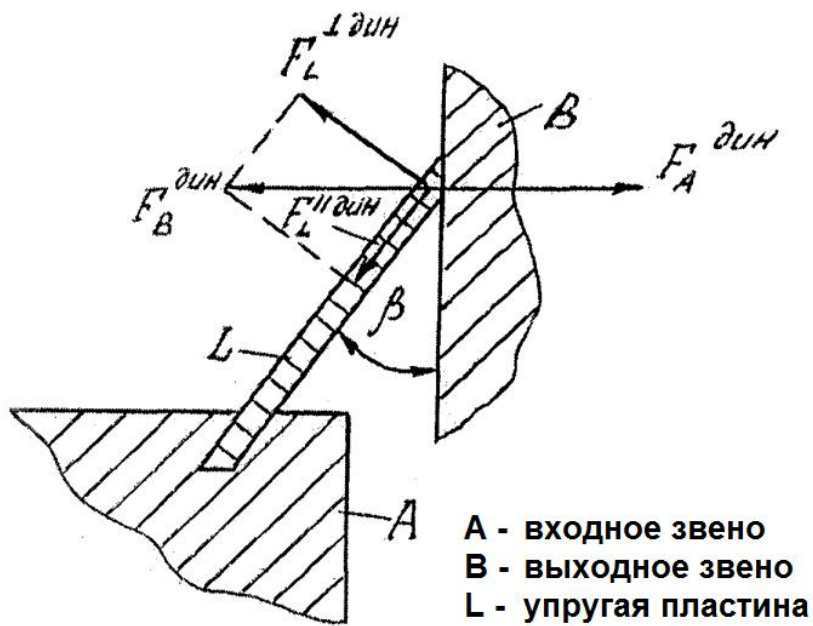


Рис. 6.5. К расчету скорости движения выходного звена пьезоэлектрического привода

Следует также иметь в виду, что

$$\begin{aligned} F_B^{\text{дин}} &= F_L^{\perp\text{дин}} + F_L^{\parallel\text{дин}}; \\ F_L^{\perp\text{дин}} &= F_B^{\text{дин}} \cos \beta; \\ F_L^{\parallel\text{дин}} &= F_B^{\text{дин}} \sin \beta. \end{aligned} \quad (6.7)$$

$F_L^{\perp\text{дин}}, F_L^{\parallel\text{дин}}$ – динамические составляющие усилия $F_B^{\text{дин}}$, действующие на упругую пластину L со стороны выходного звена B (рис.6.5); β – угол наклона упругой пластины к плоскости вращения выходного звена B .

Из курса сопротивления материалов известно, что

$$\Delta_L^{\perp\text{дин}} = \frac{F_L^{\perp\text{дин}} L^3}{3EJK}.$$

E – модуль упругости 1-го рода упругой пластины, Н/м²; J – момент инерции пластины, K – количество упругих пластин.

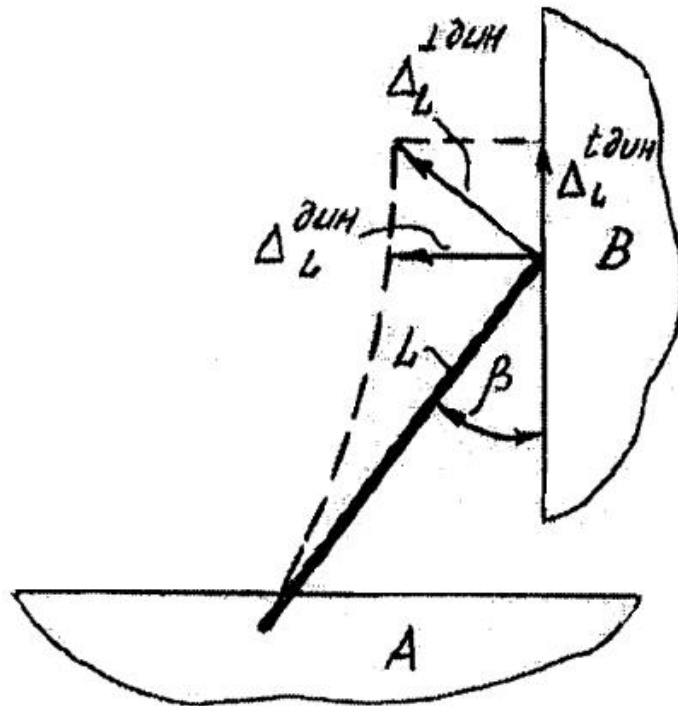


Рис. 6.6. К расчету скорости движения выходного звена пьезоэлектрического привода

Откуда $\frac{\Delta_L^{\partial_{ин}}}{\cos \beta} = \frac{F_B^{\partial_{ин}} \cos \beta L^3}{3EJK}$. Тогда:

$$\Delta_L^{\partial_{ин}} = \frac{F_B^{\partial_{ин}} \cos^2 \beta L^3}{3EJK}. \quad (6.8)$$

Из выражения (6.8) может быть определена жесткость упругой пластины с учётом направляющих косинусов:

$$c_L = \frac{F_B^{\partial_{ин}}}{\Delta_L^{\partial_{ин}}} = \frac{3EJK}{\cos^2 \beta L^3}. \quad (6.9)$$

Жесткость выходного звена определяется экспериментально.

Принимая во внимание (см. рис. 3.7.2), что $\overset{\rightarrow}{\Delta}_L^{\perp \partial_{ин}} = \overset{\rightarrow}{\Delta}_L^{-\partial_{ин}} + \overset{\rightarrow}{\Delta}_L^{-t \partial_{ин}}$,

$$\Delta_L^{t \partial_{ин}} = \Delta_L^{\partial_{ин}} \operatorname{tg} \beta. \quad (6.10)$$

Полученное выражение тангенциальной составляющей будет использовано для определения скорости движения выходного звена пьезоэлектрического привода.

Используя выражения (6.4) и (6.6), получим [27]:

$$F_B^{\partial_{ин}} = F_L^{\partial_{ин}} = c_L \Delta_L^{\partial_{ин}};$$

$$F_B^{\partial_{ин}} = F_L^{\partial_{ин}} = c_L \frac{c_B}{c_B + c_L} \Delta_A^{\partial_{ин}}, \quad \Delta_A^{\partial_{ин}} = DVm; \quad (6.11)$$

$$F_B^{\partial_{ин}} = F_L^{\partial_{ин}} = c_L \frac{c_B}{c_B + c_L} DVm. \quad (6.12)$$

Здесь D – пьезокоэффициент, м/В, V – амплитуда напряжения, В, m – количество пьезоэлектрических пластин, на которых подаётся напряжение.

Рассмотрим более подробно выражение (6.10). С учётом (6.6) оно примет вид:

$$\Delta_L^{t \partial_{ин}} = \Delta_L^{\partial_{ин}} \operatorname{tg} \beta = \Delta_A^{\partial_{ин}} \frac{c_B}{c_B + c_L} \operatorname{tg} \beta \quad (6.13)$$

или

$$\Delta_L^{t \partial_{ин}} = \frac{c_B}{c_B + c_L} DVm \operatorname{tg} \beta \quad (6.14)$$

Скорость движения (линейная) будет равна:

$$v = \Delta_L^{t \partial_{ин}} \omega = \frac{\pi n R}{30}, \quad (6.15)$$

где n – частота колебаний пьезоэлемента.

Откуда $n = \frac{30 \Delta_L^{t \partial_{ин}} \omega}{\pi R}$ – частота вращения.

Или в окончательном виде, используя выражение (6.14), получим:

$$n = \frac{30 \omega}{\pi R} \frac{c_B}{c_B + c_L} DVm \operatorname{tg} \beta. \quad (6.16)$$

В Приложении 1 приведен код программы (на языке Delphi), реализующей данный расчет.

6.4. Расчет влияния элементов пьезоэлектрического привода на привносимый уровень загрязнения

Радиус фрикционного пятна контакта при упругом контакте определяется по формуле [62]:

$$b = 0,7(4pR R_{\max} (2R - R_{\max}) (1/E_1 + 1/E_2))^{1/2}, \text{ мм}; \quad (6.17)$$

где p – давление в контакте, Н/мм²; R, R_{\max} – параметры шероховатости, мм; E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов, Н/мм². Величина контактирующих напряжений σ_H , которые не должны превышать допускаемых σ_{HP} , определяется по формуле [22]:

$$\sigma_H = \frac{6pR_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi b^2} \leq \sigma_{HP}, \text{ Н/мм}; \quad (6.18)$$

Если это условие не выполняется, то радиус фрикционного пятна контакта b определяются из условия пластического контакта взаимодействия.

Радиус фрикционного пятна контакта b при пластическом контактном взаимодействии определяются по формуле:

$$b = 1.4 \sqrt{\frac{pR_{\max} (2R - R_{\max})}{H_\mu}}, \text{ мм}, \quad (6.19)$$

где H_μ – микротвердость.

При контактном взаимодействии двух различных материалов в расчёт принимается меньшая микро твёрдость H_μ .

Линейная интенсивность изнашивания определяется по формуле [22]:

$$J = \frac{\pi}{8} 10^{-7} \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \frac{b(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})}, \text{ мм}, \quad (6.20)$$

где f – коэффициент трения в контакте пар.

Расчёт линейной интенсивности изнашивания производится дважды, для каждого из контактирующих элементов – упругой пластины и выходного звена.

Объём изношенной частицы определяется по формуле:

$$W = \frac{\pi}{2} \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \left[b^2 + \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)^2}{3} \right], \text{ мм}^3. \quad (6.21)$$

Путь трения упругой пластины за весь цикл работы выходного звена пьезоэлектрического привода определяется по формуле:

$$L_{\text{упр}} = \pi (R_{\text{min}} + R_{\text{max}}), \text{ мм}. \quad (6.22)$$

Путь трения упругой пластины за весь цикл работы выходного звена определяется по формуле:

$$L_{\text{упр}} = \pi (R_{\text{min}} + R_{\text{max}}) n t, \quad (6.23)$$

где $R_{\text{min}}, R_{\text{max}}$ – минимальный и максимальный радиус расположения упругой пластины относительно оси вращения выходного звена, мм; n – частота вращения выходного звена, об/мин; t – время работы пьезоэлектрического привода, мин.

Толщина изношенного слоя упругой пластины определяется по формуле:

$$\Delta h_{\text{упр}} = J_{\text{упр}} L_{\text{упр}}, \text{ мм}. \quad (6.24)$$

Номинальная площадь трения для упругой пластины определяется по формуле:

$$S_{\text{упр}} = b_{\text{упр}} l_{\text{упр}}, \text{ мм}^2, \quad (6.25)$$

где $b_{\text{упр}}$ – ширина контакта упругой пластины, мм; $l_{\text{упр}}$ – длина упругой пластины, мм.

Объём изношенного материала упругой пластины определяется по формуле:

$$V_{\text{упр}} = \Delta h_{\text{упр}} S_{\text{упр}}, \text{ мм}^3. \quad (6.26)$$

Максимальное количество частиц износа, генерируемое упругой пластиной, определяется по формуле:

$$N_{\text{упр}}^{\text{макс}} = \frac{V_{\text{упр}}}{W_{\text{упр}}}, \quad (6.27)$$

Номинальное количество частиц износа, генерируемое упругой пластиной, определяется по формуле:

$$N_{\text{упр}}^{\text{ном}} = \frac{2bV_{\text{упр}}}{W_{\text{упр}}L_H}, \quad (6.28)$$

где b – радиус пятна контакта микронеровностей; L_H – номинальный путь трения, мм;

$$L_H = b_{\text{упр}}. \quad (6.29)$$

Максимальное количество частиц износа, генерируемое упругой пластиной в единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{\text{упр}}^{\text{макс(ед)}} = \frac{J_{\text{нун}} L_{\text{упр}}^{\text{ед}} S_{\text{упр}}}{W_{\text{упр}}}, \text{ 1/мин}, \quad (6.30)$$

где $L_{\text{упр}}^{\text{ед}}$ – путь трения упругой пластины в единицу времени, мм/мин.

$$L_{\text{упр}}^{\text{ед}} = \pi(R_{\text{мин}} + R_{\text{макс}})n, \text{ мм/мин}. \quad (6.31)$$

Номинальное количество частиц износа, генерируемое упругой пластиной в единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{\text{упр}}^{\text{ном}(e\delta)} = \frac{J_{\text{хуун}} L_{\text{упр}}^{e\delta} S_{\text{упр}}}{W_{\text{упр}}} \times \frac{2b}{L_{\text{н}}}, 1/\text{мин}. \quad (6.32)$$

Путь трения выходного звена пьезоэлектрического привода за один его оборот определяется по формуле:

$$L_{\text{вых1}} = Kb_{\text{упр}}, \text{ мм}. \quad (6.33)$$

Путь трения выходного звена за весь цикл работы пьезоэлектрического привода определяется по формуле:

$$L_{\text{вых}} = Kb_{\text{упр}}nt, \text{ мм}, \quad (6.34)$$

где n – частота вращения выходного звена, об/мин; t – время работы пьезоэлектрического привода, мин.

Толщина изношенного слоя выходного звена определяется по формуле:

$$\Delta h = J_{\text{вых}} L_{\text{вых}}, \text{ мм}. \quad (6.35)$$

Номинальная площадь трения для выходного звена определяется по формуле:

$$S_{\text{вых}} = \pi(R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2), \text{ мм}^2, \quad (6.36)$$

где $R_{\text{max}}, R_{\text{min}}$ – максимальный и минимальный радиус расположения упругой пластины относительно оси вращения выходного звена, мм.

Объём изношенного материала выходного звена определяется по формуле:

$$V_{\text{вых}} = \Delta h_{\text{вых}} S_{\text{вых}}, \text{ мм}^3. \quad (6.37)$$

Максимальное количество частиц износа, генерируемое выходным звеном, определяется по формуле:

$$N_{вых}^{макс} = \frac{V_{вых}}{W_{вых}}. \quad (6.38)$$

Номинальное количество частиц износа, генерируемое выходным звеном, определяется по формуле:

$$N_{вых}^{макс} = \frac{V_{вых}}{W_{вых}} \times \frac{2b}{L_H}, \quad (6.39)$$

где b – радиус пятна контакта микронеровностей; L_H – номинальный путь трения, мм; $L_H = b_{упр}$

Максимальное количество частиц износа, генерируемое выходным звеном в единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{вых}^{макс(ед)} = \frac{J_{нвых} L_{вых}^{ед} S_{вых}}{W_{вых}}, \text{ 1/мин}, \quad (6.40)$$

где $L_{вых}^{ед}$ – путь трения упругой пластины в единицу времени, мм/мин;

$$L_{вых}^{ед} = Kb_{упр}n, \text{ мм/мин}. \quad (6.41)$$

Номинальное количество частиц износа, генерируемое выходным звеном в единицу времени, определяется по формуле:

$$N_{вых}^{ном(ед)} = \frac{J_{нвых} L_{вых}^{ед} S_{вых}}{W_{вых}} \times \frac{2b}{L_H}, \text{ 1/мин}. \quad (6.42)$$

В Приложении 1 приведен код программы (на языке Delphi), реализующей данный расчет.

6.5. Расчет эффективного коэффициента трения в зоне контакта выходного звена и упругой пластины

Проблема повышения работоспособности пьезоэлектрического привода, работавшего в вакууме, связана с созданием таких условий его

работы, при которых коэффициент трения не увеличивается, а интенсивность изнашивания уменьшается.

Для оценки этих параметров выбрана модель поверхности трения в виде сферических сегментов, которая отражает изотропность трения в отличие от моделей поверхности трения в виде цилиндра или конуса, которые описывают анизотропные эффекты. В этих моделях нормальные напряжения на периферии (цилиндр) и в центре (конус) пятна контакта являются неопределенными.

При взаимодействии микронеровностей контактирующих поверхностей входного и выходного звеньев пьезоэлектрического привода в виброконтантном режиме возникает эффект снижения статического коэффициента трения до величины эффективного коэффициента трения.

Расчет эффективного коэффициента трения основан на следующих предположениях:

1. На тело действует статическая нормальная нагрузка $F_B^{стат}$, величина которой определяется $F_B^{стат} = c_B \Delta_B^{стат}$.

2. На тело действует динамическая нормальная нагрузка $F_B^{дин}$, величина которой определяется по формуле (6.12). Тогда, чтобы выходное звено пьезоэлектрического привода начало двигаться, необходима не сила $F_{mp}^0 = fF_B^{стат}$, как при отсутствии силы $F_B^{дин}$, а лишь сила $F_{mp}^\perp = f(F_B^{стат} - F_B^{дин})$, откуда

$$f^\perp = \frac{F_{mp}^\perp}{F_B^{стат}} = \frac{f(F_B^{стат} - F_B^{дин})}{F_B^{стат}} = f \left(1 - \frac{F_B^{дин}}{F_B^{стат}} \right), \quad (6.43)$$

$$f^\perp = f \left(1 - \frac{F_B^{дин}}{F_B^{стат}} \right). \quad (6.44)$$

В Приложении 1 приведен код программы (на языке Delphi), реализующей данный расчет.

6.6. Исследование динамических параметров пьезоэлектрического привода

Динамические параметры - время разгона, остановки и угол выбега определялись по схеме, показанной на рис.6.7.

Инерционный момент на валу пьезоэлектрического привода:

$$M_B^{ин} = I_B \frac{d\omega_B}{dt} = (I_p + I_M) \frac{d\omega_B}{dt}, \quad (6.45)$$

где I_p , I_M – моменты инерции ротора и маховой массы соответственно, Н·мм·с²; ω – угловая частота вращения вала, рад/с.

Время, в течении которого пьезоэлектрический привод разгонится, равно:

$$t_p = 0,105 \frac{I_B n_B}{M_{II} - M_B}, \quad (6.46)$$

где n_B – частота вращения вала электродвигателя, об/мин; M_{II} – пусковой момент, Н×мм; M_B – момент на валу, Н×мм.

Время остановки находится по формуле:

$$t_o = 0,105 \frac{I_B n_B}{M_B}, \quad (6.47)$$

Угол выбега двигателя можно определить экспериментально или теоретически по формуле:

$$\varphi_o = -\frac{M_B I_B}{B^2} + \frac{M_B I_B}{B^2} e^{-\frac{B}{I_B} t_o} + \frac{M_B}{B} t_o, \quad (6.48)$$

где B – коэффициент сопротивления в пьезоэлектрическом приводе.

Коэффициент сопротивления B равен:

$$B = B_{внешн} + B_{внутр}. \quad (6.49)$$

Здесь $B_{внешн}$ – коэффициент внешнего сопротивления, $B_{внутр}$ – коэффициент внутреннего сопротивления.

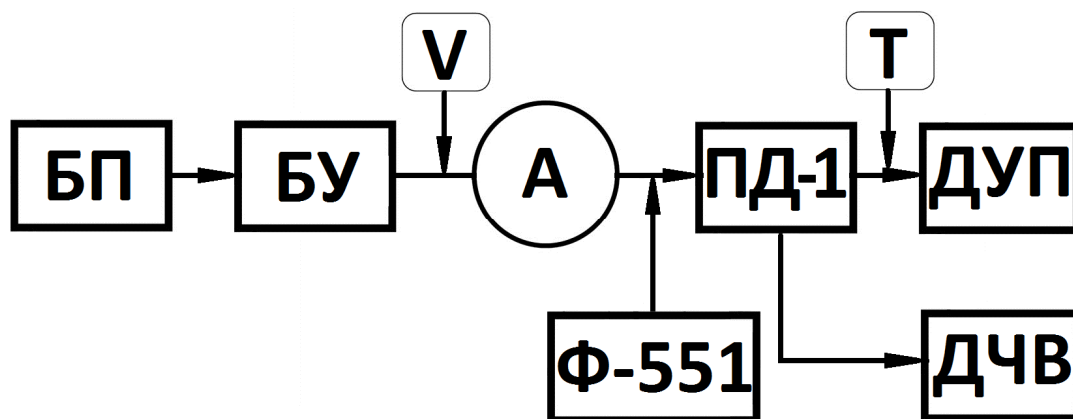


Рис. 6.7. Схема проведения динамических испытаний пьезоэлектрического привода: БП – блок питания 15 В; БУ – блок управления; V – вольтметр; А – амперметр; Ф-551 – частотомер; ПД-1 – пьезоэлектрический привод; Т – таймер; ДУП – датчик угла поворота; ДЧВ – датчик частоты вращения

Рассмотрим как определяется каждая из составляющих коэффициента сопротивления в отдельности.

Коэффициент внешнего сопротивления В определяется исходя из следующих соображений:

1. Диссипативный момент внешних сил равен моменту сопротивления в пьезоэлектрическом приводе.

2. Диссипативный момент внешних сил имеет предельное значение величина которого определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{дис}} &= M_{\text{сопр}}^{\text{max}} = B_{\text{внешн}} \omega_{\text{max}}; \\
 M_{\text{сопр}}^{\text{max}} &= M_B \frac{1 - \eta_{\text{эл}}}{\eta_{\text{эл}}}; \\
 B_{\text{внешн}} &= \frac{M_{\text{дис}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{M_B (1 - \eta_{\text{эл}})}{\eta_{\text{эл}} \omega_{\text{max}}},
 \end{aligned}
 \tag{6.50}$$

где ω_{max} – максимальная угловая скорость вращения валика пьезоэлектрического привода; $\eta_{\text{эл}}$ – к.п.д. пьезоэлектрического привода.

Коэффициент внутреннего трения можно принять равным нулю, т.к. отсутствуют детали, подверженные значительным деформациям.

Результаты экспериментальных исследований и расчетные данные, выполненные на их базе, были обработаны и сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Экспериментальные и расчетные данные динамических характеристик пьезоэлектрического привода

Частота подаваемых импульсов, Гц	Частота вращения вала, об/мин	Маховая масса на валу, кг	Время разгона, t_p , с	Время остановки, t_0 , с	Угол выбега, град
139400	480	0,01	0,03	0,015	0,5
135000	475	0,01	0,02	0,02	0,6
134500	460	0,01	0,025	0,02	0,7 .
138600	465	0,01	0,03	0,02	0,7
133000	450	0,01	0,03	0,018	0,7
66300	348	0,01	0,025	0,018	0,6
66400	349	0,01	0,025	0,015	0,5
66300	348	0,01	0,028	0,02	0,5
66200	350	0,01	0,03	0,02	0,6
6700	345	0,01	0,025	0,015	0,5

6.7. Исследование кинематических характеристик пьезоэлектрического привода

Существенное влияние на погрешность пьезоэлектрического привода оказывают радиальное и торцевое биение (рис.6.8), величины которых определялись индикатором часового типа (оптикатор) с ценой деления 0,1 мкм.

Принцип измерения кинематической погрешности заключался в следующем. Частота вращения валика пьезоэлектрического привода измерялась с помощью фотодатчиков, (рис.6.10), состоящих из фотодиодов ФД-2 и лампочек накаливания с последующим преобразованием сигнала по схеме триггера Шмидта с передачей их на частотомер типа Ф-551, считающий импульсы в течение 10 с. На валике передачи был установлен малоинерционный тахометрический диск диаметром 100 мм с радиальными щелями 0,5x20 мм. Чтобы показания частотомера отсчитывались непосредственно в числах оборотов в минуту, число щелей на дисках составляло шесть.

За этот же период времени, т.е. в течение 10 сек. производился подсчет количества импульсов подаваемых блоком питания на пьезоэлектрический привод. Подсчет можно проводить с помощью двух частотомеров. В этом случае точность выполнения экспериментальных исследований повышается. Синхронность работы частотомеров обеспечивалась с помощью синхронизатора. Общее количество импульсов, подаваемых на пьезоэлектрический привод, составляло $N_0 = 10f$, где f – количество импульсов за 1 с или частота. Угол поворота теоретически равен $\varphi_T = N_0 t_\varphi$ град., где t_φ – угловой шаг или угол поворота валика за один импульс.

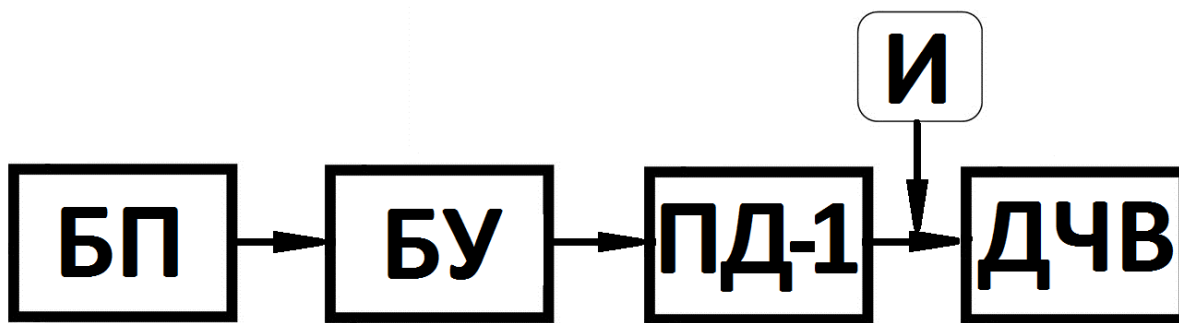


Рис. 6.8. Схема проведения экспериментальных исследований радиального и торцевого биений пьезоэлектрического привода: БП – блок питания 15В; БУ – блок управления; ПД-1 – пьезоэлектрический привод; И – индикатор с ценой деления 0,1 мкм; ДЧВ – датчик частоты вращения

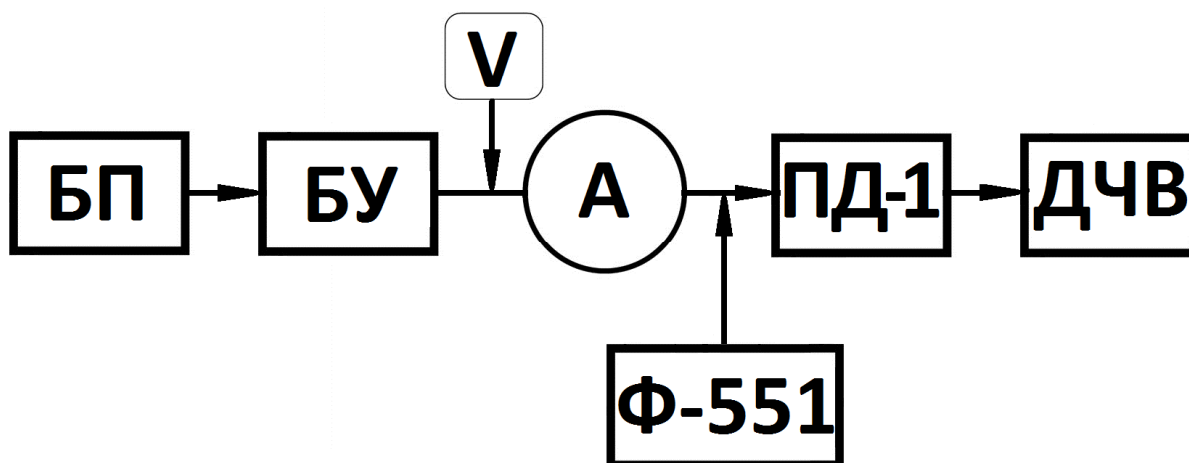


Рис. 6.9. Схема проведения кинематических испытаний пьезоэлектрического привода: БП – блок питания, 15 В; БУ – блок управления; V – вольтметр; А – амперметр; Ф-551 – частотомер; ПД-1 – пьезоэлектрический привод; ДЧВ – датчик частоты вращения

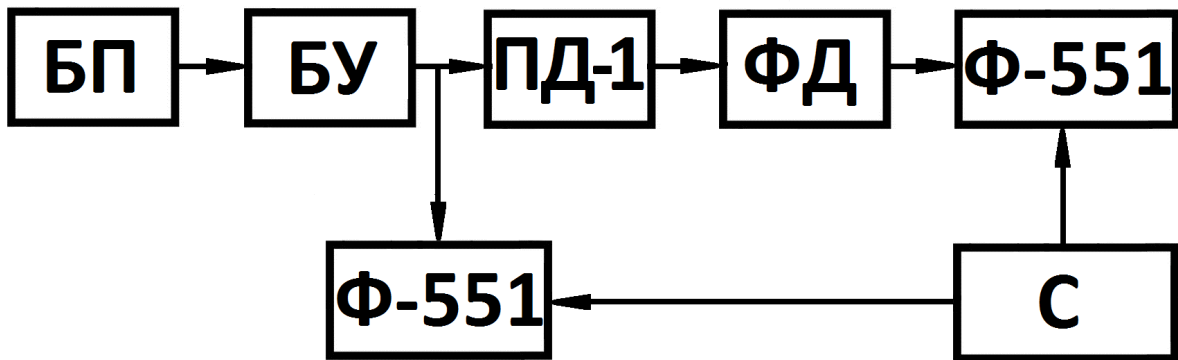


Рис. 6.10. Схема определения кинематической погрешности пьезоэлектрического привода: БП – блок питания; БУ – блок управления; ПД-1 – пьезоэлектрический привод; ФД – фотодатчик; Ф-551 – частотомер; С – синхронизатор

Реальный угол поворота валика пьезоэлектрического привода равен:

$$\varphi_{\text{э}} = 360^{\circ} N . \quad (6.51)$$

Рассогласованность абсолютная равна:

$$\Delta\varphi = \varphi_T - \varphi_{\text{э}} . \quad (6.52)$$

Рассогласованность относительная, т.е. приходящая на один угловой градус, равна:

$$\Delta\varphi_{\text{отн}} = \frac{\varphi_T - \varphi_{\text{э}}}{\varphi_T} . \quad (6.53)$$

Кинематическая погрешность $(\Delta\varphi^u)$, т.е. рассогласованность между теоретическим углом поворота t_{φ} за один импульс и экспериментальным углом поворота $\varphi_{\text{э}}^u$ за один импульс

равна $\Delta\varphi^u = t_{\varphi} - \varphi_{\text{э}}^u$, где $\varphi_{\text{э}}^u = \frac{\varphi_{\text{э}}}{N_o}$.

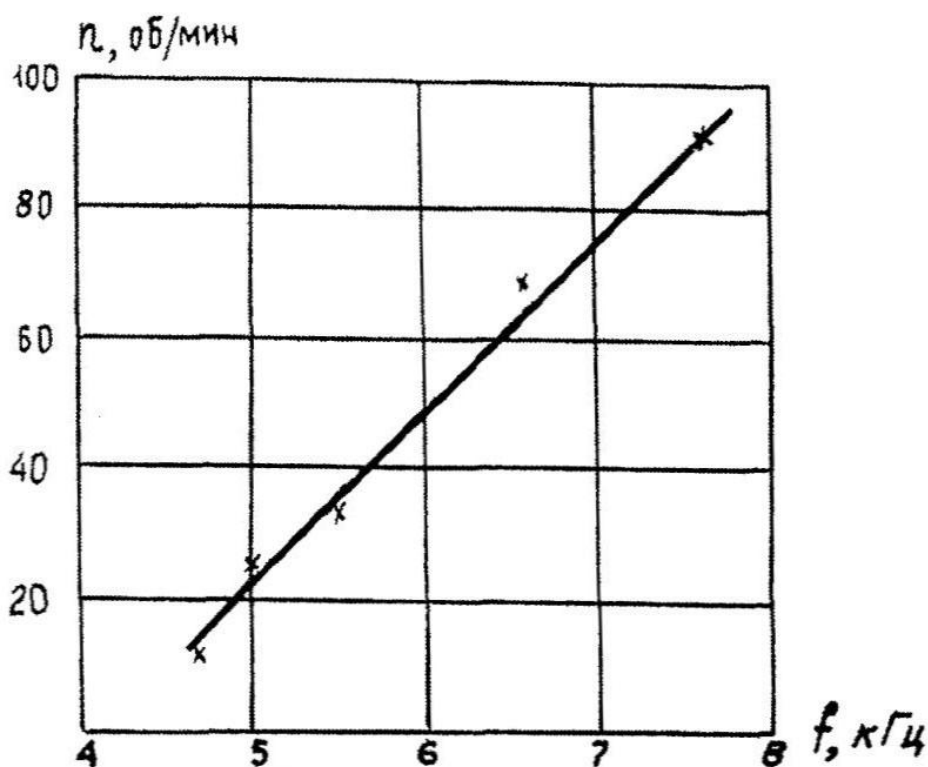


Рис. 6.11. Зависимость частоты вращения от частоты питающего напряжения

На базе выполненных теоретико-экспериментальных исследований можно сделать вывод: кинематическая погрешность пьезоэлектрического привода составляет не более 10^{-3} угл. град. и зависит от частоты подаваемого напряжения и маховой массы. Чем выше частота и меньше масса, тем ниже кинематическая погрешность, т.е. кинематическая точность.

6.8. Исследование силовых характеристик пьезоэлектрического привода

Силовые характеристики пьезоэлектрического привода исследовались на установке, структурная схема которой показана на рис. 6.12. Установка позволяет определять такие характеристики, как пусковой, номинальный и максимальный крутящие моменты.

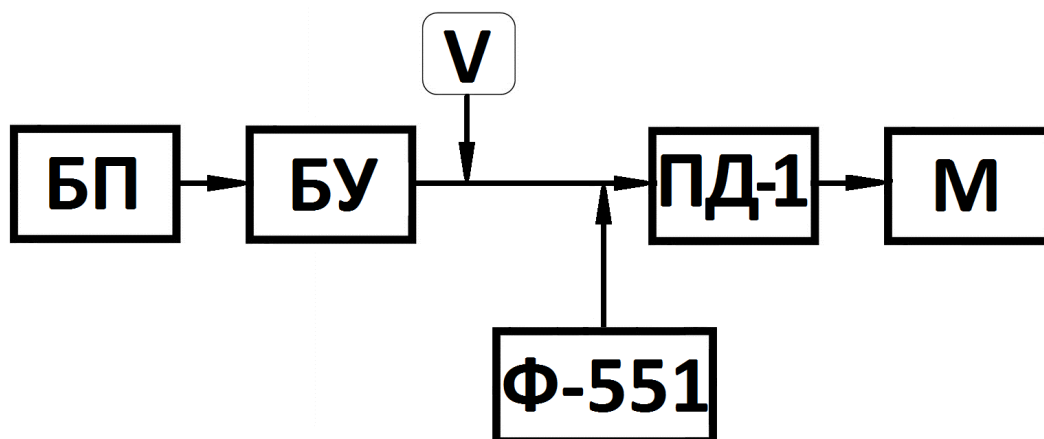


Рис. 6.12. Схема проведения испытаний по определению силовых характеристик пьезоэлектрического привода – пускового, номинального и максимального крутящего моментов: БП – блок питания; БУ – блок управления; V – вольтметр; Ф-551 – частотомер; ПД-1 – пьезоэлектрический привод; М – моментомер

Причем пусковой момент определяется из следующих соображений:

$$M_n = M_\epsilon + M_\epsilon^{ин} = M_\epsilon + I_\epsilon \frac{\omega_\epsilon}{t_p}, \quad (6.54)$$

где $I_\epsilon = I_p + I_m$ – моменты инерции ротора и маховой массы соответственно; t_p – время разгона, с; ω_ϵ – угловая частота вращения вала, рад/с; M_ϵ – крутящий момент на валу, Н·мм.

Пусковой и максимальный моменты могут быть также определены из следующих соображений:

$$\left. \begin{aligned} M_n &= 1,8M_H \\ M_M &= 1,3M_H \end{aligned} \right\}. \quad (6.55)$$

Здесь M_H – номинальный, M_M – максимальный моменты соответственно.

Результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Экспериментальные и расчетные данные силовых характеристик
пьезоэлектрического привода

Напряжение питания, В	Частота подаваемых импульсов, Гц	Частота вращения вала, об/мин	Пусковой момент, Н·мм	Ном. момент, Н·мм	Макс. момент, Н·мм
15	138500	470	1,5	1,0	1,3
	140000	475	1,7	1,1	1,4
	133000	456	1,6	1,05	1,3
	139600	459	1,5	1,0	1,25
	134800	460	1,6	1,05	1,4
20	66300	345	8,1	4,7	6,9
	65900	335	8,5	4,9	7,0
	65800	339	8,6	5,0	7,0
	66300	348	8,3	4,8	6,9
15	66400	345	16,1	8,7	13,6
	65800	335	16,5	8,9	14,0
	66300	345	17,0	9,0	14,0
	66100	351	15,1	8,8	13,8
	65900	341	16,9	8,6	13,6

Получена также частотно-силовая характеристика пьезоэлектрического привода, показанная на рис. 6.13. и рис. 6.14. Режим работы - квазинепрерывный.

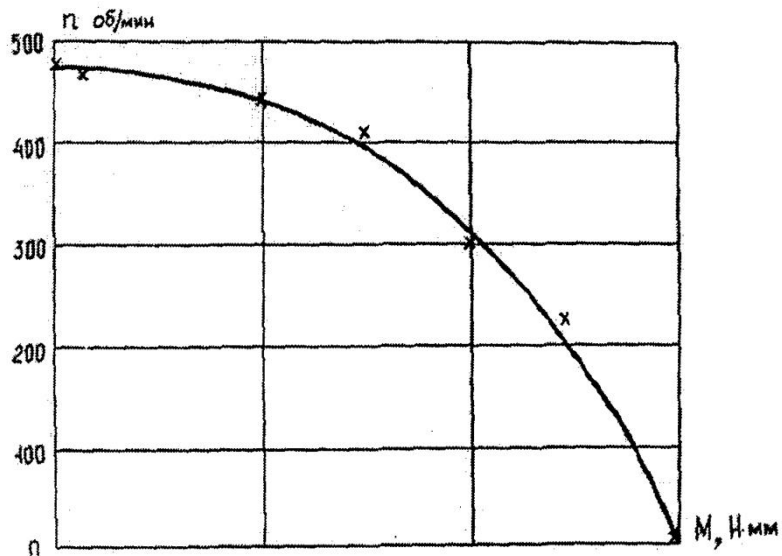


Рис. 6.13. Механическая характеристика пьезоэлектрического привода (до регулировки): n – частота вращения вала, об/мин; M – передаваемый крутящий момент, Н·мм

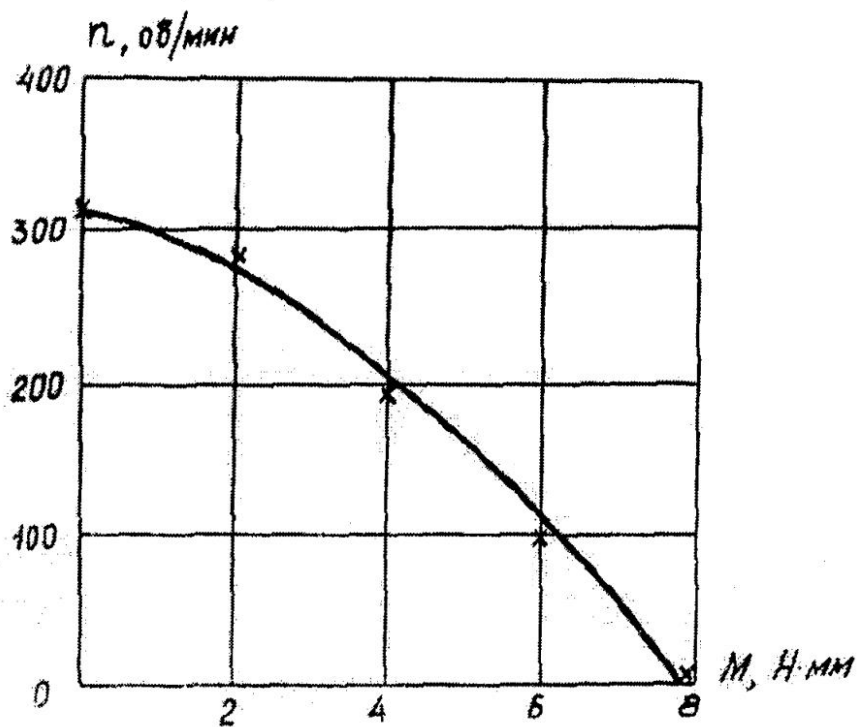


Рис. 6.14. Механическая характеристика пьезоэлектрического привода (после регулировки): n – частота вращения вала, об/мин; M – передаваемый крутящий момент, Н·мм

6.9. Установка для исследования работоспособности пьезоэлектрического привода в вакууме

Для проведения исследований пьезоэлектрического привода в вакууме была спроектирована и изготовлена специальная вакуумная установка (рис.6.15).

Она состоит из камеры, внутри которой установлен пьезоэлектрический привод.

Частота вращения валика пьезоэлектрического привода ω измеряется с помощью фотодатчика, выполненного в виде фотодиода ФД-2 и лампочки накаливания с последующим преобразованием сигналов по схеме триггера Шмидта с передачей их на частотомер типа Ф-551А, считающий импульсы в течении 10 с. Фотодатчик расположен внутри вакуумной камеры и крепится к корпусу испытательной оснастки.

На валик пьезоэлектрического привода устанавливается тахометрический диск диаметром 50 мм, с радиальными щелями 0,5x10мм. Чтобы показания частотомера считались непосредственно в числах оборотов в минуту, число щелей на дисках равно 6, 60, 600 и т.д. При испытаниях использовались таходиски с числом щелей – 60.

Средствами создания высокого вакуума являются механический насос РВН-20 и диффузионный насос Н-500 с азотной ловушкой, которая значительно снижает миграцию паров масла в рабочий объем.

Следует отметить, что при вакуумных исследованиях работоспособности диффузионные методы откачки получили наиболее широкое распространение. Существенным их недостатком является миграция паров масла и продуктов его крекинга в вакуумный объем. Однако эта миграция может быть уменьшена соответствующими ловушками.

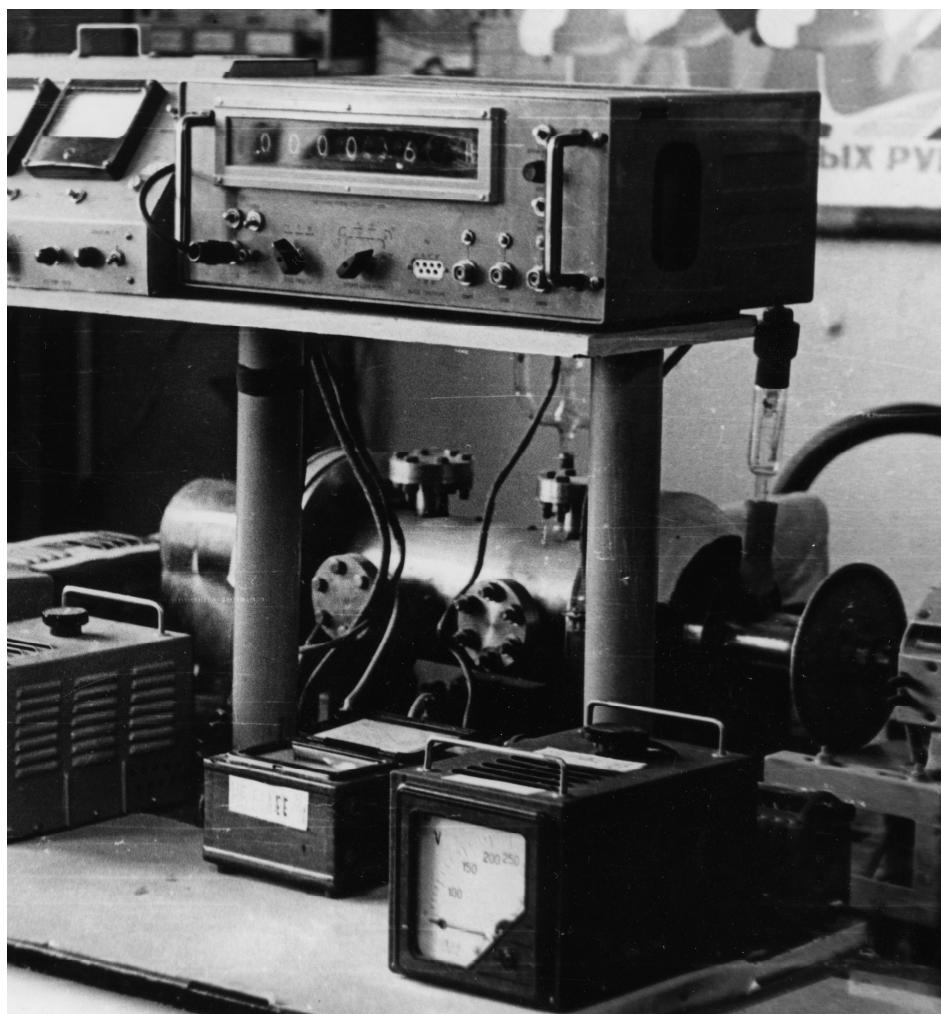


Рис. 6.15. Вакуумная установка для исследования пьезоэлектрического привода

6.10. Результаты экспериментальных исследований

Испытанию подвергался пьезоэлектрический привод с упругими пластинами, на которые наносились различные твердосмазочные покрытия (ТСП). Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6.16. Выходное звено пьезоэлектрический привод выполнено из стали 45 с различными ТСП. Зависимости абсолютного износа выходного звена пьезоэлектрический привод представлены на рис. 6.17.

Детальями пьезоэлектрического привода, которые в наибольшей степени подвергаются износу, являются упругие пластины и выходное звено привода. Для уменьшения скорости изнашивания взаимодействующих между собой элементов на них наносились различные композиции ТСП.

По результатам проведенных экспериментов самым оптимальным ТСП является композиция состоящая из дисульфида молибдена (MoS_2), бария (В) и связующего – эпоксидной смолы (ЭС).

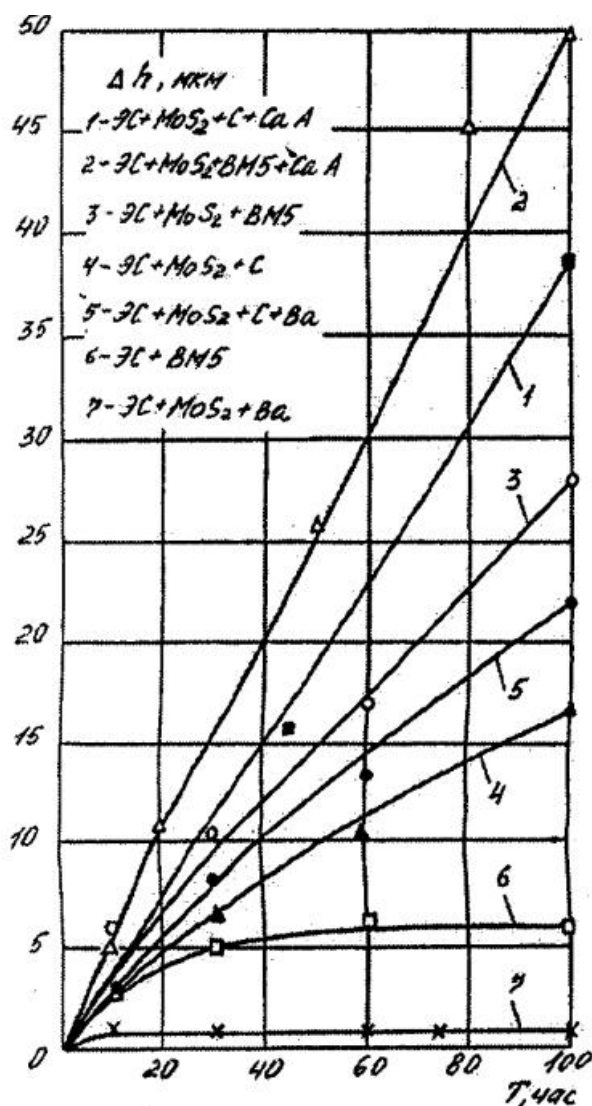


Рис. 6.16. Зависимость абсолютного износа ТСП упругой пластины от времени работы пьезопривода (Материал упругой пластины – гетинакс)

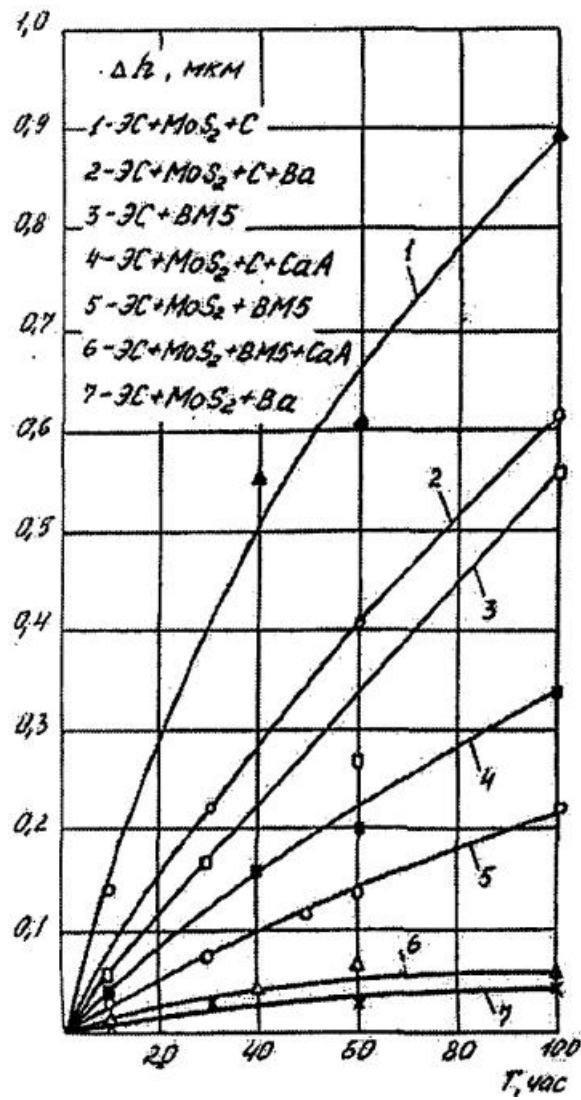


Рис. 6.17. Зависимость абсолютного износа ТСП выходного звена пьезоэлектрического привода от времени работы (Материал выходного звена – сталь 45)

ГЛАВА 6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗО- И МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

6.1. Технические решения функциональных систем и устройств на основе пьезоприводов

6.1.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений

В основу разработки положена задача обеспечения одновременной реализации нанотехнологических процессов по трём координатным направлениям.

Стереометрическое устройство для наноперемещений (рис. 7.1) содержит основной пьезопривод 1 и три дополнительных 2, 3, 4. На основном пьезоприводе 1 и двух дополнительных пьезоприводах 2, 3 жёстко закреплены зонды 4, 5, 6. Основной пьезопривод 1 и два дополнительных пьезопривода 2 и 3, расположены по координатным осям X , Y , Z , с возможностью независимой подачи напряжения на каждый из них, от блока питания 7.

Дополнительный пьезопривод 8 установлен соосно с основным пьезоприводом 1, с возможностью поступательного и вращательного перемещения относительно координатной оси X .

Стереометрическое устройство для наноперемещения работает следующим образом. При подаче напряжения от блока питания 7 на пьезоприводы 1, 2, 3 происходит их независимое перемещение вдоль координатных осей X , Y , Z соответственно. При подаче напряжения от

блока питания 7 на пьезопровод 8 происходит его независимое перемещение вдоль координатной оси X , а также и вращение вокруг координатной оси X .

Применение предложенного стереометрического устройства для наноперемещения обеспечивает одновременную реализацию нанотехнологических процессов по всем трём координатным направлениям.

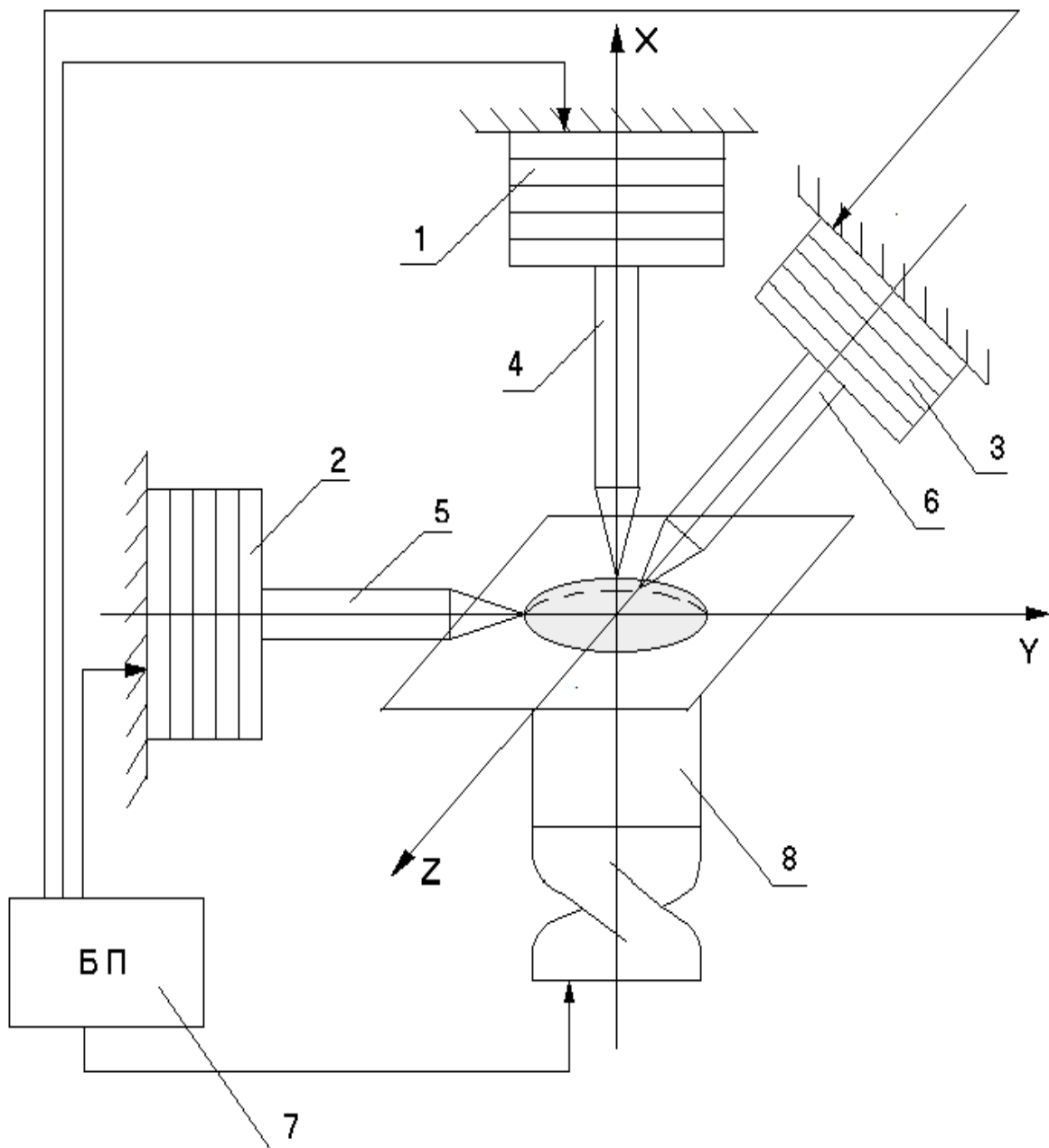


Рис. 7.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений

6.1.2. Зондовое устройство для нанотехнологии

Зондовое устройство для нанотехнологии (рис. 7.2) содержит металлический зонд 1, жёстко закреплённый на торце 2 пьезоэлектрического привода 3. Металлический зонд 1 выполнен в виде тонких металлических игл 4 диаметром d_n , изолированных друг от друга посредством диэлектрического материала 5. Каждая тонкая металлическая игла 4 связана с системой подачи потенциала 6. Расстояние между иглами 6 по осям составляет не менее $0,2 \div 0,4$ мм.

При подаче напряжения на пьезопривод 3 происходит одновременное вертикальное перемещение тонких металлических игл 4, изолированных друг от друга диэлектрическим материалом 5, предотвращающим электрический контакт между иглами 4. Иглы расположены на предельно близком расстоянии друг от друга – $0,2 \div 0,4$ мм. При этом на каждую тонкую металлическую иглу 4 подаётся напряжение от системы подачи потенциала 6. При наличии такого напряжения на зондовом устройстве реализуется необходимая аналитико-технологическая операция на подложке (на рис. 7.2 условно не показана).

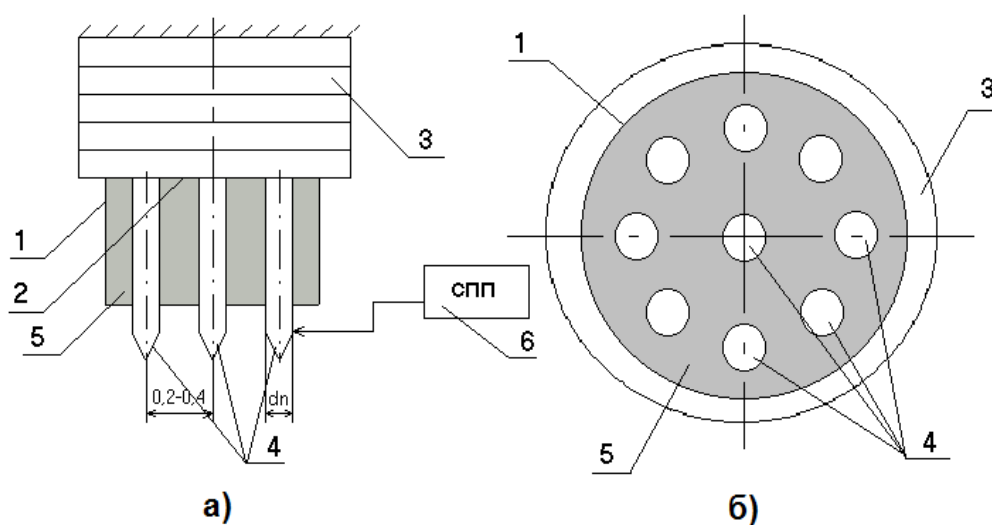


Рис. 7.2. Зондовое устройство для нанотехнологии

Применение предлагаемого зондового устройства для нанотехнологии позволяет одновременно зондировать несколько точек, расположенных на близком расстоянии друг от друга.

6.1.3. Пьезопривод для нанотехнологии

В основу разработки положена задача обеспечить возможность проведения двухстороннего одновременного зондирования закреплённой подложки.

Пьезопривод для нанотехнологии (рис. 7.3) содержит блок питания 1, связанный с тремя пьезомодулями 2, 3, 4 последовательно соединёнными между собой таким образом, что оси пьезомодулей расположены по координатным осям X , Y , Z . Основной зонд 5 жёстко закреплён на пьезомодуле 4. Пьезомодуль 6 связан с блоком питания 1 и закреплён на П-образном элементе 7.

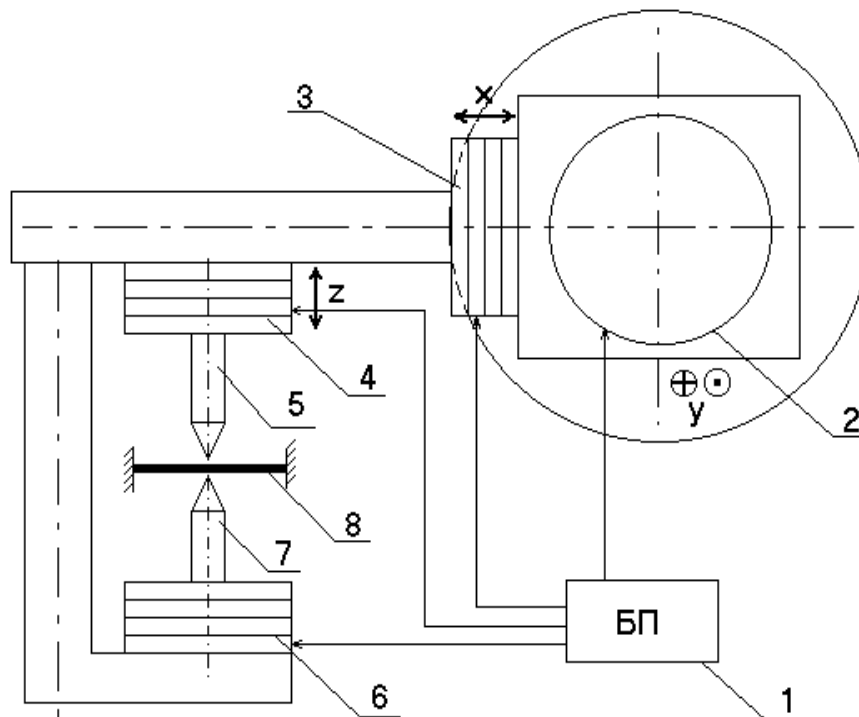


Рис. 7.3. Пьезопривод для нанотехнологии

На пьезомодуле 6 жёстко закреплён дополнительный зонд 8. Зонды 5 и 8 установлены соосно и направлены навстречу друг другу, обеспечивая возможность проведения двухстороннего одновременного зондирования закреплённой подложки 9.

При подаче напряжения от блока питания 1 на пьезомодуль 2 происходит его независимое перемещение вдоль оси Y . При подачи напряжения от блока питания 1 на пьезомодуль 3 происходит его независимое перемещение вдоль оси X . При подаче напряжения от блока питания 1 на пьезомодули 4 и 6 происходит их независимое перемещение вдоль оси Z , таким образом, что зонды 5 и 8, закреплённые на пьезомодулях 4 и 6, перемещаются навстречу друг другу и к поверхности подложки 9.

6.1.4. Нанотехнологическое устройство перемещения

Нанотехнологическое устройство перемещения (рис. 7.4) состоит из неподвижного основания 1 и установленного на нём трёхкоординатного пьезопривода 2, связанного с зондом 3. Данный зонд электрически связан с подложкой 4, установленной на подложкодержателе 5, который закреплён на неподвижном основании 6. Трёхкоординатный пьезопривод 2 связан с зондом 3 посредством кантиливера 7. Зонд 3 выполнен составным, причём цилиндрическая часть зонда сделана из магнитномягкого материала 8, а острие из электропроводящего материала. Подложкодержатель выполнен с возможностью контактного взаимодействия только по периферии подложки.

Устройство дополнительно снабжено электромагнитом 9, установленным соосно с зондом на противоположной от него стороне подложки 4 на вспомогательном трёхкоординатном пьезоприводе 10.

Пьезопривод 10 установлен на дополнительном основании 11 которое жёстко связано с основным 1.

Нанотехнологическое устройство перемещения функционирует следующим образом. Трёхкоординатный пьезопривод 2, при подаче на него напряжения, обеспечивает требуемое перемещение связанного с ним зонда 3 посредством кантиливера 7. Так как устройство дополнительно снабжено электромагнитом 9, установленным соосно с зондом на противоположной от него стороне подложки 4, зонд перемещается под действием магнитных сил к подложке 4. При подачи напряжения на вспомогательный трёхкоординатный пьезопривод 10, происходит перемещение электромагнита 9.

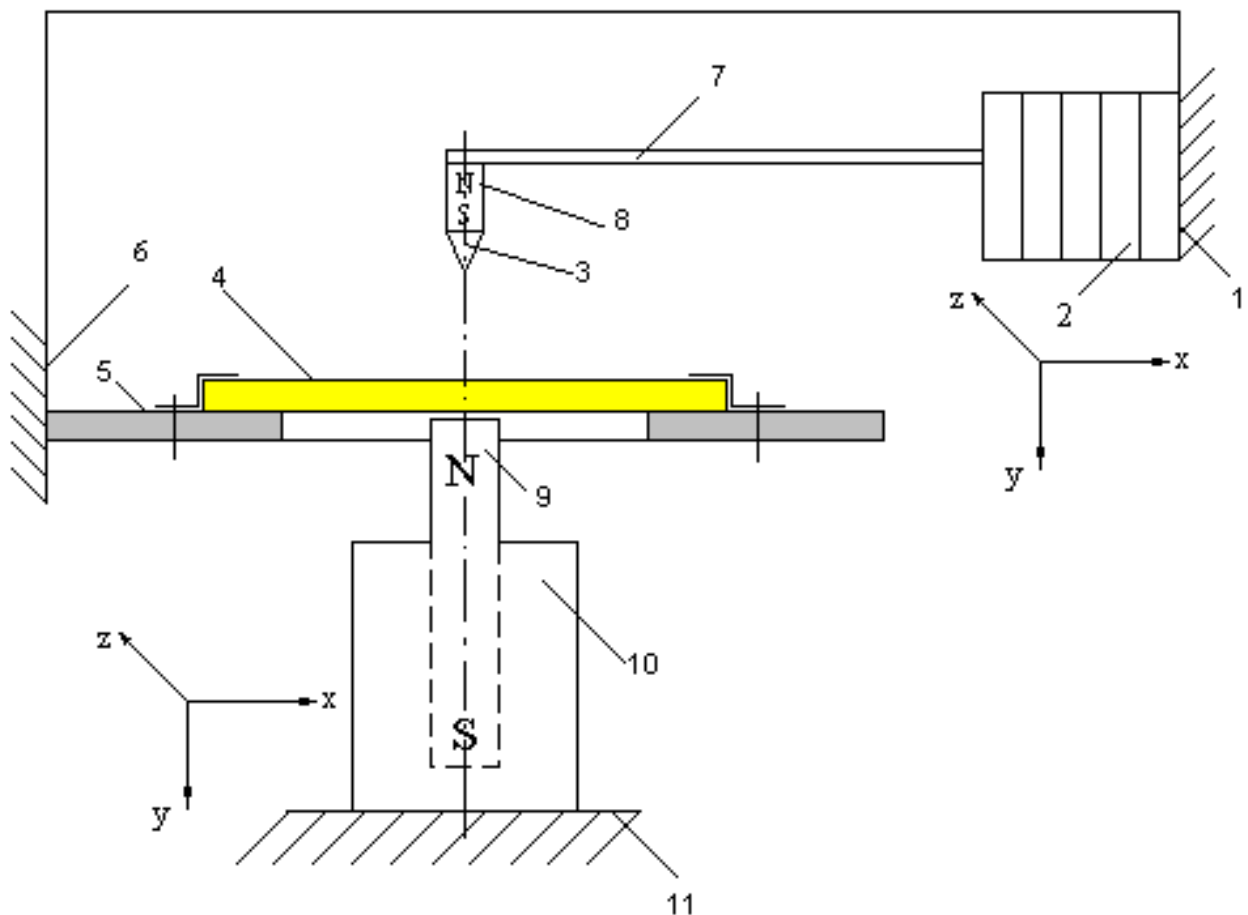


Рис. 7.4. Нанотехнологическое устройство перемещения

Применение в нанотехнологическом устройстве перемещения дополнительного электромагнита, установленного соосно с зондом на противоположной от него стороне подложки на вспомогательном трёхкоординатном пьезоприводе, позволяет уменьшить температуру в зазоре зонд-подложка. Это приводит значительному уменьшению дрейфовых явлений.

6.1.5. Технологическое устройство для наноперемещения изделия

Технологическое устройство для наноперемещений изделия (рис. 7.5) включает в себя неподвижную направляющую 1, стол 2 и пьезоэлектрические преобразователи 3, жестко связанные с неподвижной направляющей 1.

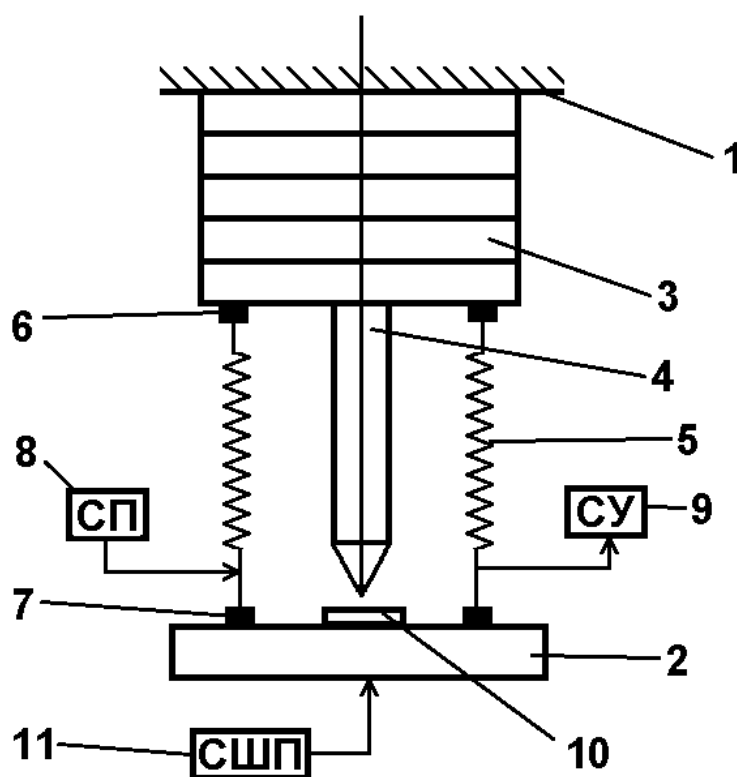


Рис. 7.5. Технологическое устройство для наноперемещения изделий

На пьезоэлектрических преобразователях закреплен зонд 4. Между неподвижной направляющей 1 и столом 2 герметично установлен диэлектрический сильфон 5, с помощью уплотнений 6, 7. Технологическое устройство для наноперемещений изделия снабжено также системами 8, 9 подачи внутрь диэлектрического сильфона 5 и удаления из него рабочей жидкости или газа.

На столе 2 установлена подложка 10 с возможностью электрического взаимодействия с зондом 4. Стол 2 снабжен системой шестикоординатных перемещений 11, выполненной по структуре 1-координат.

Технологическое устройство для наноперемещений изделия функционирует следующим образом.

При перемещении стола 2 по шести координатам с помощью системы шестикоординатных перемещений 11 происходит установка подложки 10 напротив зонда 4 и герметизация пространства в котором расположены подложка 10 и зонд 4 с помощью диэлектрического сильфона 5 и уплотнений 6, 7. Внутри это пространство подается рабочий газ или жидкость с помощью системы подачи 8, а при необходимости удаляется из этого пространства с помощью системы 9 удаления рабочего газа или жидкости.

Применение предлагаемого технологического устройства для наноперемещений изделия обеспечивает возможность его работы в заданной токопроводящей рабочей среде, в качестве которой используется жидкость или газ.

6.1.6. Устройство для регистрации отклонения острия зонда

Устройство для регистрации отклонения острия зонда (рис. 7.6), содержащее прецизионный измеритель перемещений 1 связанный с

зондом 2. Прецизионный измеритель перемещений 1 выполнен в виде кварцевого резонатора, жестко связанного с зондом 2 и установленного соосно с ним. Устройство снабжено датчиком разности частот 3, электрически связанным с прецизионным измерителем перемещений 1. Зонд 2 установлен с возможностью бесконтактного взаимодействия с подложкой 4 закрепленной на основании 5.

Устройство регистрации отклонения острия зонда работает следующим образом.

Под действием сил электростатического и межатомного взаимодействия острие зонда 2 перемещается в вертикальном направлении и воздействует на прецизионный измеритель перемещений 1. В результате этого взаимодействия изменяется частота колебаний кварцевого резонатора. Датчик разности частот 3 регистрирует разность частот колебаний кварцевого резонатора до и после возникновения электростатических и межатомных взаимодействий между остриём зонда 2

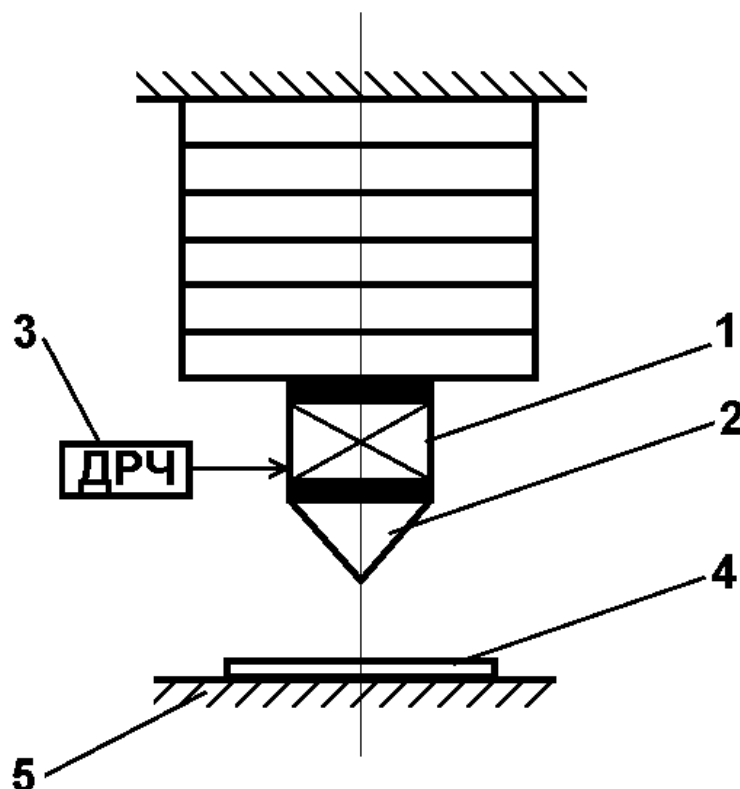


Рис. 7.6. Устройство для регистрации отклонения острия зонда

и исследуемой поверхностью 4.

Применение предложенного устройства позволяет повысить чувствительность при измерении величины отклонения острия зонда.

6.1.7. Устройство перемещения для нанотехнологии

Устройство перемещения для нанотехнологий (рис. 7.7) содержит основной пьезопривод 1, жестко связанный с неподвижным основанием 2 и подложку 3, установленную на подвижном столе 4. На основном пьезоприводе 1 установлены дополнительные 5, жестко связанные с основным 1 по средствам параллельных торсионов 6. С каждым дополнительным пьезоприводом 5, связан зонд 7. Все дополнительные пьезоприводы 5 расположены в пространстве с возможностью отдельной и независимой подачи на них напряжения от блока питания 8. При этом дополнительные пьезоприводы 5 «не мешают» друг другу: контактное взаимодействие между соседними дополнительными пьезоприводами 5, зондами 7 и торсионами отсутствует.

Каждый торсион 6, жестко связанный с ним дополнительный пьезопривод 5 и связанный с этим пьезоприводом 5 зонд 7 расположены на одной оси. Количество пьезоприводов 5 не ограничено.

Устройство перемещения для нанотехнологий работает следующим образом. При передаче напряжения на основной пьезопривод 1 происходит синхронное перемещение всех пяти дополнительных пьезоприводов 5.

Настройка каждого зонда 7 на неровную поверхность подложки 3 обеспечивается подачей напряжений на каждый дополнительный пьезопривод 5 от блока питания 8.

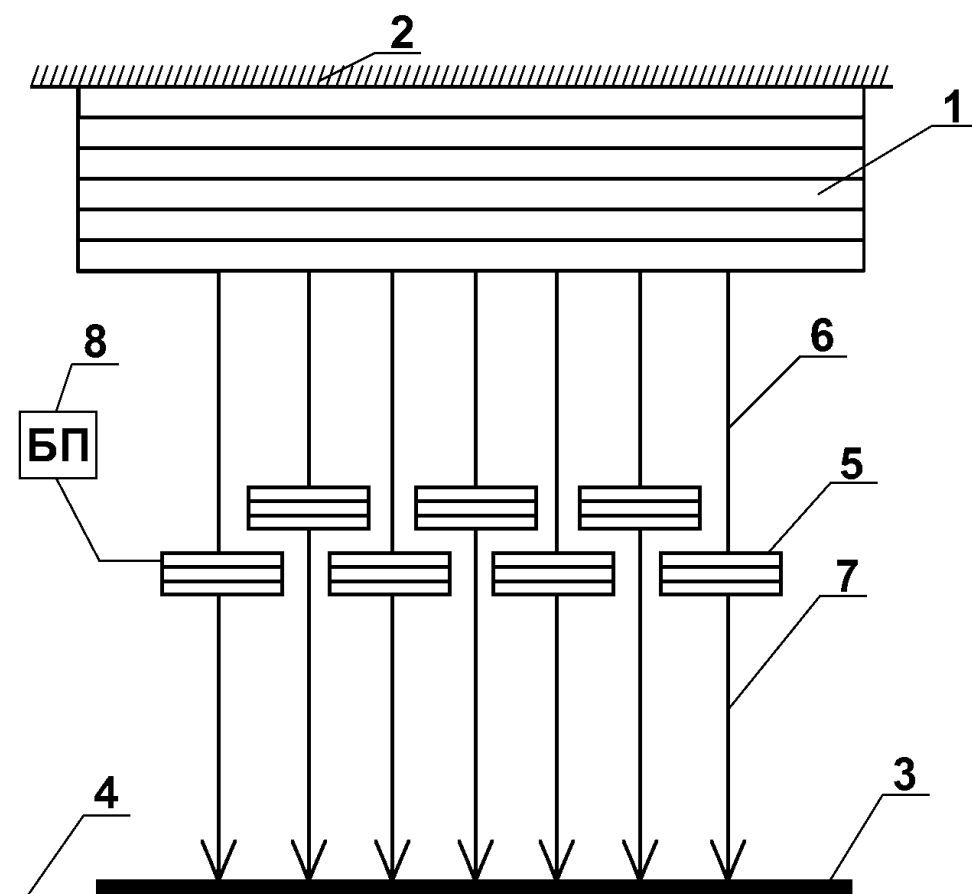


Рис. 7.7. Устройство перемещения для нанотехнологий

Применение предложенного устройства перемещения для нанотехнологий позволяет одновременно и независимо зондировать несколько точек на поверхности подложки, расположенных на близком расстоянии друг от друга, при выполнении различных нанотехнологических операций.

6.1.8. Устройство для получения наноструктур на подложке

Устройство для получения наноструктур на подложке (рис. 7.8) содержит пьезопривод 1, жестко связанный с зондом 2 и неподвижной направляющей 3, подложку 4, установленную на столе 5. На зонде 2

жестко установлена фокусирующая втулка 6, имеющая потенциал того же знака что и зонд 2. Втулка 6 электрически изолирована от зонда 2 и подложки 4 изоляторами 7,8. Внутренний диаметр втулки 6 составляет 1,5-2 диаметра зонда 2, наружный - 35 диаметров зонда 2, а вылет острия 9 зонда 2 относительно торца 10 втулки 6 равен 0,5-1 мкм. Устройство дополнительно снабжено блоком питания 11 для подачи потенциала на фокусирующую втулку 6.

Устройство для получения наноструктур на подложке работает следующим образом.

С помощью пьезопривода 1 осуществляется перемещение зонда 2, а с помощью стола 5 перемещение подложки 4, относительно зонда 2 (привод перемещения подложки 4 на рис. 7.8 условно не показан).

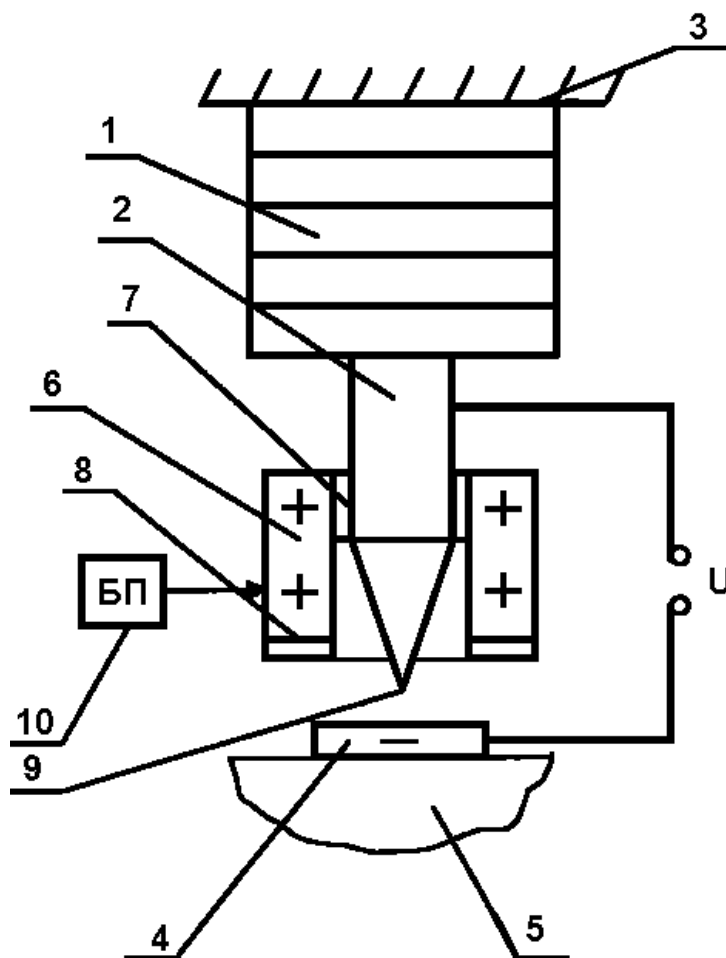


Рис. 7.8. Устройство для получения наноструктур на подложке

Зонд 2 имеет положительный потенциал, подложка 4 – отрицательный. На фокусирующую втулку 6 через блок питания 11 также подается положительный потенциал. В результате чего ионный луч от острия 9 зонда 2 к подложке 4 становится остро сфокусированным независимо от изношенности острия 9 зонда 2 и образованных на нем вискеро́в.

Применение предложенного устройства для получения наноструктур на подложке позволяет фокусировать ионный луч и тем самым обеспечивать более точную обработку поверхности подложки независимо от изношенности острия зонда.

6.1.9. Устройство наноперемещений на основе биморфных пьезоманипуляторов

Устройство наноперемещений (рис. 7.9) содержит пьезопривод 1, жёстко закреплённый на неподвижной платформе 2 и зонд 3 связанный с пьезоприводом 1. Пьезопривод 1 выполнен в виде пластин-биморфов 4, связанных между собой концами 5 и 6, причём к свободному концу 7 нижней пластины 8 прикреплён зонд 3, а общее количество пластин-биморфов – четыре.

Устройство наноперемещений работает следующим образом. При подаче напряжения на пластины-биморфы 4 происходит их изгиб. При изгибе одной пластины реализуется нелинейное перемещение зонда 3, а при изгибе второй пластины происходит так же нелинейно перемещение зонда 3, но в другую сторону. Таким образом два нелинейных перемещения в противоположенные стороны в сумме обеспечивают линейное перемещение зонда 3 в вертикальной плоскости. Суммарное линейное перемещение зонда 3 обеспечивается при наличии пластин-биморфов 4 одинаковой жёсткости. Регулируя напряжение подаваемое на

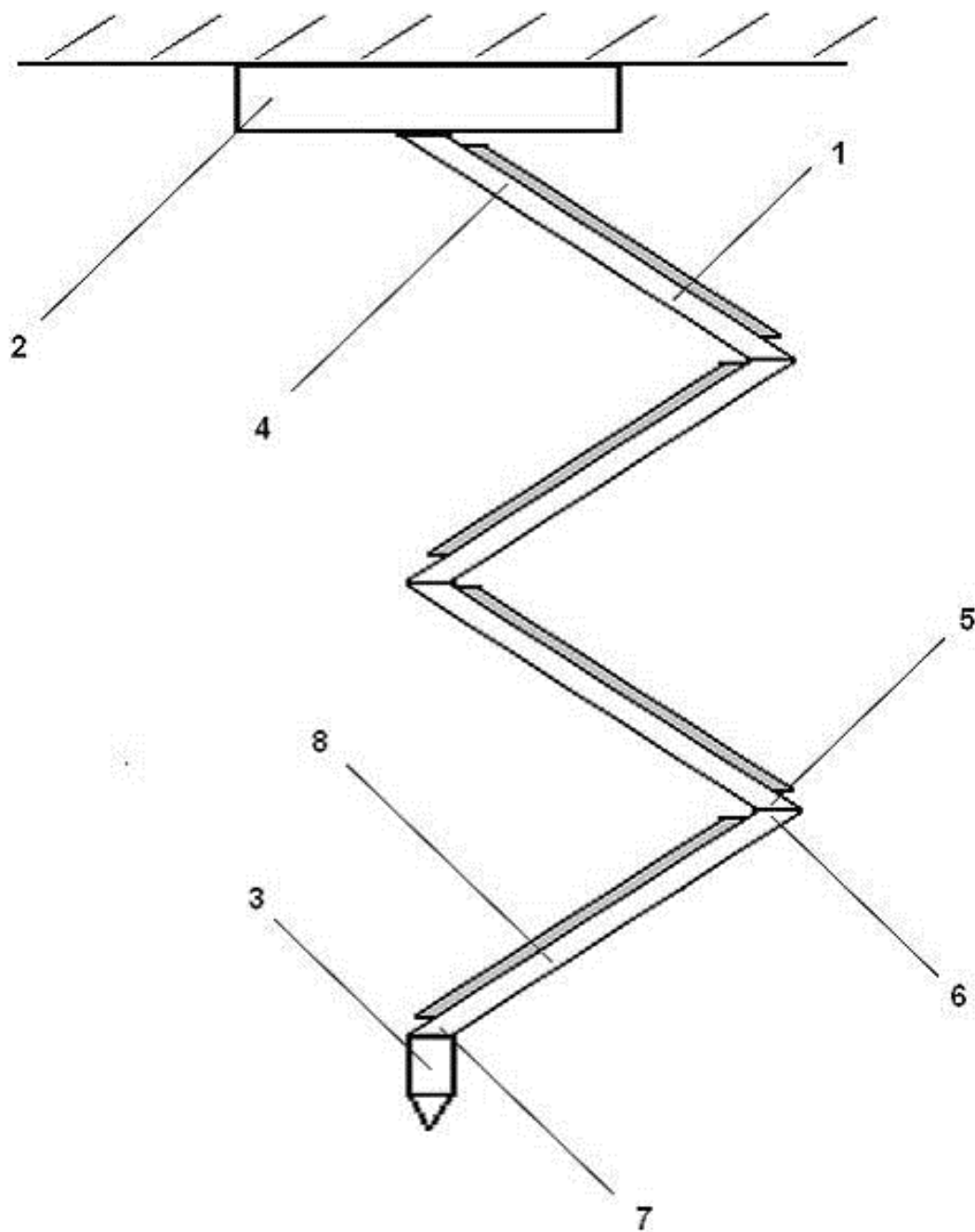


Рис. 7.9. Принципиальная схема устройства наноперемещений

пластины-биморфы 4 можно регулировать линейное перемещение зонда 3 в достаточно широких пределах.

Устройство наноперемещений выполнено в виде чётного числа пластин-биморфов и позволяет повысить диапазон перемещений при сохранении прямолинейного характера движения зонда.

6.1.10. Технологическое устройство метрологического обеспечения нанотехнологии

В основу разработки положена задача обеспечения возможности регулирования ширины полосы сканирования подложки в пределах $3 \div 9 \text{ \AA}$.

Технологическое устройство метрологического обеспечения нанотехнологии (рис. 7.10) содержит неподвижную направляющую 1, стол 2 с подложкой 3, пьезопривод 4 жестко связанный с направляющей, переходник 5 между пьезоприводом и биморфами, основной зонд 6, биморфы 7 и дополнительный зонд 8.

При прикладывании рабочего напряжения между зондами 6 и 8 возникает туннельный ток, вследствие испускания электронов одним из зондов под действием внешнего электрического поля высокой напряженности. При приближении зондов 6 и 8 к подложке 3 до расстояния действия межатомных электростатических сил, электроны, вышедшие из зазора между зондами, отклоняются под действием электростатического поля. Вследствие этого изменяется сопротивление в цепи зонда, которое фиксируется прецизионным измерителем тока. При подаче напряжения на биморфы 7, происходит их деформация и, как следствие, изменение расстояния между зондами, что позволяет регулировать ширину области сканирования подложки 3.

Применение предлагаемого технологического устройства метрологического обеспечения нанотехнологии позволяет проводить измерения на диэлектрической подложке с изменяемой шириной полосы сканирования в пределах $3 \div 9 \text{ \AA}$, используя систему основного и дополнительного зондов с туннельным зазором между ними.

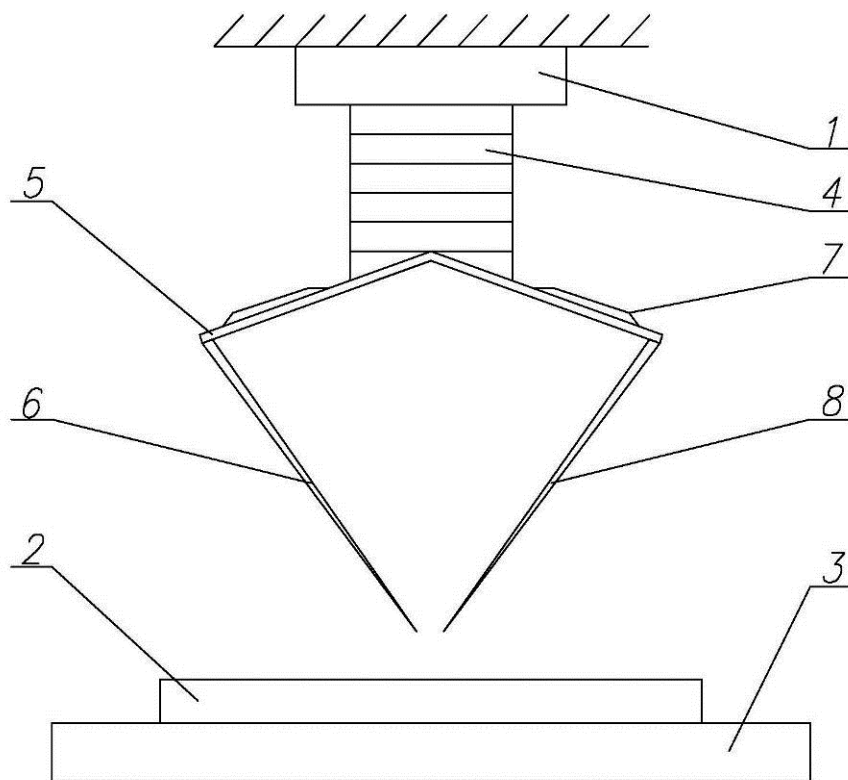


Рис. 7.10. Принципиальная схема технологического устройства метрологического обеспечения нанотехнологии

6.1.11. Система перемещения с охлаждаемыми пьезоэлементами

Система перемещений для нанотехнологии (рис. 7.11) содержит пьезопривод 1, выполненный в виде пьезокерамических дисков 2, между которыми расположены металлические пластины 3 и зонд 4, жестко связанный с пьезоприводом 1. В пьезокерамических дисках 2 и металлических пластинах 3 выполнены осевые отверстия 5, образующие полости 6, 7, 8, а в первом 9 и последнем 10 пьезокерамических дисках 2 выполнены входное 11, выходное 12 радиальные отверстия и соединительные отверстия 13. Система дополнительно снабжена устройством 14 подачи хладагента 15 в полости пьезопривода 1. В качестве хладагента может использоваться жидкий гелий или азот.

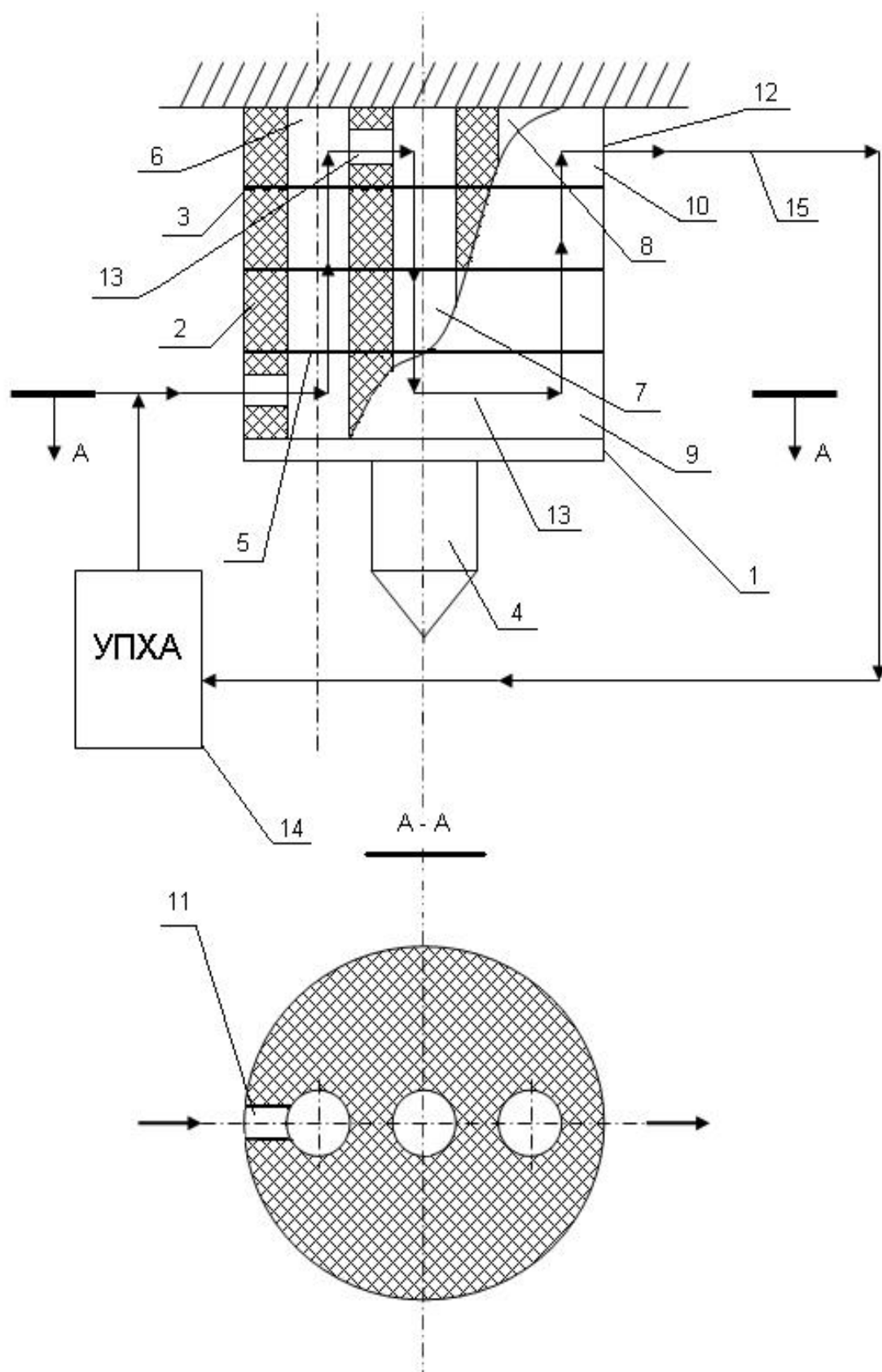


Рис. 7.11. Система перемещений с охлаждаемыми пьезоэлементами

При подаче на металлические пластины 3 рабочего напряжения пьезопривод 1 начинает перемещать зонд 4. При работе пьезопривода 1, из устройства 14 подачи хладагента 15, через входное радиальное отверстие 11, хладагент 15 поступает в первый пьезокерамический диск 9, а затем через осевые отверстия 5, полости 6, 7, 8 и соединительные отверстия 13 хладагент 15 перемещается по пьезоприводу 1. Через выходное радиальное отверстие 12 хладагент 15 из пьезопривода 1 поступает обратно в устройство подачи хладагента 14. Таким образом осуществляется охлаждение пьезопривода 1, что повышает точность его перемещения.

Применение предлагаемой системы перемещений для нанотехнологии позволяет увеличить точность перемещения пьезопривода за счет охлаждения пьезокерамических дисков и уменьшения их произвольных перемещений.

Представленные в настоящем разделе технические решения защищены Патентами Российской Федерации [28÷42].

6.1.12. Вакуумный пьезопривод для нанотехнологии

Вакуумный пьезопривод для нанотехнологии (рис.7.12) содержит корпус 1, соосно расположенные внутри корпуса 1 цилиндрический кожух 2, пьезоэлемент 3, шайбу 4, валик 5 и упругий элемент 6 с вибрирующей накладкой 7, связанный с шайбой 4 и валиком 5, систему 8 подачи и удержания смазки 9 в зоне 10 контактного взаимодействия. Пьезоэлемент 3 выполнен в виде витой пружины 11 из биморфа 12, который представляет собой металлическую пластину 13, жестко связанную, например, наклеенную на наружную поверхность 14 витой пружины 11, которая жестко закреплена на торце 15.

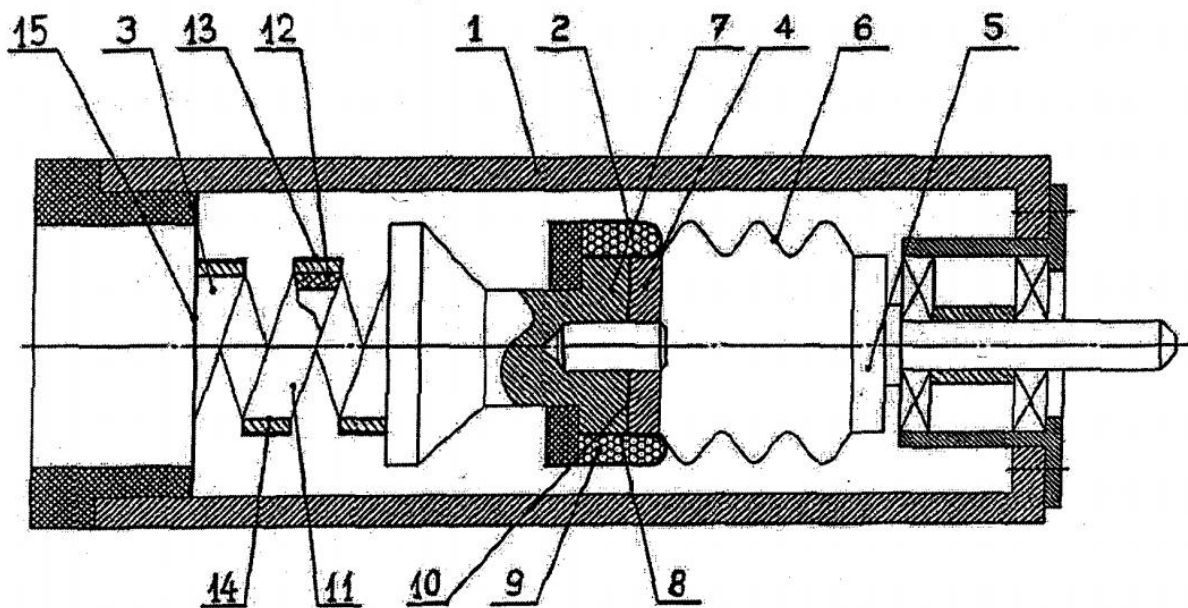


Рис. 7.12. Вакуумный пьезопровод для нанотехнологии

Данный пьезопровод работает следующим образом: при подаче на пьезоэлемент 3 переменного напряжения вибрирующая накладка 7 начинает совершать, совместно с пьезоэлементом 3 крутильные колебания. При повороте пьезоэлемента 3 в одну сторону (при раскручивании витой пружины 11), происходит одновременно с раскручиванием и удлинением витой пружины 11, что приводит к увеличению давления вибрирующей накладки 7 на шайбу 4, валик 5 поворачивается на несколько секунд. При повороте пьезоэлемента 3 в другую сторону (при закручивании пружины 11), происходит одновременно с закручиванием и укорочением витой пружины 11, что приводит к уменьшению давления вибрирующей накладки 7 на шайбу 4, поворот валика 5 в противоположную сторону не происходит. Таким образом осуществляется пошаговый поворот валика 5.

6.2. Устройства прецизионного перемещения на основе эффекта магнитострикции

6.2.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений

В основу разработки положена задача обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения зонда при выполнении различных нанотехнологических операций.

Устройство перемещения (рис. 7.13) содержит привод 2, связанный с неподвижным основанием 1 и зондом 3, подложку 5, установленную на

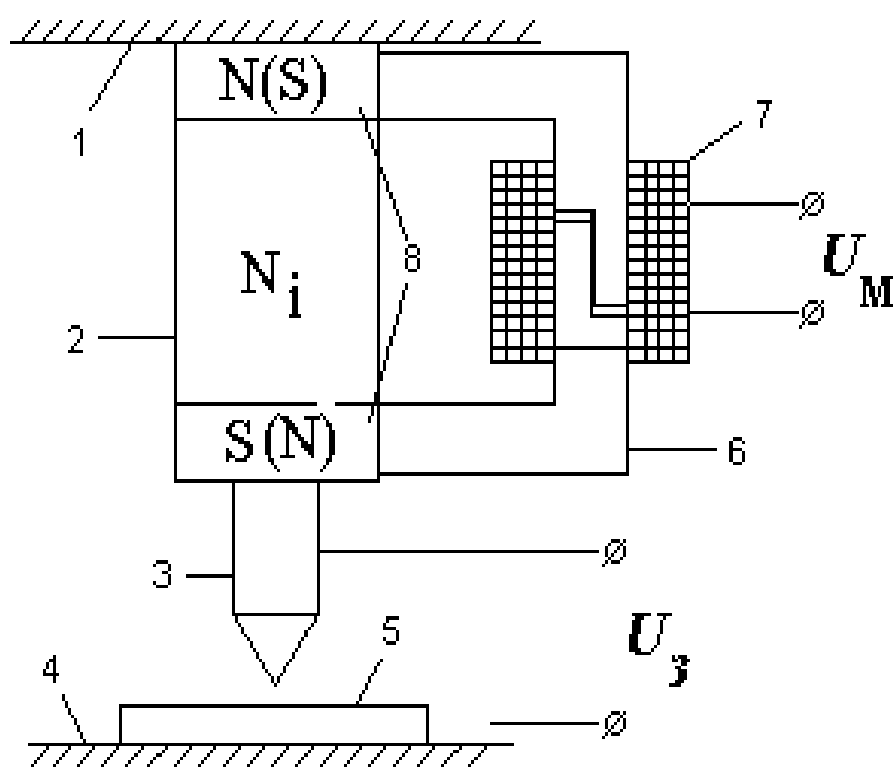


Рис. 7.13. Устройство перемещения для нанотехнологии

подложкодержателе 4. Привод выполнен в виде цилиндра из магнитострикционного материала, торцы которого связаны с полюсами электромагнита 8, жестко связанными с его сердечником 6, выполненным составным, с возможностью осевого перемещения составных частей относительно друг друга внутри катушки индуктивности 7. Один полюс электромагнита жестко зафиксирован на неподвижном основании, а другой присоединён к зонду.

При подаче напряжения на катушку индуктивности 7 происходит перемещение привода 2, а вместе с ним и зонда 3, что достаточно для реализации нанотехнологического процесса.

Применение устройства позволяет повысить точность перемещения за счёт использования магнитного поля вместо электрического, что актуально для различных нанотехнологических процессов.

6.2.2. Зондовое устройство для нанотехнологии

Устройство наноперемещения зонда (рис. 7.14), содержит привод 1, связанный с неподвижным основанием 2 и зондом 3, подложку 4, установленную на подложкодержателе 5. Привод 1 выполнен в виде магнитострикционного биморфа в виде двух, жестко связанных между собой, пластин, одна из которых выполнена из магнитострикционного материала 6, а другая – из немагнитного, диэлектрического 7. На консольной части привода 1 закреплен зонд 3, а другая часть выполнена немагнитной. Диэлектрическая пластина 7 жестко связана с сердечником электромагнита 8, между полюсами которого 9 расположен магнитострикционный биморф.

При подаче напряжения на электромагнит 8 происходит перемещение пластины из магнитострикционного материала 6, а вместе с ним и привода 1.

На основании результатов, полученных при тестировании уже существующих магнестрикционных приводов, можно говорить о повышении точности позиционирования в десятки раз по сравнению с пьезоэлектрическими приводами.

Представленные в настоящем разделе технические решения защищены Патентами Российской Федерации [43÷45].

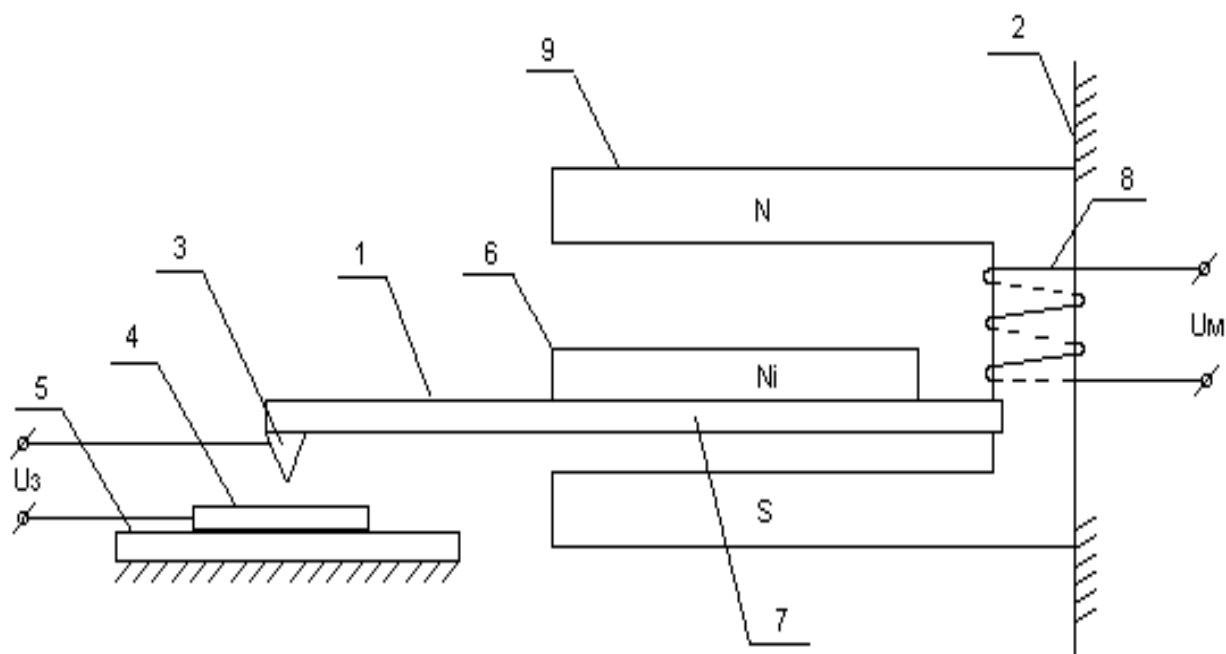


Рис. 7.14. Устройство наноперемещения зонда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее.

Разработка новых видов прецизионных приводов на сегодняшний день является важнейшей задачей точного машиностроения. С использованием таких приводов, функционирующих на основе пьезоэффекта, созданы современные средства прецизионного контроля и точного позиционирования узлов технологического оборудования в различных областях производства и технологии приборостроения. Это системы автоюстировки и подстройки лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики; средства управления и компенсации вибрации. Важнейшей областью применения прецизионных приводов является нанотехнология – такие ее области, как зондовая микроскопия и литография. Совершенствование приводов позволяет создавать более точные и функциональные нанотехнологические устройства, осуществляющие контроль и модификацию поверхности на качественно новом уровне, в том числе, в условиях вакуума.

Предложенные в монографии технические решения для электронного машино- и приборостроения, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к прецизионным устройствам перемещений и соответствуют критериям патентоспособной новизны, изобретательского уровня и промышленной применимости.

Перспективным направлением в проектировании сканеров является использование эффекта магнитострикции.

Для систем перемещения в нанотехнологии особый интерес представляют сплавы, в которых гигантская магнитострикция реализуется в области комнатных температур. Значительные перспективы практического использования имеют так называемые интерметаллические соединения редкоземельных элементов с металлами группы железа.

В монографии приведены некоторые технические решения устройств, предназначенных для реализации процесса исследования и модификации поверхности твердого тела зондовыми методами. Рассмотрены конструктивные решения как технологических устройств на основе пьезопроводов и магнитострикционных элементов, так и самих приводов, предназначенных в том числе для работы в условиях вакуума.

Предложенные технические решения приводов, механизмов и устройств отвечают критериям качества по привносимой дефектности, кинематическим и динамическим параметрам работоспособности.

Разработанные модели образования привносимой дефектности в условиях вибрации позволяют реализовать конструкции прецизионных приводов, дефектность от которых наименьшим образом влияет на технологическую среду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. - 164 с.
2. Миронов. В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – Н. Новгород: Российская академия наук. Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
3. Howland Rebecca, Benatar Lisa. A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy / Project Editor and Booklet Designer: Christy Symanski // Copyright 1996 by Park Scientific Instruments. – 76 p.
4. Быков В.А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей. – Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н., – М.: ГНЦ НИИ физических проблем имени Ф.В. Лукина, 2000. – 393 с.
5. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. В 2-х томах. Т. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 608 с.
6. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 200 с.
7. Михайлов В.П. Автоматизация управления процессами сверхточного позиционирования линейных модулей реологического типа. – Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2003 – 291 с.
8. Расчёт и конструкция деталей аппаратуры САУ. Учебник для техникумов / В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с.

9. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 159 с.
10. Андреев А.С., Никитин С.А., Спичкин Ю.И. Зависимость интегралов обменного взаимодействия от атомного объема в аморфных сплавах и кристаллических соединениях R—Fe // Вестн. МГУ. Сер. 3, 1993, Т. 34, № 1. – С. 55÷71.
11. Надеев А. И. Магнитострикционные интеллектуальные преобразователи параметров движения: Монография. Рукопись деп. в ВИНТИ 22.07.1999 № 2385-В99. – Астрахань: АГТУ, 1999. – 155 с.
12. Арменский Е.В., Львов Б.Г., Митрофанов С.А. Стратегия построения концептуальной модели технического объекта / Межвузовский сборник “Методы моделирования и оптимизации в САПР конструкторско-технологических работ”. – М.:МИЭМ, 1989.
13. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятий решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. – СПб.: Инфо-да, 2004. – 223 с.
14. Подиновский В. В. Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.
15. Подиновский В. В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решения // В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. –С. 48÷82.
16. Валиахметов В., Звездин В.В., Заморский В.В. Модель привода точной подстройки на основе пьезоэлектрического элемента / Материалы конференции. – Камский государственный политехнический институт, 2005.

17. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. - М.: Машиностроение, 1973. - 216с. ил.
18. Епифанов Г.И., Аветисян И.С. Механизм смазочного действия граничных пленок. ДАН СССР, ИМАШ.; В сб. трудов 3-ей Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, 1960. - с.92-97.
19. Епифанов Г.И., Минаев Н.И. Исследование трения как сопротивление сдвигу тонких поверхностных слоев твердых тел. ДАН СССР, ИМАШ.; В сб. трудов 3-ей Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, 1960, с.103-107.
20. Крагельский И.В. и др. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526с., ил.
21. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Расчет интенсивности износа в подшипнике скольжения при сухом трении. - М.: НИИНавтопром. Деп.рук. №900ап-Д83. 1983. - 5с., ил.
22. Ивашов Е.Н. Теория и проектирование 1 - координатных исполнительных устройств оборудования электронной техники на стадиях предварительной разработки. - Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н., -М.: МГИЭМ, 1993 - 420 с., ил.
23. Розанов Л.И. Вакуумная техника: Учебник для вузов.- М.: Высшая школа, 1982. - 207с., ил.
24. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М. Мир, 1969. - 681 с., ил.
25. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1964.-286 с., ил.
26. Расчет и выбор подшипников качения: Справочник Н.А. Спицын, Б.А. Яхин, В.М. Перегудов, И.Н. Забулонов М.: Машиностроение, 1974 - 57с.

27. Д.И. Агейкин, Е.Н. Костин, Н.Н. Кузнецова Датчики контроля и регулирования, 1964г.
28. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю. Стереометрическое устройство для наноперемещений. Патент РФ на ПМ №36924. Оpubл. 27.03.2004, Бюл. №9.
29. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Степанов М.В. Устройство для формирования наноструктур. Патент РФ на ПМ №40537. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
30. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Степанов М.В. Привод для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №40538. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
31. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Реутова М.В., Степанов М.В. Колебательный контур для наноэлектроники. Патент РФ на ПМ №40539. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
32. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Степанов М.В. Зондовое устройство для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №40540. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
33. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Степанов М.В. Устройство перемещения для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №40542. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
34. Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С., Степанчиков С.В. Устройство для формирования нанообъектов на подложке. Патент РФ на ПМ №97864. Оpubл. 20.09.2010, Бюл. №26.
35. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В., Якункин М.М. и др. Устройство для формирования нанодорожек на подложке. Патент РФ на ПМ №104508. Оpubл. 20.05.2011, Бюл. №14.
36. Ивашов Е.Н., Костомаров П.С., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Устройство перемещений. Патент РФ на ПМ №106448. Оpubл. 10.07.2011, Бюл. №19.

37. Ивашов Е.Н., Костомаров П.С., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Система перемещений. Патент РФ на ПМ №106467. Оpubл. 10.07.2011, Бюл. №19.
38. 117. Григорьев И.Ю., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Пьезопривод. Патент РФ на изобретение №2086417. Оpubл. 10.08.1997, Бюл. №22.
39. Ивашов Е.Н., Дульцев А.А., Кузькин В.И. Устройство для получения наноструктур на подложке. Свидетельство РФ на полезную модель № 29926; Опубликован 10.06.2003 г. в «Бюллетене изобретений» №16.
40. Ивашов Е.Н., Кузькин В. И., Реутова М.В. Технологическое устройство для наноперемещений изделия. Свидетельство РФ на полезную модель №30041; Опубликован 10.06.2003 г. в «Бюллетене изобретений» №16.
41. Ивашов Е.Н., Кузькин В.И., Самухов И.В. Устройство перемещения для нанотехнологий. Свидетельство РФ на полезную модель №30033; Опубликован 10.06.2003 г. в «Бюллетене изобретений» №16.
42. Ивашов Е.Н., Кузькин В.И., Степочкин А.А. Устройство для регистрации отклонения острия зонда. Свидетельство РФ на полезную модель №32639; Опубликован 20.09.2003 г. в «Бюллетене изобретений» №24.
43. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство перемещения для нанотехнологии. Патент РФ на ПМ №37580. Оpubл. 27.04.2004, Бюл. №12.
44. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство для получения нанодорожек. Патент РФ на ПМ №42696. Оpubл. 10.12.2004, Бюл. №34.

45. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др.
Измерительное устройство для нанотехнологии. Патент РФ на
ПМ №42697. Оpubл. 10.12.2004, Бюл. №34.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРОГРАММА «ВАКУУМНЫЙ ПЬЕЗОПРИВОД»

Меню программы:

```
unit main;
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes,
Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls,
ExtCtrls;
type
    TfrmMain = class(TForm)
        Panel1: TPanel;
        Label1: TLabel;
        btnTh1: TButton;
        btnTh2: TButton;
        btnTh3: TButton;
        btnTh4: TButton;
        btnExit: TButton;
        procedure btnExitClick(Sender: TObject);
        procedure btnTh1Click(Sender: TObject);
        procedure btnTh2Click(Sender: TObject);
        procedure btnTh3Click(Sender: TObject);
        procedure btnTh4Click(Sender: TObject);
    private
        {Private declarations}
    public
        {Public declarations}
    end;
```



```

var
    frmMain: TfrmMain;
implementation
uses Th1, Th2, Th3, Th4;
{$R *.DFM}
procedure TfrmMain.btnExitClick(Sender: TObject);
begin
    Close;
end;
procedure TfrmMain.btnTh1Click(Sender: TObject);
begin
    frmTh1.Show;
    Hide;
end;
procedure TfrmMain.btnTh2Click(Sender: TObject);
begin
    frmTh2.Show;
    Hide;
end;
procedure TfrmMain.btnTh3Click(Sender: TObject);
begin
    frmTh3.Show;
    Hide;
end;
procedure TfrmMain.btnTh4Click(Sender: TObject);
begin
    frmTh4.Show;
    Hide;
end; end.

```

1. Расчёт эффективного коэффициента трения в зоне контакта выходного звена и упругой пластины:

```
unitTh1;  
interface  
uses  
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics,  
    Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;  
type  
    TfrmTh1 = class(TForm)  
        Panel1: TPanel;  
        Panel3: TPanel;  
        Label1: TLabel;  
        lblPar1:TLabel;  
        edF: TEdit;  
        lblPar2: TLabel;  
        edR: TEdit;  
        Label3: TLabel;  
        edResult: TEdit;  
        Label2: TLabel;  
        Label4: TLabel;  
        Label5: TLabel;  
        Label6: TLabel;  
        Label7: TLabel;  
        Label8: TLabel;  
        Label9: TLabel;  
        edD: TEdit;  
        edV: TEdit;  
        edM: TEdit;
```

```

    edCv: TEdit;
    edCb:TEdit;
    edCl: TEdit;
    edB: TEdit;
    Button1: TButton;
    procedure FormHide(Sender: TObject);
    procedure btnF1Click(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
    {Private declarations}
public
    {Public declarations }
end;
var
    frmTh1: TfrmTh1;
implementation
uses main,math;
{$R *.DFM}
procedure TfrmTh1.FormHide(Sender: TObject);
begin
    frmMain.Show;
end;
procedure TfrmTh1.btnF1Click(Sender: TObject);
var
    f,r,d,v,m,cv,cb,cl,b, res: Real;
    Code: Integer;
    ResStr: string;
begin
    val(edF.Text,f,Code);

```

```

    val(edR.Text,r,Code);
    val(edD.Text,D,Code);
    val(edV.Text,V,Code);
    val(edM.Text,M,Code);
    val(edCv.Text,Cv,Code);
    val(edCb.Text,Cb,Code);
    val(edCl.Text,Cl,Code);
    val(edB.Text,B,Code);
    res:=30*f*r*d*v*m*cb*tan(b)/(pi*r*(cb+cl));
    Str(res:1:2,resStr);
    edResult.Text:=resstr;
end;
procedureTfrmTh1.Button1Click(Sender: TObject);
var
    f,r,d,v,m,cv,cb,cl,b, res: Real;
    Code : Integer;
    ResStr: string;
begin
    val(edF.Text,f,Code);
    val(edR.Text,r,Code);
    val(edD.Text,D,Code);
    val(edV.Text,V,Code);
    val(edM.Text,M,Code);
    val(edCv.Text,Cv,Code);
    val(edCb.Text,Cb,Code);
    val(edCl.Text,Cl,Code);
    val(edB.Text,B,Code);
    res:=30*f*r*d*v*m*cb*tan(b)/(pi*r*(cb+cl));
    Str(res:1:2,resStr);

```

```
    edResult.Text:=resstr;  
end;  
end.
```

2. Расчёт скорости движения выходного звена:

```
unit Th2;  
interface  
uses  
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics,  
    Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;  
type  
    TfrmTh2 = class(TForm)  
        Panel1: TPanel;  
        Panel2: TPanel;  
        f: TLabel;  
        Fvs: TLabel;  
        Fvd: TLabel;  
        edf: TEdit;  
        edFvd: TEdit;  
        Label4: TLabel;  
        edResult: TEdit;  
        Button1: TButton;  
        edFvs: TEdit;  
        procedure FormHide(Sender: TObject);  
        procedure Button1Click(Sender: TObject);  
private  
    { Private declarations }  
public
```

```

    {Public declarations }
end;
var
    frmTh2: TfrmTh2;
implementation
uses main;
{$R *.DFM}
procedure TfrmTh2.FormHide(Sender: TObject);
begin
    frmmain.Show;
end;
procedure TfrmTh2.Button1Click(Sender: TObject);
var
    f,Fvs,Fvd,res: Real;
    Code : Integer;
    ResStr: string;
begin
    val(edf.Text,f,Code);
    val(edFvs.Text,Fvs,Code);
    val(edFvd.Text,Fvd,Code);
    res:=f*(1-((Fvs-Fvd)/Fvs));
    Str(res:1:2,resStr);
    edResult.Text:=resstr;
end;
end.

```

3. Расчёт опорных узлов пьезоэлектрического привода:

```
unit Th3;
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics,
    Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls;
type
    TfrmTh3 = class(TForm)
        Panel1: TPanel;
        Panel2: TPanel;
        Label1: TLabel;
        Label2: TLabel;
        edn: TEdit;
        edLh: TEdit;
        Label3: TLabel;
        edresult1: TEdit;
        Button1: TButton;
        Label4: TLabel;
        edresult2: TEdit;
        Button2: TButton;
        Label5: TLabel;
        edresult3: TEdit;
        Button3: TButton;
        Label6: TLabel;
        Label7: TLabel;
        Label8: TLabel;
        Label9: TLabel;
        Label10: TLabel;
    end;
end;
```

```

        Label11:TLabel;
        Label12:TLabel;
        Label13: TLabel;
        Label14: TLabel;
        Label15:TLabel;
        edX: TEdit;
        edV: TEdit;
        edFr: TEdit;
        edY: TEdit;
        edFa: TEdit;
        edKb: TEdit;
        edKt: TEdit;
        edKv: TEdit;
        edKc: TEdit;
        edl: TEdit;
        procedure FormHide(Sender: TObject);
        procedure Button1Click(Sender: TObject);
private
    {Private declarations }
public
    {Public declarations}
end;
var
    frmTh3: TfrmTh3;
implementation
uses main;
    {$R *,DFM}
procedure TfrmTh3.FormHide(Sender: TObject);
begin

```



```

    frmmain.Show;
end;
procedure TfrmTh3.Button1Click(Sender: TObject);
var
    n,Lh,X,V,Fr,Y,Fa,Kb,Kt,Kv,Kc,l,res4,res1,res2,
res3: Real;
    Code : Integer;
    ResStr1 : string;
    ResStr2 : string;
    ResStr3 : string;
begin
    val(edn.Text,n,Code);
    val(edLh.Text,Lh,Code);
    val(edX.Text,X,Code);
    val(edV.Text,V,Code);
    val(edFr.Text,Fr,Code);
    val(edY.Text,Y,Code);
    val(edFa.Text,Fa,Code);
    val(edKb.Text,Kb,Code);
    val(edKt.Text,Kt,Code);
    val(edKv.Text,Kv,Code);
    val(edKc.Text,Kc,Code);
    val(edl.Text,l,Code);
    res3:=(X*V*Fr+Y*Fa)*Kb*Kv*Kt*Kc;
    Str(res3:1:2,resStr3);
    edResult3.Text:=resstr3;
    res2:=(60*n*Lh)/1000000;
    Str(res2:1:2,resStr2);
    edResult2.Text:=resstr2;

```

```

res4:=Power(res2,1/3);
res1:=res4*res3;
Str(res1:1:2,resSTr1);
edResult1.Text:=resstr1;
end;
end.

```

4. Расчёт влияния элементов пьезоэлектрического привода на привносимый уровень загрязнения

```

unit Th4;
interface
uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes,
    Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, Ex-
    tCtrls;
type
    TfrmTh4 = class(TForm)
        Panel1: TPanel;
        Panel2: TPanel;
        Label1: TLabel;
        Label2: TLabel;
        Label3: TLabel;
        Label4: TLabel;
        Label5: TLabel;
        Label6: TLabel;
        edE1: TEdit;
        edE2: TEdit;
        edp: TEdit;
    end;
end.

```

edR: TEdit;
edRmax: TEdit;
edf: TEdit;
Label7: TLabel;
edresult1: TEdit;
Button1: TButton;
Label8: TLabel;
Hm: TLabel;
edHm: TEdit;
Rmin: TLabel;
edRmin: TEdit;
Label10: TLabel;
edn: TEdit;
t: TLabel;
edt:TEdit;
gnp: TLabel;
Label9: TLabel;
edbupr: TEdit;
Label11:TLabel;
edlupr: TEdit;
edresult2: TEdit;
eds: TEdit;
Label12: TLabel;
edresult3: TEdit;
Label13: TLabel;
edresult4: TEdit;
Label14: TLabel;
edresult5: TEdit;
Label15: TLabel;

edresult6: TEdit;
Label16: TLabel;
edresult8: TEdit;
Label17:TLabel;
edresult9: TEdit;
Label18: TLabel;
edresult10: TEdit;
Label19:TLabel;
edresult11:TEdit;
Label20: TLabel;
edresult12: TEdit;
Label21:TLabel;
edresult13: TEdit;
Label22: TLabel;
edresult7: TEdit;
Label23:TLabel;
edresult14: TEdit;
Label24: TLabel;
edk: TEdit;
Label25: TLabel;
edresult15: TEdit;
Label26: TLabel;
edresult17: TEdit;
edresult16: TEdit;
edresult18: TEdit;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
edresult19: TEdit;
Label29: TLabel;

```

        edresult20: TEdit;
        Label30: TLabel;
        Label31: TLabel;
        edresult23: TEdit;
        Label32: TLabel;
        edresult21: TEdit;
        Label33: TLabel;
        edresult22:TEdit;
        procedure FormHide(Sender: TObject);
        procedure Button1Click(Sender: TObject);

private
    {Private declarations}
public
    { Public declarations }
end;
var
    frmTh4: TfrmTh4;
implementation
uses main;
    {$R *.DFM}
procedure TfrmTh4.FormHide(Sender: TObject);
begin
    frmmain.Show;
end;
procedure TfrmTh4.Button1Click(Sender: TObject);
var
    n, E1, E2, res28, res29, res30, temp, p, Hm, Rmin, t, R,
    Rmax, f, bupr, lupr, s, ss, s1, s2, k, b, b1, res1, res2, res3, res

```

4, res5, res6, res7, res8, res9, res10, res11, res12, res13, res14, res15, res16, res17, res18, res19, res20, res21, res22, res23, res24, res25, res26, res27: Real;

Code : Integer;
ResStr1 : string;
ResStr2 : string;
ResStr3 : string;
ResStr4: string;
ResStr5 : string;
ResStr6 : string;
ResStr7 : string;
ResStr8 : string;
ResStr9 : string;
ResStr10 : string;
ResStr11 : string;
ResStr12: string;
ResStr13 : string;
ResStr14 : string;
ResStr15 : string;
ResStr16 : string;
ResStr17: string;
ResStr18 : string;
ResStr19 : string;
ResStr20 : string;
ResStr21 : string;
ResStr22 : string;
ResStr23 : string;
ResStr24 : string;
ResStr25 : string;

```

ResStr26 : string;
ResStr27 : string;
ResStr28 : string;
ResStr29 : string;

```

```

begin

```

```

    val(edn.Text,n,Code);
    val(edE1.Text,E1,Code);
    val(edE2.Text,E2,Code);
    val(edp.Text,p,Code);
    val(edHm.Text,Hm,Code);
    val(edRrartin.Text,Rnrin,Code);
    val(edt.Text,t,Code);
    val(edR.Text,R,Code);
    val(edRmax.Text,Rmax,Code);
    val(edf.Text,f,Code);
    val(edbupr.Text,bupr,Code);
    val(edlupr.Text,lupr,Code);
    val(eds1.Text,s1,Code);
    val(eds2.Text,s2,Code);
    val(edk.Text,k,Code);
    res28:=Power((4*p*R*Rmax*(2*R-

```

```

Rmax)*(1/E1)+(1/E2)),1/3);

```

```

    Str(res28:1:9,resStr28);
    edResult28.Text:=resstr28;
    res1:=0.7*res28;
    Str(res1:1:9,resStr1);
    edResult1.Text:=resstr1;
    res2:=(6*p*R*Rmax*(2*R-

```

```

Rmax))/pi*res1*res1);
    Str(res2:1:9,resSTr2);
    edResult2.Text:=resstr2;
    res3:=1.4*(sqrt(03*Rmax*(2*R-Rmax))/Hm));
    Str(res3:1:9,resSTr3);
    edResult3.Text:=resstr3;
    if res2<=s1 then s:=res2
        else s:=Hm;
    if res2<=s1 then b:=res1
        else b:=res3;
    res29:=s*sqrt(1+(4*f*f))/s1;
    Str(res29:1:9,resSTr29);
    edResult29.Iext:=resstr29;
    res4:=(pi/8)*0.0000001*res29*res29*res29*res2
9*res29*res29*((b*(R-(sqrt((R*R)-
(b*b)))))/(Rmax*(2*R-Rmax)));
    Str(res4:1:14,resSTr4);
    edResult4.Text:=resstr4;
    res5:=(pi/2)*(R-sqrt(R*R-
(b*b)))*(b*b+((R-sqrt(R*R-(b*b)))*(R-sqrt(R*R-
(b*b)))))/3);
    Str(res5:1:14,resSTr5);
    edResult5.Text:=resstr5;
    res6:=pi*(Rmin+Rmax)*n*t;
    Str(res6:1:14,resSTr6);
    edResult6.Text:=resstr6;
    res7:=res4*res6;
    Str(res7:1:14,resSTr7);
    edResult7.Text:=resstr7;

```



```

res8:=bupr*1upr;
Str(res8:1:14,resSTr8);
edResult8.Text:=resstr8;
res9:=res7*res8;
Str(res9:1:14,resSTr9);
edResult9.Text:=resstr9;
res10:=res9/res5;
Str(res10:1:14,resSTr10);
edResult10.Text:=resstr10;
res11 :=2*b*res9/(res5*bupr);
Str(res11:1:14,resSTr11);
edResult11.Text:=resstr11;
res12:=pi*(Rmax+Rmin)*n;
Str(res12:1:14,resSTr12);
edResult12.Text:=resstr12;
res 13:=res 12*res8*res4/res5;
Str(res13:1:14,resSTr13);
edResult13.Text:=resstr13;
res14:=res12*res8*res4*2*b/(res5*bupr);
Str(res14:1:14,resSTr14);
edResult14.Text:=resstr14;
res25:=(6*p*Rmax*(2*R-Rmax))/(pi*b*b);
Str(res25:1:14,resSTr25);
edResult25.Text:=resstr25;
res26:=1.4*(sqrt<p*Rmax*(2*R-Rmax))/Hm);
Str(res26:1:14,resSTr26);
edResult26.Text:=resstr26;
if res25<=s2 then ss:=res25
    else ss:=Hm;

```

```

if res25<=s2 then b1:=res1
    else b1:=res3;
res30:=ss*sqrt(1+(4*Pf))/s2;
res27:-
(pi/8)*0.0000001*res30*res30*res30*res30*res30*res30*
((b1*(R-(sqrt((R*R)-(b1*b1)))))/(Rmax*(2*R-Rmax)));
Str(res27:1:14,resSTr27);
edResult27.Text:=resstr27;
res15:=k*bupr*n*t;
Str(res15:1:14,resSTr15);
edResult15.Text:=resstr15;
res16:=res15*res27;
Str(res16:1:14,resSTr16);
edResult16.Text:=resstr16;
res17:=pi*(Rmax*Rmax-(Rmin*Rmin));
Str(res17:1:14,resSTr17);
edResult17.Text:=resstr17;
res18:=res16*res17;
Str(res18:1:14,resSTr18);
edResult18.Text:=resstr18;
res19:=res18/res5;
Str(res19:1:14,resSTr19);
edResult19.Text:=resstr19;
res20:=res18*2*res27/(res5*bupr);
Str(res20:1:14,resSTr20);
edResult20.Text:=resstr20;
res22:=k*bupr*n;
Str(res22:1:14,resSTr22);
edResult22.Text:=resstr22;

```

```
res21:=res22*res27*res17/res5;  
Str(res21:1:14,resSTr21);  
edResult21.Text:=resstr21;  
res23:=res22*res17*res27*2*b1/(res5  
*bupr);  
  
Str(res23:1:14,resSTr23);  
edResult23.Text:=resstr23;  
end;  
end.
```