

ВВЕДЕНИЕ

Применение современных технологий электронного машино- и приборостроения в промышленности замедляется не столько отсутствием научных достижений и инженерных идей, сколько сроками и не всегда удовлетворительным качеством их реализации при конструкторско-технологической проработке. Одним из направлений решения этой проблемы является создание и развитие элементов автоматизированных систем проектирования высокотехнологичных объектов, в том числе таких, как сканеры для зондовых микроскопов.

Микроминиатюризация изделий и повышение их качества во многих областях науки и 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 для обычных диапазонов позиционирования.

В нанотехнологии перемещение и позиционирование связано с малыми размерами. В современном технологическом и аналитическом оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений, в частности, устройств на пьезопреобразователях, 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.

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

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

Автоматизированная система проектирования пьезосканеров может играть роль мощного средства для создания пьезосканеров, эффективное применение которых невозможно без разработки комплекса методических указаний и инструкций, используемых на каждом этапе и регламентирующих последовательность их выполнения.

Перспективным направлением в проектировании сканеров для зондовых микроскопов является использование эффекта магнитострикции.

Создание автоматизированной системы проектирования сканеров для зондовых микроскопов невозможно без создания информационной системы поддержки принятия решений для каждого этапа проекта.

Таким образом, разработка элементов автоматизированной системы проектирования сканеров является задачей своевременной и актуальной.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся информационными технологиями в проектировании объектов электронного машиностроения, в том числе проектированием сканеров для зондовых микроскопов. Издание может быть рекомендовано аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению 210100 – «Электроника и наноэлектроника».

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

1.1. Пьезосканеры в приборостроении

Основным элементом СЗМ, который и обеспечивает возможность работы прибора в режимах атомных разрешений, является сканер (пьезодвигатель). Сканер 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 пикометров.

Кроме того, 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 не ортогональность в плоскости еще допустимо исправлять методами программной коррекции, то не ортогональность 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.

1.1.1. 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 XY) и перемещение в направлении перпендикулярном к поверхности (по оси Z) [1].

Сканер зондового микроскопа перемещает зонд относительно образца по типу растровой картины как показано на рис. 1.1.1.

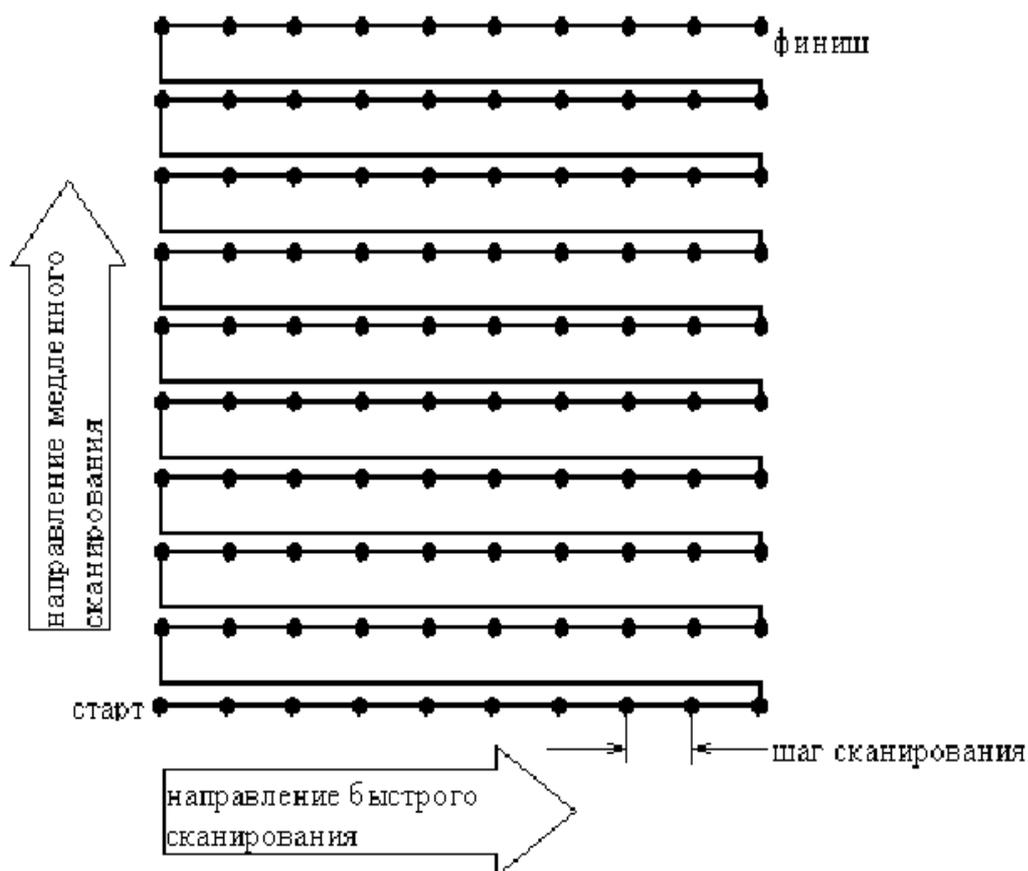


Рис. 1.1.1. Движение сканера СЗМ в плоскости (X , Y).

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 [2].

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 [2].

При работе сканеров имеют место такие нежелательные эффекты, как: гистерезис, старение, крип, которые приводят к искажению получаемого изображения.

Пьезоэлектрические сканеры являются критическими элементами в сканирующих зондовых микроскопах, которые существенно влияют на ка-

чество получаемого изображения. Поэтому характеристики сканера должны удовлетворять определенным требованиям. Одним из самых важных требований, предъявляемых к сканеру, является требование ортогональности сканера [2].

1.1.1.1. Искажения и нестабильности изображения из-за не идеальности пьезосканера

Сканер может состоять из одной или нескольких полых пьезотрубок. Возможны варианты, когда одна из них вставлена в другую (рис. 1.1.2). В микроскопах линии СОЛВЕР в настоящее время такая конструкция пьезосканеров является основной для большинства моделей, по этому остановимся на ней более подробно [2].

В двухтрубчатой коаксиальной конструкции внешняя трубка является Z приводом. При приложении управляющего напряжения к ее электродам, сканер обеспечивает движение зонда в вертикальном направлении (по оси Z). Внутренняя трубка отвечает за отклонение зонда по X и Y .

При приложении переменного напряжения $k + X$ и $-X$ электродам, происходит растяжение одного и сжатие противоположного сегмента трубки, заставляя сканер отклоняться назад и вперед в X направлении. Аналогично осуществляется перемещение по оси Y . Напряжение, приложенное к Z -ому электроду инициирует, сжатие и растяжение сканера в зависимости от полярности приложенного напряжения относительно оси поляризации [2].

Работа сканера, описанная выше, идеализирована, реально же возникает такой дефект как неортогональность сканера (рис. 1.1.2). Это значит, что при приложении напряжения к Z -ому электроду, сканер не только растягивается или сжимается по вертикале, но еще и отклоняется в сторону. Такой дефект может быть вызван: несоосностью внутренней и внешней

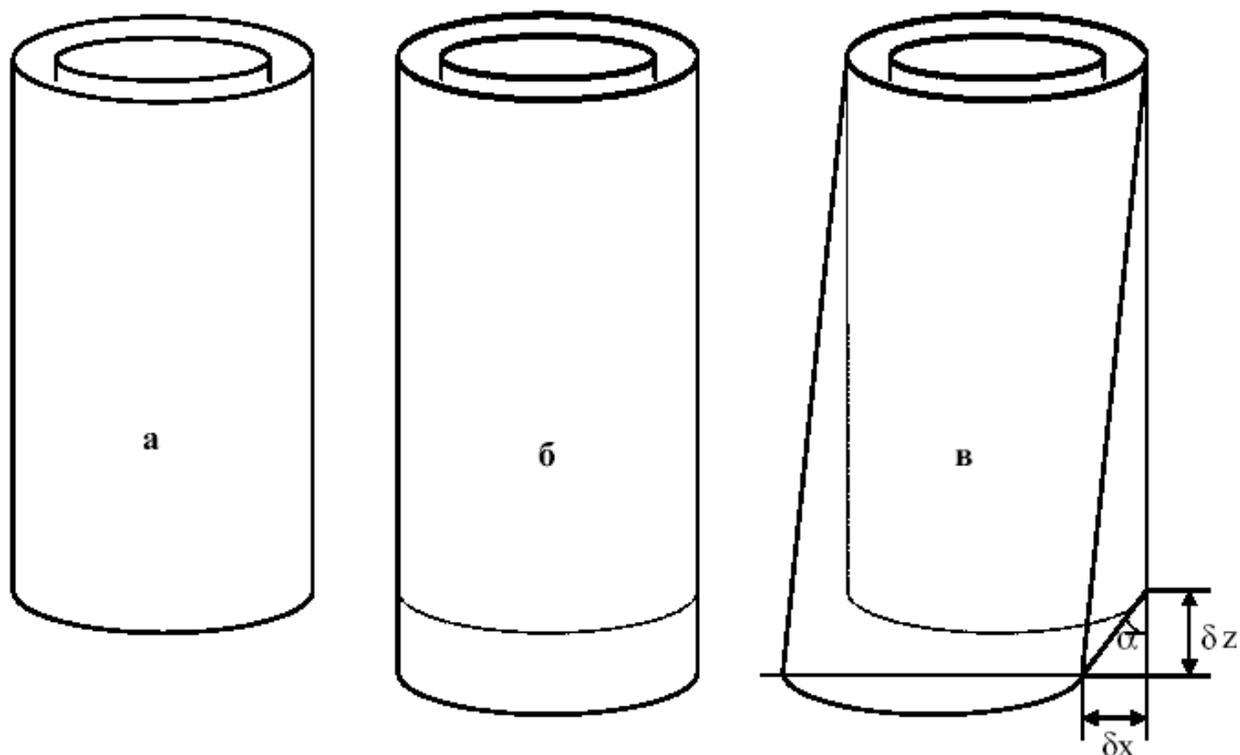


Рис. 1.1.2. Сканер и его работа:

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

оси пьезотрубки, обусловленной не идеальностью технологического изготовления (при токарной обработке внешней трубки до толщины стенок 500 мкм проблематично ожидать точности, лучшей 50 мкм, а это составляет 10% от толщины), неоднородностями материала в самой пьезокерамике, неоднородностью поляризации, воздействием пайки и т.д. [2]

В качестве величины, характеризующей неортогональность сканера, можно ввести такой параметр как угол неортогональности сканера. Угол неортогональности сканера α (см. рис. 1.1.2) можно определить следующим образом. Если считать, что наклон сканера происходит по координате X , то отклонение в направлении X можно обозначить как δx . Далее, будем считать, что при приложении напряжения к Z электроду, сканер удлинил-

ся. Деформация (удлинение) по оси Z обозначим как δz . Теперь рассмотрим треугольник, который можно видеть на рис. 2. Это прямоугольный треугольник и легко определить $\operatorname{tg}\alpha$:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\delta x}{\delta z}, \text{ откуда: } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\delta x}{\delta z}. \quad (1.1.1)$$

1.1.1.2. Конструкция и устройство пьезосканера

Непосредственно после изготовления пьезотрубки, дипольные моменты в ее керамике ориентированы беспорядочно. Для ориентации дипольных моментов используется процесс, называемый поляризацией. При поляризации сканеры достаточно нагреть не до температуры Кюри, а до 200°C – температуры, при которой существенно уменьшается коэрцитивная сила. Прикладывается постоянное напряжение к сканеру. После этого большинство из диполей становятся ориентированными. Затем сканер охлаждается, чтобы зафиксировать диполи в ориентированном состоянии. Поляризованный сканер может реагировать на напряжение расширением или сжатием.

Периодическое использование сканера помогает сохранить поляризацию сканера. Напряжение, приложенное для того, чтобы вызывать сканирующее движение, перестраивает неориентированные диполи, что уменьшает случайную ориентацию. Если сканер не переполаризован при регулярном использовании, то значительная часть диполей будет находиться в случайном состоянии (неполяризованном) в течении периода работы. Располяризация заметно ускоряется если сканер подвергается влиянию температуры 200°C . Это означает, что если вы хотите добавить подогревательную стадию к вашему сканирующему зондовому микроскопу, вы должны термически изолировать ее от сканера [2].

Сканеры сканирующего зондового микроскопа, типа СОЛВЕР, имеют конструкцию, которая схематически представлена на рис. 1.1.3. сканер состоит из двух полых пьезотрубок разного диаметра, вставленных одна в другую.

Верхний конец большой трубки через фланец жестко закреплен на головке микроскопа (см. рис. 1.1.4.). К нижнему, свободному концу через фланец крепится нижний конец трубки меньшего диаметра, которая вставляется внутрь большой трубки. К противоположному, свободному концу внутренней трубки крепится через фланец держатель зонда [2].

Внутренняя трубка является приводом по осям X и Y .

На внутреннюю и внешнюю поверхности трубки нанесены четыре управляющих электрода, в виде четырех вертикальных четвертей: $+X$, $+Y$, $-X$ и $-Y$ (см. рис. 1.1.3).

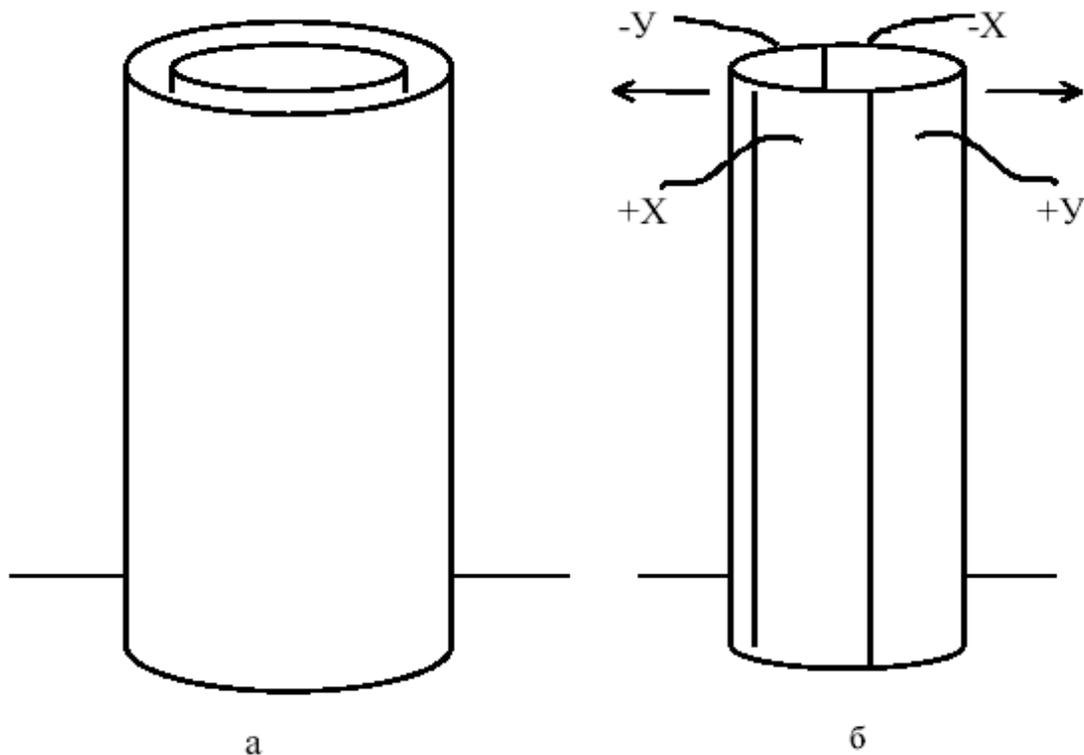


Рис. 1.1.3. Схематическое изображение сканера:

а – внешний вид сканера; б – внутренняя трубка

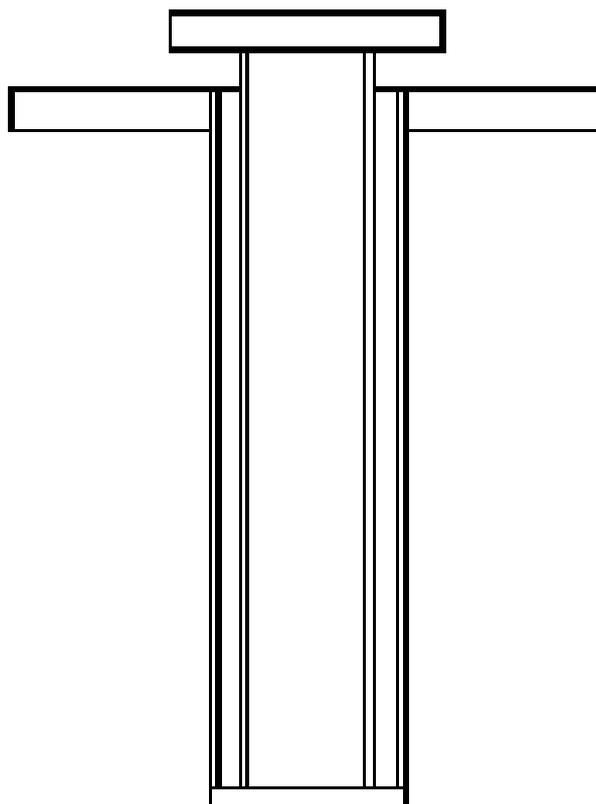


Рис. 1.1.4. Конструкция пьезосканера (вид в разрезе)

Соответственно приложение управляющего напряжения к двум парам X электродов отклоняет свободный конец сканера в X направлении, а приложение напряжения к двум парам электродов отклоняет сканер в Y направлении.

Трубка большого диаметра является приводом по Z – координате. Ее внешняя и внутренняя поверхности покрыты управляющими электродами. Однако, в отличие от X , Y трубки внутренний и внешний электроды Z – трубки являются сплошными. При приложении управляющего напряжения к электродам, в зависимости от полярности, Z – трубка будет удлиняться или укорачиваться (по оси Z) [2].

При работе микроскопа напряжение, прикладываемое к Z –приводу (Z –электроду) сканера в каждой сканируемой точке поверхности, представляет собой измеряемую величину высоты рельефа поверхности в дан-

ной точке и используется для формирования массива данных изображения топографии. В некоторых случаях, используются внешние датчики непосредственно для измерения высоты сканера. В вертикальном направлении, сканеры сканирующих зондовых микроскопов могут различать измерения высоты от субангстремного диапазона до 10 микрон [2].

Максимальный размер скана в плоскости XU для конкретного пьезоэлектрического сканера зависит от длины трубок сканера, диаметра трубок, толщины стенок трубок, и пьезомодулей конкретной пьезоэлектрической керамики, из которой они сделаны. Обычно, сканирующие зондовые микроскопы используют сканеры, которые имеют поперечный скан от десяти ангстрем до 100 микрон.

В работе сканеров наблюдаются дефекты такие как: гистерезис, старение, крип, различные отклонения, искажение изображения.

1.1.2. 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 пьезо-электрическим эффектом [3].

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. Эффект практически линейный, то есть степень поляризации прямо пропорциональна величине прикладываемого усилия, но направление поляризации зависимо, так как усилие сжатия или растяжения генерируют электрические поля, а следовательно, и напряжение, противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

В современных условиях протекания процессов, особое внимание уделяется точным методам позиционирования и перемещения в вакууме. И к прецизионным системам предъявляются высокие требования, это и точность позиционирования, быстродействие, а также и малая инерционность систем позиционирования. Прецизионные системы перемещения являются необходимым условием увеличения процента выхода годных изделий. В современном технологическом и исследовательском оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений. Но особо выделим устройства на пьезопреобразователях, отличительной чертой которых является их безинерционность. Благодаря своей жесткой структуре пьезосканера являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки.

1.1.2.1 Основные понятия и определения

В нанотехнике перемещения и позиционирование связано с малыми размерами. В современном технологическом и исследовательском оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений. Но особо выделим устройства на пьезопреобразователях, отличительной чертой которых является их безинерционность [4].

Патентный и литературный обзор позволил выявить типы пьезопреобразователей, которые могут быть использованы в качестве модулей с нанометрической точностью. Для них характерны получение микроперемещений с погрешностью не более $\pm 0,1$ нм, высокая чувствительность и плавность перемещений, высокое быстродействие – постоянная времени пьезодвигателя не более 0,2 мс, возможность реверсивных перемещений. При работе пьезодвигатель не нагревается и тем самым не влияет на точность перемещения. Однако диапазон перемещения пьезопреобразователей не превышает 400 мкм, а использование редуцирующих механизмов приводит к уменьшению жесткости и снижению передаваемого усилия.

Выделяют следующие типы пьезоэффектов.

Прямой пьезоэффект – это появление электрических зарядов различного 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 (пьезокерамика).

По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов) [4].

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 [4].

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.

В последнее время широкое распространение получили сегнетоэлектрики в виде пьезокерамики титаната бария и его композиций (наобата, 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.

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 1.1.5. и 1.1.6. Пьезостолбец с активной длиной $l_A = 50$ мм выполнен из пьезокерамики ЦТС и состоит из дисков диаметром $D = 18$ мм и толщиной $h = 1$

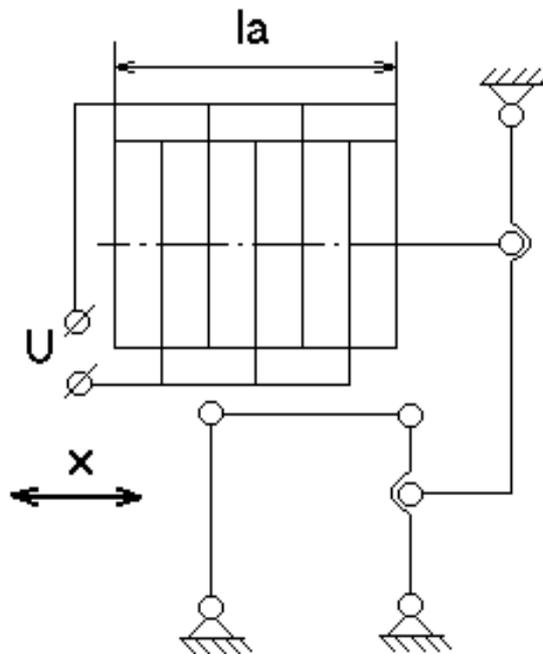


Рис. 1.1.5. Устройство на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

мм. При этом диапазон перемещения пьезостолбца равен $\zeta = 40$ мкм, диапазон перемещений равен $X = 200$ мкм при напряжении питания $U = 600$ В [5].

Для пьезопреобразователей характерен эффект последствия, которое заключается в возрастании деформаций пьезодвигателя при постоянной электрической нагрузке. Например, для модуля (рис. 1.1.6.) при воздействии постоянного напряжения U в течении 4 минут деформация пьезодвигателя в зависимости от величины и полярности напряжения достигает величины $-1 \dots +2,5$ мкм. Этот эффект можно устранить подачей дополнительного напряжения на пьезодвигатель.

1.1.2.2. Основные зависимости

Характеристики пьезопреобразователя выражаются простейшими соотношениями (рис. 1.1.7.):

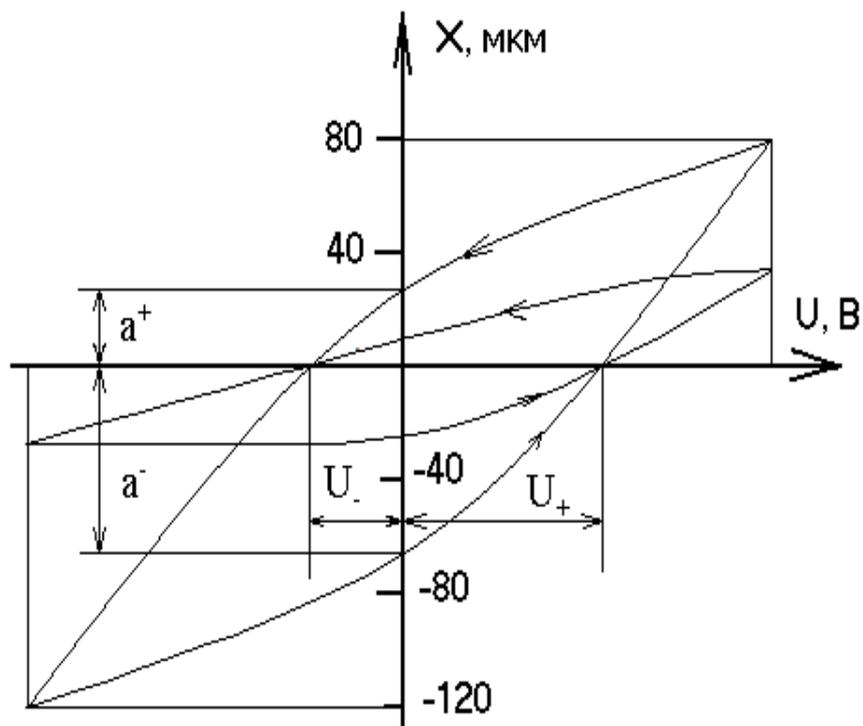


Рис. 1.1.6. Характеристики устройств на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

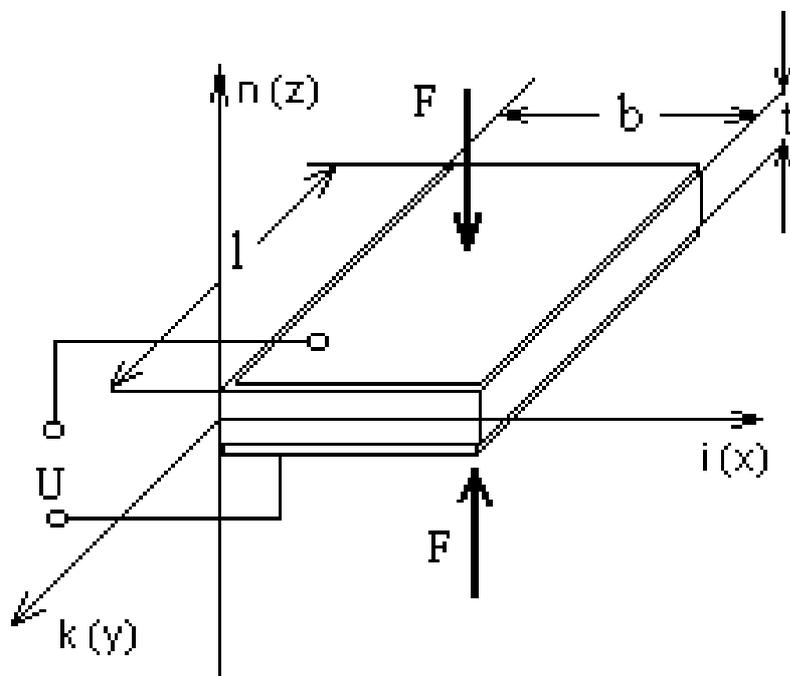


Рис. 1.1.7. Пьезоэлемент

$$E_i = g_{in} \times \sigma_n = -h_{in} \times \varepsilon_n; \quad (1.1.2)$$

$$\varepsilon_n = d_{kn} \times E_k; \quad (1.1.3)$$

$$\sigma_n = C_{nn} \times \varepsilon_n; \quad (1.1.4)$$

$$U_i = E_i \times l_i; \quad (1.1.5)$$

$$C_n = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times F_x / l_n, \quad (1.1.6)$$

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, приведенные в справочной таблице.

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 поляризованного 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:

$$D = P + \varepsilon_0 E = d\sigma. \quad (1.1.7)$$

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:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (1.1.8)$$

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 де-

формацией ε :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{33} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (1.1.9)$$

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:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{33} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{11}\gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{14}\gamma_{15}\gamma_{16} \\ \gamma_{21}\gamma_{22}\gamma_{23}\gamma_{24}\gamma_{25}\gamma_{26} \\ \gamma_{31}\gamma_{32}\gamma_{33}\gamma_{34}\gamma_{35}\gamma_{36} \\ \gamma_{41}\gamma_{42}\gamma_{43}\gamma_{44}\gamma_{45}\gamma_{46} \\ \gamma_{51}\gamma_{52}\gamma_{53}\gamma_{54}\gamma_{55}\gamma_{56} \\ \gamma_{61}\gamma_{62}\gamma_{63}\gamma_{64}\gamma_{65}\gamma_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2E_3 \\ E_3E_1 \\ E_1E_2 \end{pmatrix} \quad (1.1.10)$$

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. 1.1.8). 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.

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 раз-

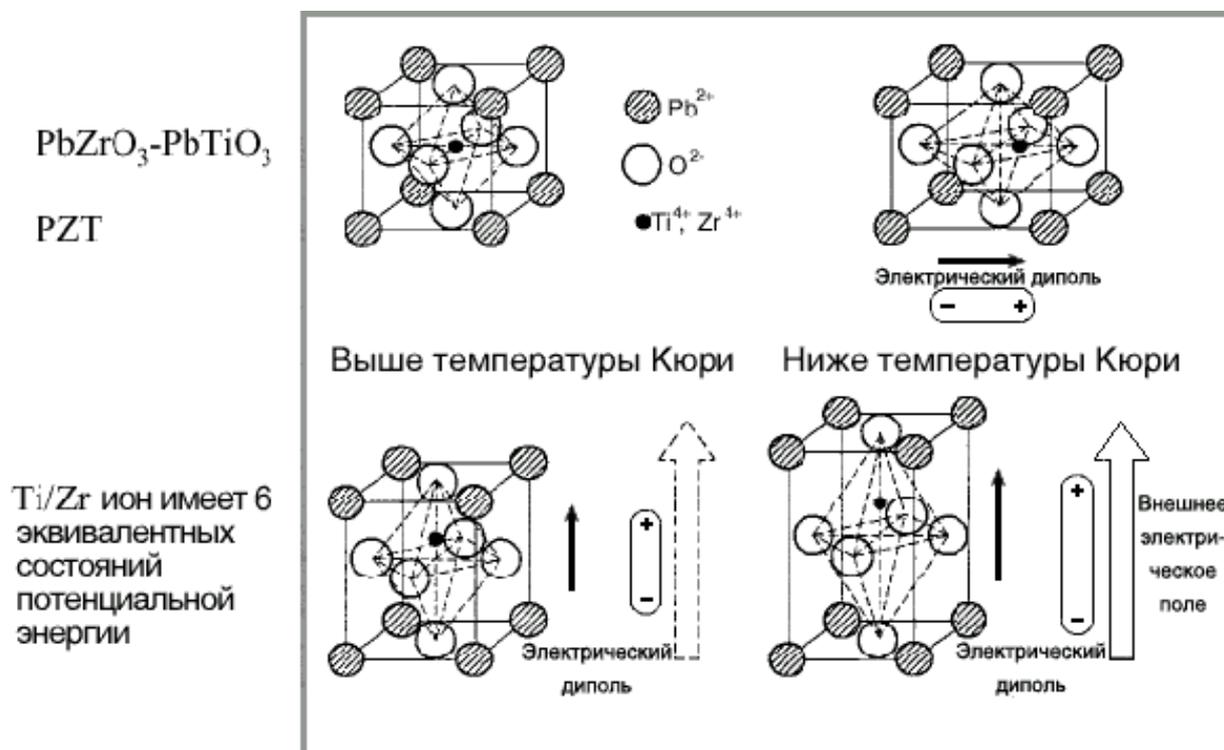


Рис. 1.1.8. Элементарные диэлектрические решётки

личных 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 приравнять к эффективности. Так как, в принципе возможно восстановление накопленной энергии, а значит эффективность может быть намного больше коэффициента связи.

1.2. Основные представления и понятия о проектировании пьезосканеров

1.2.1. Блочно-иерархический подход к проектированию пьезосканера

Современные технологические объекты – сложные системы, с иерархической структурой, состоящие из большого количества взаимосвязанных блоков. В свою очередь, блоки состоят из некоторого набора узлов и имеют сложную иерархическую структуру. И так до нижнего уровня иерархии объекта, элементом которого служат неделимые компоненты. Назовём последние базовыми элементами (Б.Э.).

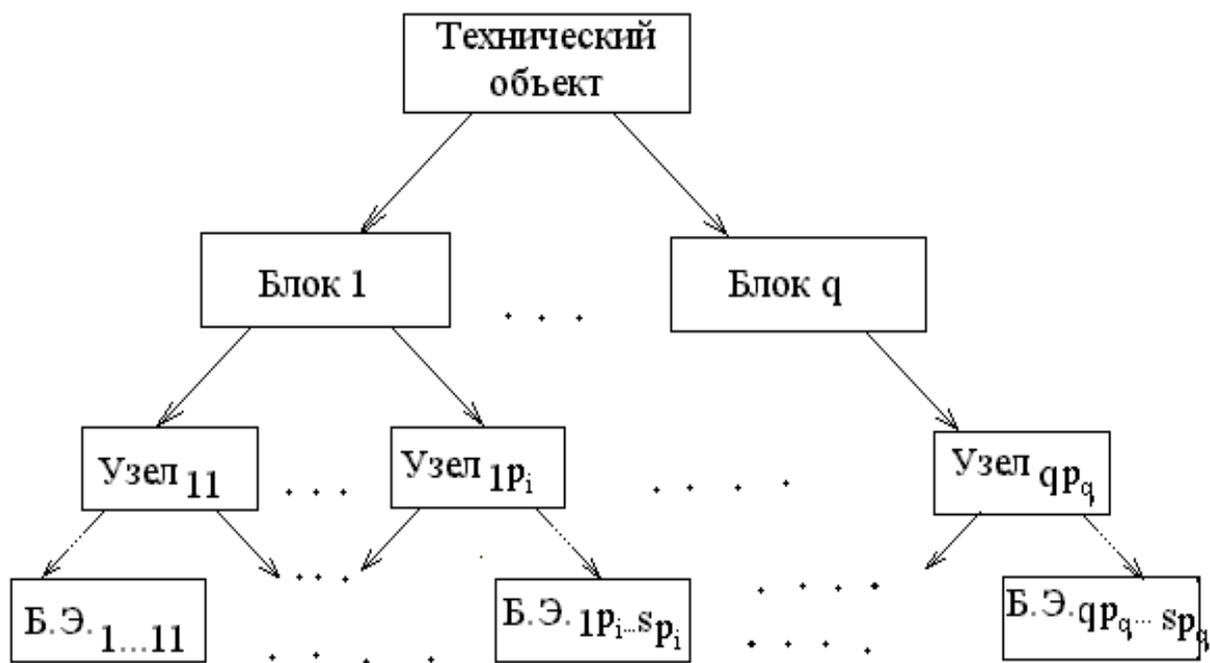


Рис. 1.2.1. Иерархия структуры технического объекта.

На рис. 1.2.1. приведена иерархия структуры технического объекта (пьезосканера). На каждом иерархическом уровне имеется свое представление о системе и элементах. То, что на i -м уровне называлось элементом, становится системой на $i+1$ уровне.

По ЕСКД различают следующую иерархию изделий машиностроения: детали – сборочные единицы – комплексы – комплекты. В соответствии с ЕСТД установлена такая иерархия уровней технологии: маршрутная – операционная – технологические переходы. Например, для технологии базовыми элементами служат технологическое оборудование, инструмент, оснастка, технологические среды, приспособления и т.п. Как элементы они образуют систему первого иерархического уровня – технологический переход. В свою очередь, технологический переход как элемент входит в систему следующего иерархического уровня – технологическую операцию. Наконец, технологическая операция как элемент может входить в систему следующего уровня иерархии – маршрутную технологию [11].

Проектирование всего технологического объекта в комплексе представляет собой сложную научно-техническую задачу большой размерности. Решение такой задачи не под силу даже самой мощной современной ЭВМ. Поэтому для её решения целесообразно использовать блочно-иерархичный подход, в основу которого положена идея, аналогичная идее метода динамического программирования Беллмана. Проектирование при блочно-иерархическом подходе ведётся последовательно сверху вниз. На каждом иерархическом уровне ставится и решается задача проектирования систем этого иерархического уровня. Так, на верхнем уровне рассматривается весь объект в целом. Для его описания используется наименее детализированное представление, отражающее самые общие черты и особенности проектируемого объекта. На каждом следующем уровне последовательной разработки степень детализации описания возрастает. При этом объект рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Такой подход к проектированию позволяет, во-первых, свести решение задачи большой размерности к решению последовательности задач меньшей размерности; во-вторых, усекать пространство допустимых проектных решений, при переходе с уровня на уровень; в-третьих, за счёт оптимизации каждого шага проектирования получать оптимальные или квазиоптимальные проектные решения.

На самом верхнем иерархическом уровне исходные данные на проектирование является техническое задание на технический объект. Поскольку элементами этого уровня являются блоки, которые ещё не разработаны, то значениями их параметров необходимо задаться. Как правило, стремятся выбрать такие значения параметров, которые обеспечивают оптимум критерию функционирования объекта. На следующем иерархическом уровне выбранные значения параметров блоков используются в качестве технического задания на их разработку. Цель проектирования – создание блоков с требуемыми параметрами. В случае удачного завершения

процесса разработки блоков проблема оптимальности объекта является решённой и можно переходить на следующий уровень. И так до уровня проектирования неделимых элементов.

Поскольку значениями параметров элементов на каждом уровне задаются исходя из условий оптимизации систем при отсутствии полной информации об объекте, возможны ошибки в выборе значений их параметров. Например, выбраны нереализуемые по экономическим, технологическим, конструктивным или другим соображениям параметры. Ошибки выявляются при переходе на следующий уровень проектирования, а их исправление происходит возвратом на верхний уровень и повторным выполнением предыдущих этапов проектирования. Отсюда вытекает важная особенность процесса проектирования – итерационный характер проектирования [11].

1.2.2. Этапы проектирования

Проектирование систем каждого иерархического уровня проводится в несколько этапов и включает в себя разработку схем, конструкций и технологии. Этап разработки схем иногда называется концептуальным этапом проектирования.

По ЕСКД схемы делятся на структурные, функциональные и принципиальные.

Структурная схема дает наиболее общее представление о системе. Она определяет состав функциональных элементов, входящих в систему, и устанавливает связи между ними.

Со структурной схемой неразрывно связано понятие структуры системы. Под структурой понимается функциональный состав элементов системы и их взаимосвязь.

Функциональная схема дает представление о принципах работы системы и наиболее крупных ее подсистем с учетом только тех функциональных элементов, которые вошли в состав структурной схемы системы.

Разработка принципиальной схемы завершает этап проектирования схем. Она создаётся на нижних уровнях иерархии, когда формируется окончательное представление о системе. Принципиальная схема определяет полный набор базовых элементов и позволяет получить полное детальное описание устройства и функционирования системы.

Конструирование – это часть процесса проектирования, непосредственно связанная с разработкой конструкции и получением технической документации на объект.

Различают прямую и косвенную конструкторскую деятельность. Действия, которые служат непосредственно разработке конструкции, называются прямой конструкторской деятельностью. К ним относятся разработка концепции системы; определение типа, числа материалов, размеров и расположение элементов; составление общей конфигурации системы; проведение расчётов; вычерчивание сборочного чертежа, детализовка, составление спецификаций, внесение изменений [12].

Конструирование делится на пионерское, доводочное, вариантное и конструирование без изменения принципов конструкции.

Основной особенностью пионерского конструирования является новое расположение известных или новых элементов. Большинство конструкторских разработок, называемых новыми, создаются путём не использовавшегося ранее сочетания элементов, давно известных как по принципу функционирования, так и по исполнению. Использование новых элементов предполагает, как правило, открытие новых физических принципов или изобретение новых рабочих принципов.

Доводочным конструированием называется такое конструирование, когда при заданном базовом сочетании элементов изменяются функции

отдельных элементов или их конфигурация. Первоначальная основная функция технического объекта изменяется и дополняется только в несущественных деталях. Это часто имеет место при конструктивном изменении стандартных решений, осуществляемом по требованию заказчика. Здесь процесс конструирования охватывает этапы разработки концепции, конструкции и проработки отдельных частей конструкции [11].

Конструирование называется вариантным, когда при заданной функционально-зависимой структуре и неизменном расположении всех элементов изменяются конфигурация или (и) размеры самих элементов.

При конструировании без изменения принципа конструкции остаются неизменными функциональная структура, расположение и конфигурация элементов. В проектирование входит только этап детализовки, так как разработка проекта не требуется.

Разработка технологии включает в себя проектирование (1) маршрутной и (2) операционной технологии, (3) создание специального технологического оборудования, оснастки, приспособлений, инструмента и т.д.

1.2.3. Проектные процедуры

1.2.3.1. Основные понятия и определения

На каждом иерархическом уровне типовым алгоритмом проектирования является следующая итерационная последовательность проектных процедур (рис. 1.2.2.).

Исходными данными на проектирование систем любого иерархического уровня служит техническое задание (ТЗ), а результатом проектирования является документация на систему данного уровня и ТЗ на разработку



Рис. 1.2.2. Типовой алгоритм проектирования

систем следующего иерархического уровня. На каждом уровне используется своя логика проектирования. Однако типовыми проектными процедурами, определяющими разработку и отбор проектных вариантов, являются процедуры синтеза – анализа – принятия решений [11].

Под синтезом технологического объекта будем понимать совокупность действий, нацеленных на разработку нового проектного варианта. Процедура анализа связана с определением характеристик синтезированного варианта. Результаты анализа служат основанием для отбора наиболее подходящих проектных вариантов.

Различают одновариантный и многовариантный анализы. Одновариантный анализ предназначен для определения выходных параметров системы при заданном варианте структуры и сочетании значений внутренних параметров. Многовариантный анализ позволяет судить о поведении объекта в некоторой области пространства допустимых значений внутренних параметров.

Выделяют два варианта многовариантного анализа: анализ чувствительности и статистический анализ. Анализ чувствительности используется при ответе на вопрос: “Какова чувствительность выходных параметров системы к действию дестабилизирующих факторов?”. Статистический анализ используется для оценки серийнопригодности изделий, то есть показывает, каковы характер и величина разброса выходных параметров объекта, при известном законе и разбросе параметров элементов.

Независимо от логики проектирования каждый иерархический уровень заканчивается проверкой пригодности результатов проектирования. За оценку результатов проектирования отвечает процедура принятия решений. В общем случае, цель отбора – выбор работоспособного, а в некотором смысле, наилучшего проектного варианта [11].

Если в процессе проектирования отбирается наилучшая, в каком-то смысле, структура технического объекта, то говорят, что проводится структурная оптимизация. Выбор значений внутренних параметров, обеспечивающих экстремум некоторого критерия эффективности $F(X)$ (где $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ точка пространства допустимых значений внутренних параметров), называется параметрической оптимизацией.

При разработке САПР всю совокупность процедур синтеза систем различного иерархического уровня можно объединить в подсистему синтеза. Всю совокупность процедур анализа – в подсистему анализа, а всю совокупность процедур принятия решений – в подсистему принятия решений.

1.2.3.2. Подсистема синтеза

Типовой алгоритм синтеза технических объектов приведен на рис. 1.2.3. Алгоритм является автоматизированным: человеко-машинным. В его реализации участвуют разработчик и ЭВМ.

На первом шаге алгоритма в соответствии с ТЗ разрабатывается концепция будущего объекта, то есть определяются принципы построения и функционирования объекта. Разработка концепции – эвристический процесс, который базируется на идеях, опыте, интуиции и изобретательности разработчика и выполняется им вручную. Результатом выполнения шага является структурная и функциональные схемы объекта.

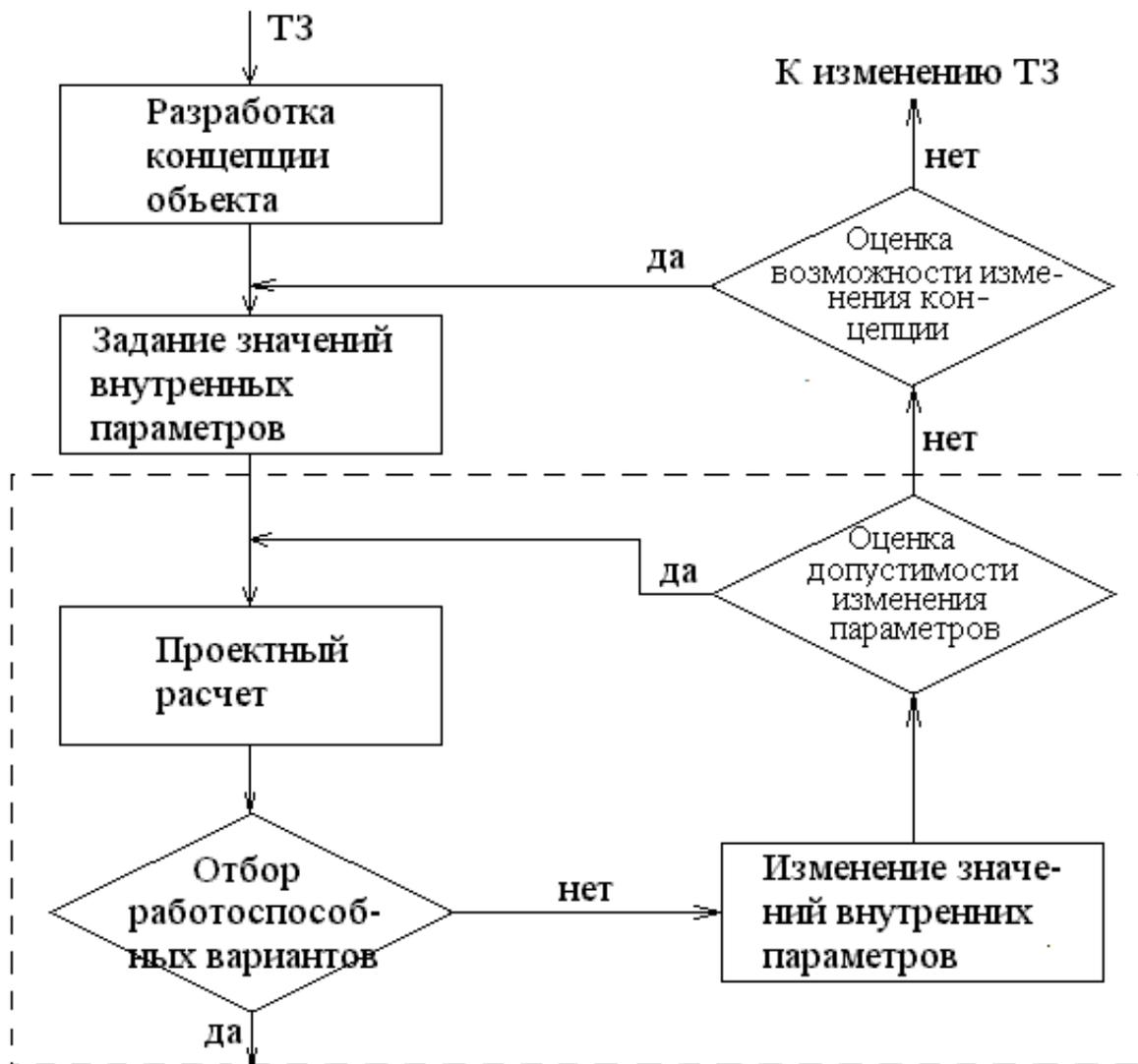


Рис. 1.2.3. Подсистема синтеза

На втором шаге при выбранном варианте структуры задаются значениями внутренних параметров, входящих в систему. Поскольку элементы системы ещё не разработаны и будут разрабатываться на следующем иерархическом уровне, значениями параметров следует задаться исходя из аналогов, опыта предшествующих разработок или интуиции разработчика. Этот шаг также выполняется разработчиком.

Если в результате выполнения концептуального шага функционирования объекта удастся формализовать, т.е. описать математически (или алгоритмически) на основе физических, конструктивных, технологических

закономерностей или логических связей между различными высказываниями, то дальнейшие шаги выполняются ЭВМ автоматически [11].

Для определения свойств синтезированного объекта используется проектный расчёт. Основу проектного расчёта составляет одновариантный анализ, который выполняется с помощью адекватной, но упрощенной математической модели. Проектный расчёт в процедуре синтеза используется многократно для оценки основных интересующих разработчика свойств объекта. Чем точнее, а следовательно, сложнее модель, тем больше по объёму расчёты. Поэтому стремятся упростить модель, чтобы получить результаты проектирования за приемлемое время. С увеличением уровня абстрагирования (верхние уровни иерархии) увеличивается простота модели и упрощается алгоритм расчётов. В то же время модель не должна искажать действительность и адекватно описать объект.

Если рассчитанные в ходе одновариантного анализа значения выходных параметров удовлетворяют требованиям ТЗ, то процедуру синтеза можно считать завершённой и переходить к следующей проектной процедуре. Однако глобальной целью проектирования является получение наилучшего проектного варианта. С этой целью проводится параметрическая оптимизация, в ходе которой отыскиваются такие значения внутренних параметров, которые обеспечивают оптимуму выбранного критерия эффективности. На каждом шаге параметрической оптимизации значения внутренних параметров изменяют таким образом, чтобы эти изменения улучшали критерий оптимизации. При этом проводится проверка допустимости произведенных изменений. Если изменения внутренних параметров не приводят к выходу за допустимые ограничения, налагаемые на эти параметры, то переходят к выполнению параметрического расчёта, и так до тех пор, пока либо получат работоспособный оптимальный вариант, либо не будет установлено, что при заданном концептуальном варианте объекта, не может быть получен ни один работоспособный вариант. В послед-

нем случае проверяется возможность разработки новой концепции объекта. При получении положительного результата вышеизложенная процедура синтеза повторяется. В противном случае убеждаются в получении нереализуемого ТЗ и изменяют техническое задание. После корректировки ТЗ процедура синтеза может быть повторена до получения работоспособного наилучшего проектного варианта. Вследствие неформулируемости задач концептуального шага структурная оптимизация, как правило, не проводится. При этом под оптимизацией понимается параметрическая оптимизация [11]. На рис. 1.2.3. в оптимизационный расчет включены блоки, выделенные пунктирной линией.

1.2.3.3. Подсистема анализа

Синтез технических объектов носит итерационный характер. Проектный расчёт при синтезе используется многократно в циклах оценки вариантов структуры объекта и параметрической оптимизации. Количество циклов синтеза может быть очень большим. Для экономии затрат машинного времени и памяти ЭВМ, анализ вариантов при синтезе осуществляется по упрощённым методикам.

Цель проектного расчёта в процедуре синтеза – определение основных характеристик объекта, по которым идет оценка и сравнение вариантов. Основой расчёта является математическая модель, призванная отображать наиболее существенные для данного объекта свойства, по которым происходит дискриминация вариантов. Основной особенностью модели является то, что она должна обеспечить компромисс между точностью описания и затратами на проведение анализа в процедуре синтеза [11].

Наконец, в проектном расчете используется одновариантный анализ, который не позволяет оценить надежность и серийнопригодность проект-

ного варианта. Естественно, что точность и всесторонность анализа являются ограниченными, что влияет на достоверность результатов проектирования. При этом всегда существует вероятность отобрать не лучший, и даже неработоспособный вариант в качестве окончательного решения.

Для уменьшения степени риска при окончательном выборе проектных вариантов в подсистеме синтеза проводится детальная проработка отобранных вариантов. Анализ выполняется по развернутым методикам проектирования с использованием точных математических моделей. Для обозначения различия анализа, выполняемого в подсистеме анализа, будем называть его поверочным расчётом. Поверочный расчёт проводится для ограниченного числа проектных вариантов, поэтому затраты на проведение анализа могут быть увеличены. Требования к точности и всесторонности очень высокие. Для расчётов используются полные и точные математические модели. Расчёт включает проведение одновариантного и многовариантного анализов. В целом проектный расчёт позволяет ответить на вопросы, какими будут значения всех (или почти всех) выходных параметров и какими ожидаются показатели надёжности, серийнопригодности, стабильности и т.д [11].

В заключение следует отметить, проектный и поверочный расчёты служат для оценки уже разработанных объектов. Их цель – определить основные или все характеристики объекта с различной степенью достоверности и проверить, лежат ли их величины в допустимых пределах.

Цель оптимизационных расчётов – найти такие значения параметров элементов, которые приближают решение к функциональному оптимуму. Процесс оптимизационных расчётов итеративен, выполняется путем возвратов и повторов с использованием проектного расчёта, и служит параметрическому синтезу технического объекта.

1.2.3.4. Подсистема принятия решений

Элементы принятия решений выполняют роль звена обратной связи при выборе наилучшего, в некотором смысле, варианта решения. В подсистеме синтеза существует такой элемент. Он осуществляет выбор варианта, удовлетворяющего условиям работоспособности.

Целью подсистемы принятия решений по информации, получаемой в подсистеме анализа, является отбор наиболее эффективных вариантов решений. При этом возникают следующие трудности.

Показатели эффективности при блочно-иерархичном подходе используются на верхних иерархических уровнях, когда рассматриваются и решаются задачи проектирования системы в целом или наиболее крупные её подсистемы. Однако из-за отсутствия полной информации об объекте (ещё не разработаны системы нижних уровней проектирования) трудно принять решение о направлении поиска «эффективного варианта». Возникает дилемма: с одной стороны, прежде чем принять решение и действовать, следует лучше понять ситуацию (то есть спуститься на возможно более низкий уровень иерархии), а с другой, – не дожидаясь результатов проектирования на нижних уровнях, оценивать и отбирать лучшие решения на верхних уровнях. Решение дилеммы состоит в иерархическом подходе к принятию решений.

1. На верхнем иерархическом уровне проводится декомпозиция проблемы отбора эффективного варианта на совокупность соподчиненных подпроблем, решаемых последовательно.

2. Каждая подпроблема нижестоящего уровня считается полностью определенной и её можно решать, если для неё определен вектор или схема решения, являющиеся решением проблемы вышестоящего уровня.

Структурная схема подсистемы принятия решений изображена на рис. 1.2.4.

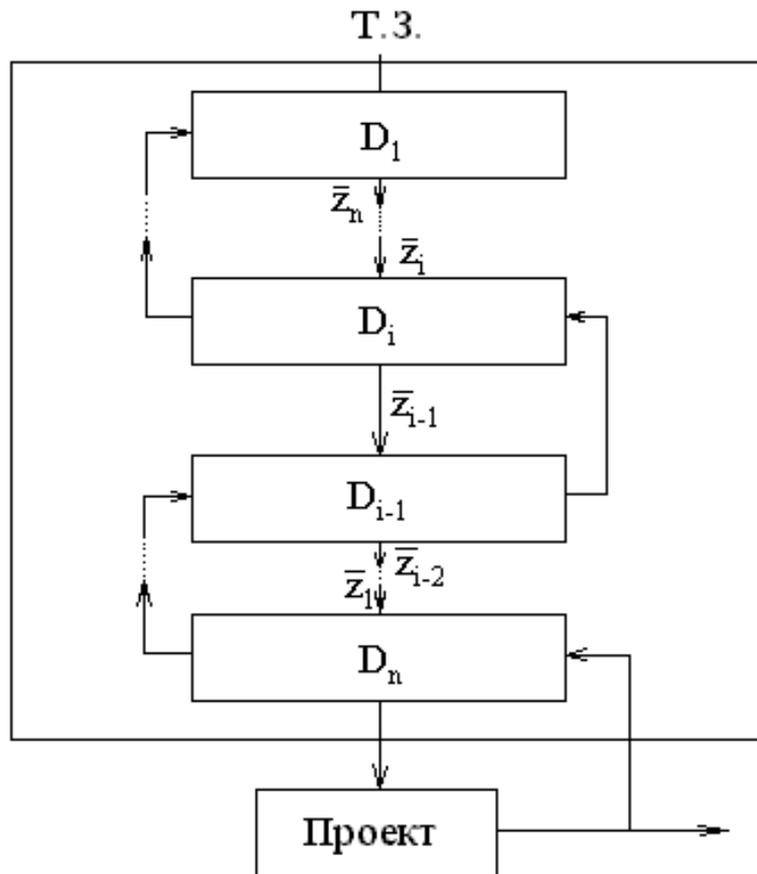


Рис.1.2.4. Подсистема принятия решений

В соответствии с предложенным подходом проблема отбора наиболее эффективного проектного варианта можно разбить на совокупность подпроблем D_i , $i=1, n$ (где n – число иерархических уровней проектирования), решаемых последовательно. Вектор z_i , являющийся результатом решения подпроблемы D_{i-1} вышестоящего ($i-1$) иерархического уровня, который делает подпроблему D_i определенной, и её можно решать. С этой целью в вектор z_i включено техническое задание на разработку систем i -го иерархического уровня. Техническое задание, которое делает проблему проектирования систем i -го уровня решаемой, является результатом проектирования систем вышестоящего уровня [11].

На рис. 1.2.4. приведена схема принятия решения на i -ом иерархическом уровне. Исходными данными на проектирование служит вектор z_i ,

содержащий технические требования TT_i на выходные параметры Y_i систем этого уровня. Цель проектирования, выбор таких значений внутренних параметров x_i и структуры системы, которые обеспечивают оптимум критерия эффективности $F_i(X)$ функционирования системы i -го иерархического уровня, во всём диапазоне изменения внешних параметров Q_i .

1.3. Обобщённый критерий оценки качества пьезосканеров

Обобщённый критерий K_N включает в себя функциональные, экологические и экономические локальные критерии. Каждый из перечисленных локальных критериев определяется следующими параметрами: функциональными – погрешность перемещения, быстродействие; экологическим – газовый поток; экономическими – стоимость, окупаемость.

Представим процесс потери качества пьезосканером (ПС) как некоторую абстрактную математическую модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_k параметры ПС, определяющие состояние, которые являются функциями времени.

Принадлежность состояния X множеству G_x состояний ($X \in G_x$) свидетельствует о том, что ПС работоспособен. Если значение параметров X_1, X_2, \dots, X_k больше допустимых $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{kp}$, т.е. $X_1 > X_{1p}, X_2 > X_{2p}, X_k > X_{kp}$ то ПС не работоспособен. Если некоторые из значений параметров X будут больше допустимых, а другие меньше допустимых, то ПС является частично работоспособен. Для условия полного удовлетворения параметры качества ПС $X_1 \leq X_{1p}, X_2 \leq X_{2p}, X_k \leq X_{kp}$, что соответствует тому, что множество $G_x \subseteq G_{xp}$. При этом запас по качеству будет определяться $K_i = X_{ip}/X_i$, тогда качество по погрешности перемещения – $K_1 = \delta_p/\delta$. Качество по быстродействию $K_2 = \tau_p/\tau$, качество по газовому потоку $K_3 = q_p/q$, качество по стоимости $K_4 = c_p/c$, качество по окупаемости $K_5 = o_p/o$. Здесь $\delta_p, \tau_p, q_p, c_p, o_p$ – допустимые значения погрешности перемещения, быстродействия, газовой

го потока, стоимости и окупаемости для пьезосканера. δ, τ, q, c, o – фактические значения указанных выше величин.

Обобщённый критерий оценки качества в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.3.1, принят нами в виде:

$$\frac{1}{K_N} = \frac{a_1}{K_1} + \frac{a_2}{K_2} + \frac{a_3}{K_3} + \frac{a_4}{K_4} + \frac{a_5}{K_5}, \quad (1.3.1)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – весовые коэффициенты (для определения этих коэффициентов используется метод экспертных оценок) $\sum_{i=1}^5 a_i = 1$, а в общем

виде

$$K_N = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 a_i / K_i}.$$

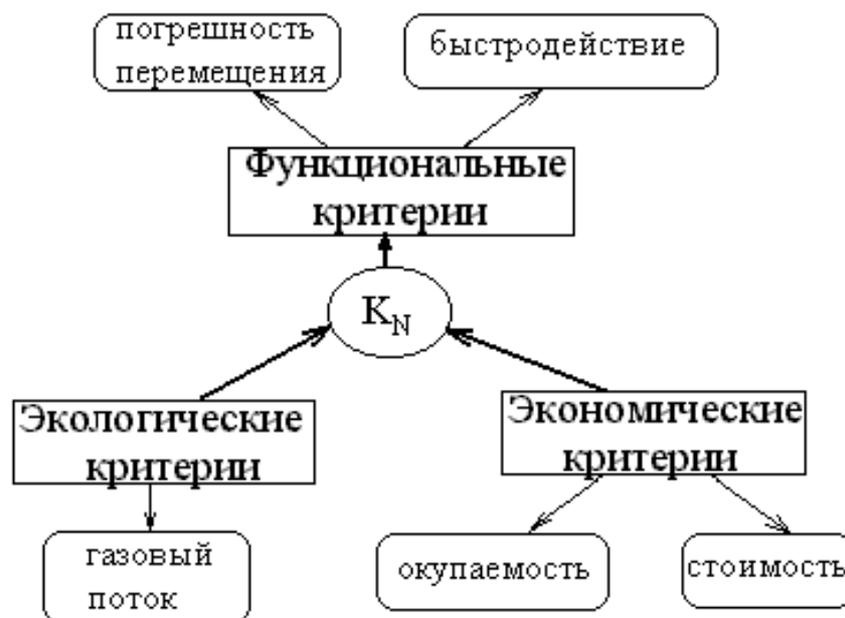


Рис. 1.3.1. Обобщённый критерий оценки качества пьезосканера

1.4. Математическое моделирование в автоматизированных системах проектирования

1.4.1. Структура модели сложных процессов в пьезосканере

При рассмотрении работоспособности деталей пьезосканера (ПС) следует построить модель сложных процессов в систему с учетом взаимосвязи всех параметров при детерминированных стохастических воздействиях, а также разработать общий критерий работоспособности ПС применительно к атмосферным и вакуумным условиям эксплуатации.

Пусть ПС содержит N деталей, каждая из которых обладает определенной совокупностью внутренних свойств внутренних факторов F_j . Далее на систему действуют определенным обобщенным параметром:

$$\sum_1^{G_1} U_k^1(t), \sum_1^{G_2} U_k^2(t), \dots, \sum_1^{G_{N-1}} U_k^{N-1}(t), \sum_1^{G_N} U_k^N(t), \quad (1.4.1)$$

где U – влияние окружающей среды на входные параметры R :

$$\sum_1^{L_1} R_i^1(t), \sum_1^{L_2} R_i^2(t), \dots, \sum_1^{L_{N-1}} R_i^{N-1}(t), \sum_1^{L_N} R_i^N(t). \quad (1.4.2)$$

Характер взаимодействия этих параметров различен в зависимости от видов соединения деталей.

Так, например, при последовательном соединении деталей входной параметр R последующей детали является выходным для предыдущей (рис. 1.4.1).

Тогда для схемы любого выходного параметра для 1-ой детали определяется:



Рис. 1.4.1. Схемы пьезосканера:

R_i – входные параметры пьезосканера,

F_j – внутренние свойства,

U_k – внешние возмущения,

X_i – выходные параметры пьезосканера

R_i – макро- и микрогеометрия пьезосканера до эксплуатации и управляющее напряжение;

F_j – физико-механические и химические свойства материала ПС;

U_k – нагрузка на пьезосканер, среда, внешняя температура;

X_i – усталостная прочность, погрешность перемещения, макро- и микрогеометрия после эксплуатации.

$$R_i = \{R_1, R_2, \dots, R_I\}; \quad F_j = \{F_1, F_2, \dots, F_G\};$$

$$U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_K\}; \quad X_i = \{X_1, X_2, \dots, X_I\}.$$

Для первой детали:

$$R_1^2(t) = S_1^1 \left[\sum_1^{L_1} R_i^1(t), \sum_1^{G_1} U_j^1(t), \sum_1^{K_1} F_k^1(t) \right];$$

$$R_2^2(t) = S_2^1 \left[\sum_1^{L_1} R_i^1(t), \sum_1^{G_1} U_j^1(t), \sum_1^{K_1} F_k^1(t) \right];$$

(1.4.3)

$$R_{L_2}^2(t) = S_{L_2}^1 \left[\sum_1^{L_1} R_i^1(t), \sum_1^{G_1} U_j^1(t), \sum_1^{K_1} F_k^1(t) \right].$$

Для второй детали:

$$\begin{aligned}
R_1^3(t) &= S_1^2 \left[\sum_1^{L_3} R_i^2(t), \sum_1^{G_2} U_j^2(t), \sum_1^{K_2} F_k^2(t) \right]; \\
R_2^3(t) &= S_2^2 \left[\sum_1^{L_3} R_i^2(t), \sum_1^{G_2} U_j^2(t), \sum_1^{K_2} F_k^2(t) \right]; \\
R_{L_3}^3(t) &= S_{L_3}^2 \left[\sum_1^{L_3} R_i^2(t), \sum_1^{G_2} U_j^2(t), \sum_1^{K_2} F_k^2(t) \right].
\end{aligned} \tag{1.4.4}$$

Для $N-1$ детали:

$$\begin{aligned}
R_1^N(t) &= S_1^{N-1} \left[\sum_1^{L_{N-1}} R_i^{N-1}(t), \sum_1^{G_{N-1}} U_j^{N-1}(t), \sum_1^{K_{N-1}} F_k^{N-1}(t) \right]; \\
R_2^N(t) &= S_2^{N-1} \left[\sum_1^{L_{N-1}} R_i^{N-1}(t), \sum_1^{G_{N-1}} U_j^{N-1}(t), \sum_1^{K_{N-1}} F_k^{N-1}(t) \right]; \\
R_{L_N}^N(t) &= S_{L_N}^{N-1} \left[\sum_1^{L_{N-1}} R_i^{N-1}(t), \sum_1^{G_{N-1}} U_j^{N-1}(t), \sum_1^{K_{N-1}} F_k^{N-1}(t) \right].
\end{aligned} \tag{1.4.5}$$

Для N -ой детали:

$$\begin{aligned}
X_1(t) &= S_1^N \left[\sum_1^{L_N} R_i^N(t), \sum_1^{G_N} U_j^N(t), \sum_1^{K_N} F_k^N(t) \right]; \\
X_2(t) &= S_2^N \left[\sum_1^{L_N} R_i^N(t), \sum_1^{G_N} U_j^N(t), \sum_1^{K_N} F_k^N(t) \right]; \\
X_j(t) &= S_j^N \left[\sum_1^{L_N} R_i^N(t), \sum_1^{G_N} U_j^N(t), \sum_1^{K_N} F_k^N(t) \right].
\end{aligned} \tag{1.4.6}$$

Здесь $S_1^1, S_2^1, \dots, S_{L_2}^1; S_1^2, S_2^2, \dots, S_{L_3}^2; S_1^{N-1}, S_2^{N-1}, \dots, S_{L_N}^{N-1}; S_1^N, S_2^N, \dots, S_j^N$ – операторы, устанавливающие связь между входными параметрами, внешними возмущениями и внутренними свойствами каждой детали.

Теперь рассмотрим более подробно входные параметры, внутренние факторы и внешние возмущения и определенные, в конечном итоге, вы-

ходные параметры.

К входным параметрам пьезосканера отнесем макро- и микрогеометрия пьезосканера до эксплуатации и управляющее напряжение.

Внутренние факторы – это прежде всего физико-механические свойства материала пьезосканера, к которым относятся: модули упругости E , G , микротвердость поверхности HV , допускаемые контактные и изгибные напряжения σ_{H_p} , σ_{F_p} , а также физические и химические свойства материала.

К внешним возмущениям отнесем нагрузку на сканер, среду, в которой находится ПС и внешнюю температуру.

В качестве выходных параметров пьезосканера рассматриваем усталостную прочность, погрешность перемещения, макро- и микрогеометрию после эксплуатации.

В задачу создания работоспособной конструкции ПС входит установление таких входных параметров и внутренних факторов, которые задаются внешними возмущениями соответствующими определенным заданным выходным параметрам. Для каждого конкретного случая требования к выходным параметрам различны и достигаются при неоднозначных входных параметрах, внутренних и внешних возмущениях.

Для изучения ПС удобно использовать аппарат системного анализа. Системный анализ является средством обоснованного решения проблем, поставленных перед проектировщиком в случае неполной определенности параметров, входящих в систему. Он объединяет общую схему системного подхода с аналитическим процессом принятия решений. Для этого проблема в целом разбивается на её составные части, с последующим решением, а затем объединяют отдельные части в общее решение. При этом в процессе проведения системного анализа на первом этапе преобладают методы анализа, а на втором – методы синтеза. При проведении системного анализа выделяют следующие этапы: первый – постановка задачи; второй – определение выходных параметров ПС; третий – разработка вариантов

достижения поставленных выходных параметров ПС; четвертый – выявление характера и требований энергетических ресурсов для достижения поставленной цели; пятый – решение задачи оптимизации; шестой – принятие оптимального решения; седьмой – реализация решения в виде полных расчётов и оформленных чертежей ПС; восьмой – передача техдокументации заказчику.

С позиции разработки конструкции ЕСКД рассматривается пять основных этапов:

I – подготовка и согласование технического задания (ТЗ), в котором оговорены условия эксплуатации и работоспособности, а также основные параметры будущего ПС. В ТЗ входят первые два этапа системного анализа.

II – подготовка и согласование технического предложения (ТП), которое содержит основное принципиальное решение поставленной задачи, подкреплённое расчётами. В ТП входят третий и четвёртый этапы системного анализа.

III – подготовка и согласование эскизного проекта – документа, содержащего основные чертежи наиболее существенных узлов, выполненных на основании решения задач оптимизации. Сюда входят пятый и шестой этапы системного анализа.

IV – подготовка и согласование технического проекта – документа, содержащего чертежи общего вида и расчёты будущих деталей.

V – выполнение всех рабочих чертежей ПС. Сюда входят два последующих этапа системного анализа.

Между этапами 1-2 и 3-4 существует двусторонняя (обратная) связь. Разбиение системного анализа на этапы с учётом требований ЕСКД подчёркивает, что решение любой практической задачи надо начинать с уточнения формулировки проблемы и выявления конечных целей, которые в зависимости от тех или иных условий эксплуатации определяются шестью

выходными параметрами: быстродействием, виброустойчивостью, точностью перемещения и позиционирования, газовыделением, ходом исполнительного устройства.

1.4.2. Вероятностная оценка работоспособности и её общий запас в пьезосканере

Представим процесс потери работоспособности пьезосканером как некоторую абстрактную математическую модель. Пусть X_1, X_2, \dots, X_n – выходные параметры ПС, определяющие состояния, которые являются функциями временем t .

Область работоспособности пьезосканера будем рассматривать как множество G_x состояний X , определяемых значениями выходных параметров X_1, X_2, \dots, X_n . Принадлежность состояния X множеству G_x состояний ($X \in G_x$) свидетельствует о том, что ПС работоспособен. Если значение параметров X_1, X_2, \dots, X_n больше допустимых $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{np}$, то есть $X_1 > X_{1p}, X_2 > X_{2p}, X_n > X_{np}$, то ПС является полностью неработоспособным. Если некоторые из значений параметров X будут больше допустимых, а другие меньше допустимых, то ПС является частично неработоспособным. Для условия работоспособности $X_1 \leq X_{1p}, X_2 \leq X_{2p}, X_n \leq X_{np}$, соответствует тому, что множество $G_x \leq G_{xp}$.

В каждом цикле работы пьезосканера события, когда параметр X_i не превосходит допустимую величину X_{ip} :

$$P\{X_i \leq X_{ip}\} + P\{X_i > X_{ip}\} = 1.$$

Пусть $P\{X_i > X_{ip}\}$ – вероятность того, что параметр X_i в течении K циклов выйдет за пределы допустимых X_{ip} ;

$P\{X_i \leq X_{ip}\}$ – вероятность того, что параметр X_i в i -ом цикле выйдет за пределы X_{ip} ;

$P\{X_k > X_{kp}\}$ – вероятность того, что параметр X_i в K -ом цикле выйдет за пределы X_{kp} , тогда по теореме умножения для независимых событий:

$$P\{X_i > X_{ip}\} = \prod_{i=1}^K \{1 - P\{X_i \leq X_{ip}\}\} - P\{X_k > X_{kp}\}. \quad (1.4.7)$$

Это и есть вероятность отказа пьезосканера.

Отказ наступает в том случае, если $X(t) \notin G_{xp}$, до этого момента пьезосканер работоспособен. При этом запас работоспособности будет определяться:

$$K_H = \frac{X_{ip}}{X_i}.$$

Таким образом, при воздействии на пьезосканер внешних возмущений изменяются его входные параметры U_k , которые при соответствующих внутренних свойствах F_j переходят в выходные параметры X_i пьезосканера. Такой переход, во всех случаях, связан с энергетическими затратами в период эксплуатации пьезосканера, вызванными внешними возмущениями.

Все энергетические затраты можно разделить на две составляющие бесконтактные – передаваемые пьезосканеру от окружающей среды и контактные, возникающие в результате контактного воздействия нескольких (сопряженных) деталей и их взаимного влияния друг на друга.

1.5. Способы построения баз экспертных знаний

Задача построения баз экспертных знаний характерна для определения типа проблем. Для этих проблем не существует надёжных и хорошо проверенных количественных моделей, позволяющих связать вход и выход, конкретную ситуацию и результат. Для них характерны неопределённость, описание ситуаций на качественном (а не количественном) языке, недостаточная неопределённость последствий решений, принимаемых

экспертом. Лучше всего для них подходит определение, данное Г. Саймоном – слабоструктуризованные проблемы – такие проблемы, в которых “качественные, трудноформулизованные и неопределённые факторы имеют тенденцию доминировать” [13]. Можно найти многочисленные примеры подобных проблем – медицинская диагностика, техническая диагностика, обследование организаций и т.д.

Именно при решении слабоструктуризованных проблем человеческая интуиция имеет особую ценность. Догадки эксперта, основанные на его прошлом опыте, на неявных знаниях, на “чутье”, позволяют ему решать проблемы на удивительно хорошем уровне. А раз это так, то возникает заманчивая цель передать это умение ЭВМ, запечатлеть это умение в базе знаний.

Во-первых, объём знаний эксперта о предмете области может быть очень велик.

Во-вторых, возникают трудности, связанные со способом получения знаний. Эксперт знает многое, но это знание конкретно, оно основано на прошлом опыте, на совокупности практических случаев. В то же время, в базе знаний должно быть заложено “умение анализа”, которое далеко не однозначно вытекает из практических случаев.

В-третьих, для построения базы знаний необходимо иметь какую-то структуру знаний. Например, для задач диагностики желательно иметь полную совокупность диагностических признаков. Конечно есть случаи, когда эксперт указывает только часть таких признаков. Есть случаи, когда общее впечатление от конкретной ситуации – целостный образ (гештальт) – трудно отобразить с помощью признаков. Заметим что представление гештальта с помощью диагностических признаков всегда обедняет его. Отсюда вытекает известный факт – эксперт знает больше, чем осознает. Иначе говоря, способность эксперта представить свои знания в виде чётких правил всегда ограничена.

В-четвёртых, поведение эксперта во многом определяется особенностями человеческой системы переработки информации. Нельзя рассматривать эксперта как непогрешимый источник информации. Люди, даже самые опытные, совершают ошибки в своих действиях. Кроме того, в сложных ситуациях люди стремятся внести упрощение в решаемую проблему. Они используют эвристики, упрощают задачу и т.д. Следовательно, при построении баз знаний необходимо чётко осознать особенности источника знаний – эксперта.

Существующие способы построения баз знаний (БЗ) предназначены в основном для тех проблем, где структура проблемы (набор признаков и перечень диагностических решений) считается известной. Какими же способами в настоящее время осуществляется построение баз знаний?

1. Эксперт сам указывает цепочки своих логических рассуждений, ведущих от причин к следствиям. Достоинством данного способа является то, что эксперт даёт своим знания в виде цепочки причинно-следственных связей типа: “если ..., то...” (продукции), которые легко “усваиваются” ЭВМ. На базе таких продукций легко строить блок объяснений.

Имеются два существенных недостатка этого способа. Прежде всего в любой реальной задаче количество продукции, необходимое для построения полной БЗ, очень велико. Ясно, что эксперт не может “перечислить” их все за разумное время, необходимое для построения экспертной системы. Так же эксперт “знает больше чем может сказать”. Иначе говоря, в данном случае мы заставляем эксперта решать непривычную для него задачу – задачу синтеза своих знаний, в то время как в своей практической деятельности эксперт обычно решает задачу анализа конкретной ситуации.

2. Эксперт определяет вероятность влияния отдельных признаков на принадлежность ситуации к конкретным состояниям. Так, например,

врач-эксперт указывает, с какой вероятностью то или иное значение диагностического признака соответствует тому или иному заболеванию. Ясно, что при данном подходе трудоёмкость построения БЗ резко снижается. Мы можем, например, охватывать большое число признаков и большое число болезней, так как каждая пара “признак–болезнь” рассматривается отдельно. Но этот способ имеет ряд очень существенных недостатков.

Прежде всего люди плохо назначают вероятностные оценки – эта задача крайне сложна для человеческой системы переработки информации, о чём убедительно свидетельствуют многочисленные психологические эксперименты [14].

Кроме того, в реальных ситуациях именно сочетания признаков определяют, обладает ли то или иное состояние некоторыми свойствами (например, наличие определённой болезни у больного). Те же самые признаки, взятые по отдельности, мало что говорят. При таком представлении у эксперта исчезает целостная картина ситуации, а только она позволяет ему в полной мере использовать свою интуицию. И, наконец, правила агрегации отдельных вероятностных оценок крайне примитивны. Обычно используется сумма вероятностей оценок, взятие максимума или минимума из вероятностей. Это правило не задаётся экспертом, никак им не проверяется, а определяется программистом-конструктором БЗ просто на основании удобства.

Вот почему экспертные системы, содержащие БЗ, построенные таким способом, столь широки по охвату классов решений и столь примитивны по результатам своей работы.

3. Третьим предлагаемым способом построения БЗ является построение “на примерах”, когда в БЗ вводятся описания реальных ситуаций с точки зрения их диагностики. Следует отметить, что в данном случае используются напрямую результаты деятельности эксперта по

анализу ситуаций. Однако ясно, что при таком подходе количество таких примеров должно быть громадным для любой сколь-нибудь реальной практической задачи. Кроме того, эти случаи должны быть “разнообразны” – они должны включать различные сочетания диагностических признаков. Все эти случаи должны быть диагностированы тем экспертом, чью базу знаний необходимо построить. Это в совокупности делает этот подход мало реалистичным.

Несовершенство метода построения БЗ губительно сказывается на качестве существующих экспертных систем и систем поддержки принятия решений. Недаром известный американский учёный в области искусственного интеллекта Э. Фейгенбаум говорил об “узком месте” (bottleneck) получения знаний в искусственном интеллекте [15].

Критерии построения баз знаний

БЗ является ключевым элементом экспертных систем и многих систем поддержки принятия решений. Чтобы эти системы достигли высокого уровня совершенства, БЗ должны удовлетворять совокупности требований:

- 1) БЗ должна быть обоснованной: она должна быть построена на основе знаний высококвалифицированного эксперта;
- 2) БЗ должна быть полной: она должна содержать ответы на все возможные в предварительно очерченной и структурированной предметной области;
- 3) БЗ должна быть неповторимой: она должна содержать непротиворечивые ответы на любые заданные вопросы;
- 4) БЗ должна быть построена надёжным образом. *Во-первых*, в ходе её построения должны использоваться лишь вопросы к экспертам, допустимые с точки зрения человеческой системы переработки информации. *Во-вторых*, любые ответы экспертов должны проверяться на непротиворечивость. *В-третьих*, вопросы к экспертам должны быть имитацией

обычной работы, выполняемой экспертами в сфере их профессиональной деятельности.

Гипотеза о характерности

При структуризации задачи экспертной классификации нами используется гипотеза о различной степени характерности отдельных знаний каждого признака для каждого свойства (или, что то же самое, класса). Предполагается, что по каждому признаку эксперт может упорядочить его значения по их характерности для соответствующего класса и этот порядок не зависит от значений других признаков.

Формально это можно описать следующим образом. Упорядочение значений признака Q_m по их характерности для свойства P_1 позволяет ввести на Q_m транзитивное и антирефлексивное бинарное отношение (линейный порядок) r_m^1 , определяемое следующим образом: $(q_{ms}, q_{mt}) \in r_m^1$, если значение q_{ms} более характерно для свойства P_1 , чем значение q_{mt} .

На основе этих отношений можно построить бинарные отношения доминирования по характерности для каждого свойства на множестве состояний объекта исследования, которые определяются следующим образом:

$$R^1 = \{(a_s, a_t) \in AxA \mid m = 1, M, (a_{tm}, a_{sm}) \in r_m^{-1} \text{ и } Em_0, 1 \leq m_0 \leq m,$$

такие, что

$$(a_{sm_0}, a_{tm_0}) \in r_m^l\}, l=1, L.$$

Естественно предположить, что если по некоторому состоянию эксперт определяет наличие у объекта какого-то свойства, то и состояние, описываемое набором значений признаков, не менее характерных для этого свойства, также обладает этим свойством, то есть если

$$a_s \in K_1 \text{ и } (a_t, a_s) \in R_1, \text{ то } a_t \in K_1. \quad (1.5.1)$$

Отсюда следует, что если в некотором состоянии объект исследова-

ния не обладает каким-то свойством, то этим свойством не обладают и менее характерные для него состояния, то есть если

$$a_s \in K_1 \text{ и } (a_t, a_s) \in R_1, \text{ то } a_t \in K_1. \quad (1.5.2)$$

Условия (1.5.1) и (1.5.2) дают возможность вынесения заключений по ряду состояний без их непосредственной идентификации экспертом, а это, в свою очередь, позволяет организовать рациональную процедуру экспертного опроса, целью которого является классификация всех возможных состояний при уменьшении числа вопросов к эксперту.

ГЛАВА 2. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

2.1. Структура информационной технологии проектирования пьезосканеров на этапах предварительной разработки

Главным вопросом исследования является разработка структуры информационной технологии создания пьезосканеров на ранних этапах проектирования согласно определению информационной технологии [18]. В её основу положены методы проектирования и программно-технологические средства, объединённые в технологическую цепочку, обеспечивающие сбор, обработку, хранение, распространение и отображение информации.

Необходимым программным средством, должна стать проблемно-ориентированная автоматизированная система комплексного анализа конструкций ПС, которая является инструментарием проектировщика в рамках предлагаемой информационной технологии.

На рис. 2.1.1 представлена структура информационной технологии ранних этапов проектирования ПС. В первую очередь осуществляется сбор необходимой для расчётов информации по справочникам. Затем следует обработка входной информации, включающая комплексный расчёт на ЭВМ механических характеристик конструкции ПС (статический, динамический, прочностной и оптимизированные параметры конструкции). Как исходные данные, так и результаты расчётов должны быть сохранены в базе данных [18].

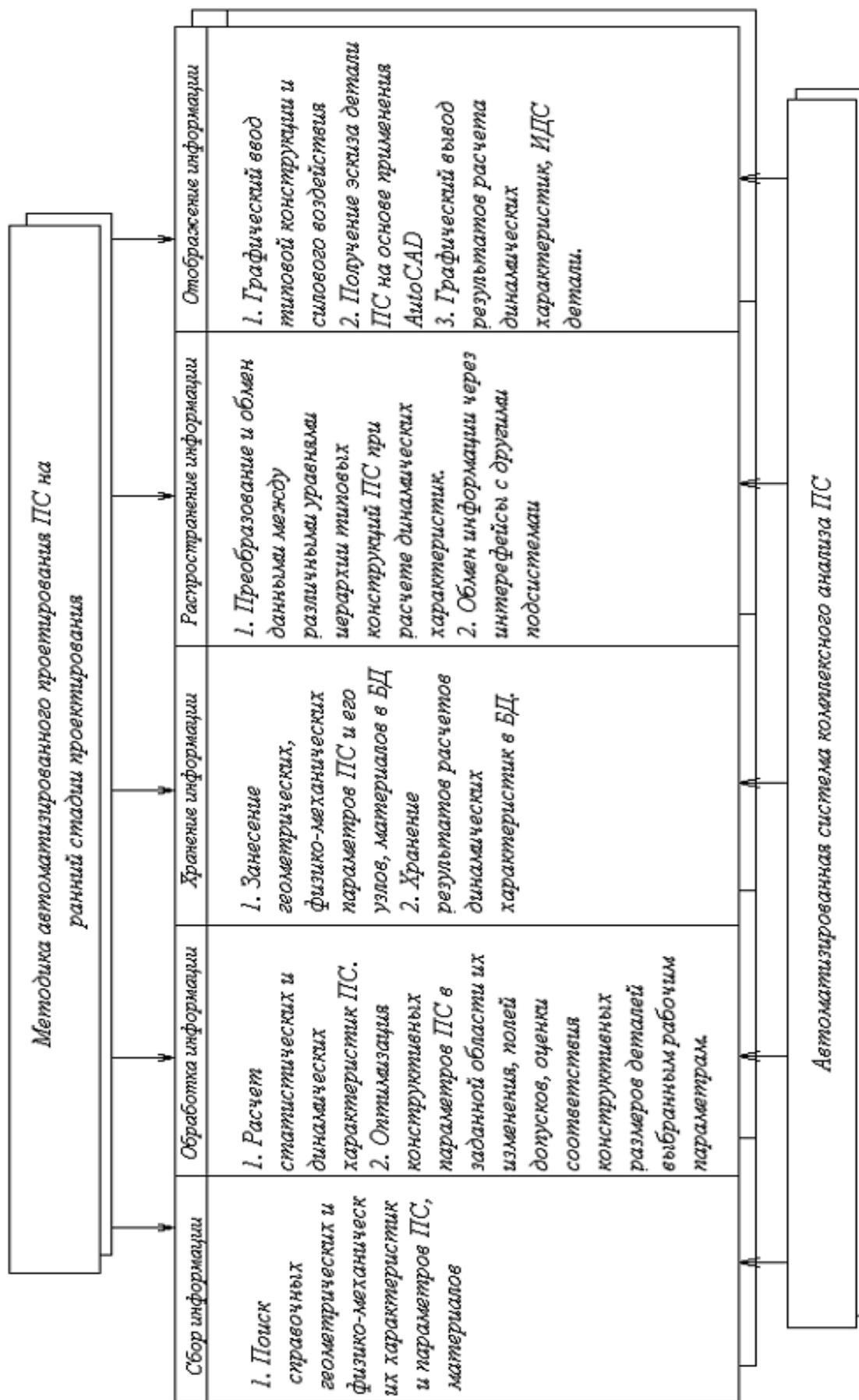


Рис. 2.1.1. Структура информационной технологии ранних этапов проектирования ПС

База данных должна быть построена по иерархическому признаку. Между параметрами ввода, вывода необходимо обеспечить связь по средством взаимодействия с БД. Кроме этого следует также обеспечить обмен информации через интерфейсы с другими системами. Для осуществления ввода в ЭВМ модели конструкции и воздействующих на неё внешних и внутренних факторов, а также принятие решения по результатам расчётов необходимо отображать в графическом виде входную и выходную информацию на экране компьютера.

2.1.1. Структура процесса проектирования пьезосканеров

Прогресс производства, в современных условиях, связывают с достижениями в области автоматизированного проектирования. Поскольку проектирование и разработка технологии является ступенью производства (логическим уровнем), то прогресс на этой ступени также должен определяться автоматизацией.

При неавтоматизированном проектировании результат во многом определяется инженерной подготовкой конструкторов, их производственным опытом, профессиональной интуицией и другие факторами [20, 27].

В настоящее время проектирование конструкций ПС ведётся на основе неавтоматизированного подхода. Данный подход и проектирование включает в себя два уровня. Первый, проектирование ПС производится на основе новой разработки и второй – проектирование ПС выполняется согласно прототипу. В основном, наибольшее применение получил второй уровень, который и будет рассмотрен ниже.

Второй уровень задается ГОСТом или ОСТом данной отрасли промышленности, уточняется на конкретном предприятии и представляет со-

бой довольно трудоёмкий процесс, традиционно состоящий из следующих этапов: согласование технического задания, техническое предложение, эскизный проект, рабочий проект, изготовление опытных образцов, испытания (рис. 2.1.2) [18, 20].

Разберём последовательность и содержание начальных стадий процесса проектирования, к которым традиционно относится согласование технического задания, техническое предложение и эскизный проект.

Этап согласования технического задания обычно реализуется во взаимодействии предприятия-“заказчика” (заказчик) и предприятия-“проектировщика” (конструктор). Заказчик стремится получить от конструктора всё, что он хотел бы воплотить в проекте. Конструктор исходит из конкретных существующих и необходимых возможностей проектного предприятия, запасов ресурсов на непредвиденные случаи, а также предварительных заделов по аналогичным разработкам, которыми он располагает (блок 1). Конструктор должен вначале определиться с аналогом (блок 2), выбрав схемы решений и найти ПС близкий по характеристикам к разрабатываемой конструкции. Это достаточно трудоёмкий процесс работы с документацией. Данный этап реализован в виде блоков 2 и 3. Автоматизацию можно применить для блока 1.

Этап технического предложения предназначен для исследования и разработки принципов построения ПС, определения путей и способов проектирования (блок 4). На этом этапе формируются чертежи общих видов (“деталировочные”), осуществляются предварительные расчёты и оценки динамических, точностных и других характеристик ПС. Здесь конструктор решает вопросы изготовления деталей и сборки всего изделия. Затем проводятся расчёты новых размеров на основании технического задания и расчёты узлов на прочность узлов ПС (блок 5). Расчёты производятся на основе эмпирических формул, что ведёт к многообразию возможных решений, в зависимости от констант. Выбор необходимого решения зачас-

тую происходит достаточно субъективно. Далее разработчик либо проводит исследования математической модели движения, либо пропускает этот этап. Реализация данного этапа выполняется в виде блоков 4, 5, 6. С точки зрения автоматизации данный этап является одним из наиважнейших, так как именно на этом этапе определяется целесообразность принятия решения по проектированию конструкции ПС. Кроме этого, практически все блоки этапа, кроме блока 6, могут быть автоматизированы [18].

Этап эскизного проектирования (ЭП) начинается с результатов предыдущего этапа и заканчивается конструктивной схемой ПС и его узлов (блок 21). Именно конструктивные схемы, выбранные и детально обоснованные на этом этапе расчётами, моделированием, испытаниями на макетах, служат основой для разработки конструкторской и технической документации по изготовлению ПС и его деталей и узлов. Конструктивные схемы являются неотъемлемой частью проекта, что качественно отличает этот этап от предыдущего.

На этапе ЭП осуществляется декомпозиция (разбиение) ПС на устройства, а устройства – на элементы (блок 8). Ведётся сложная кропотливая разработка и взаимная увязка этих устройств и элементов. Здесь критерии, условия и ограничения носят более детальный и конкретный характер. При этом сроки проектирования и стоимость разработки уменьшаются. Документация, выпускаемая на этом этапе, носит временный характер и служит для изготовления отдельных экспериментальных макетов и образцов устройств ПС. Такая документация содержит эскизы конструкций, технологические карты, монтажные схемы, условия технической эксплуатации и др.

По этой эскизной документации на опытном производстве изготавливают макеты деталей и узлов ПС. Макеты объединяются в комплексные стенды, на которых начинается реализация наиболее трудоёмких и слож-

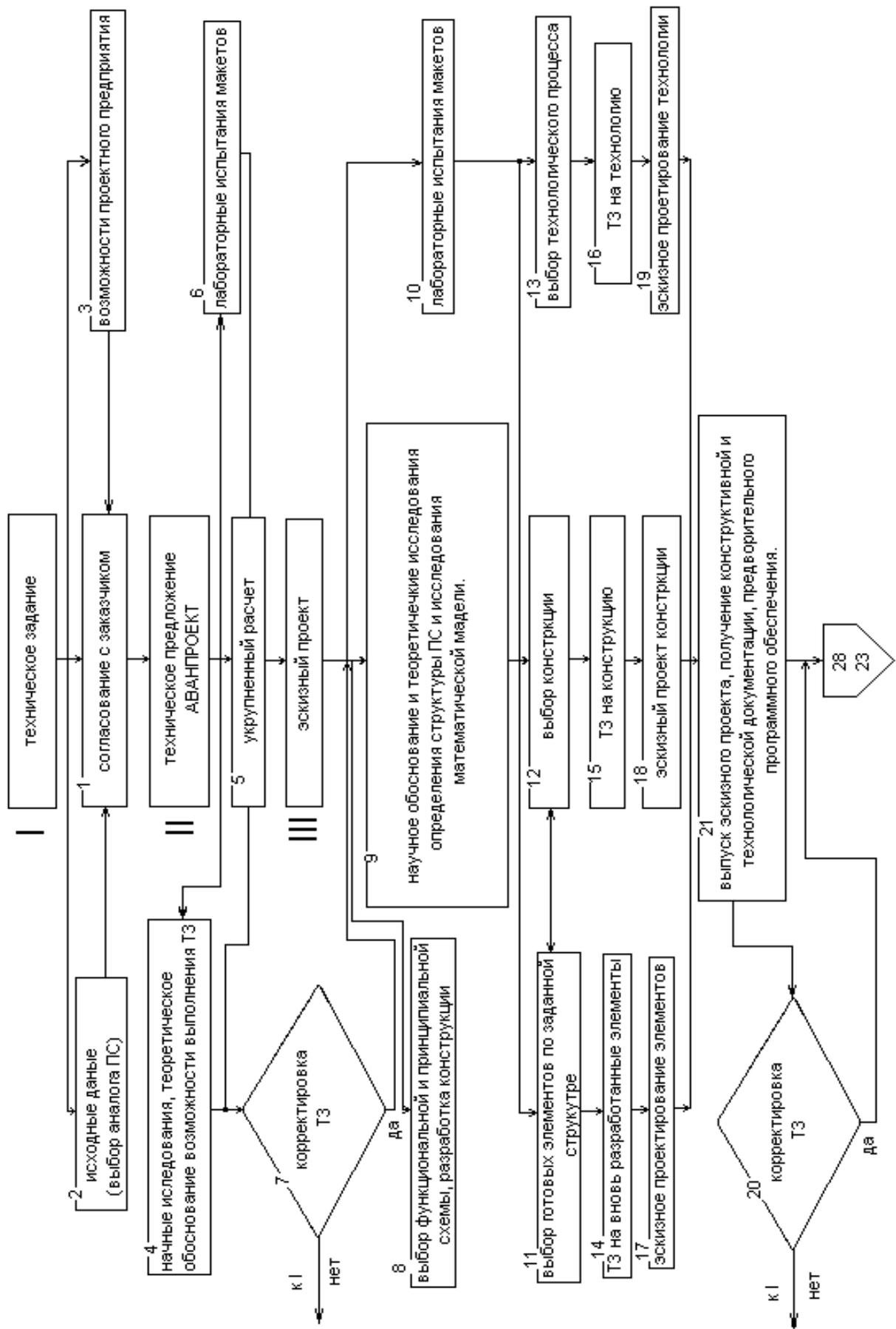


Рис. 2.1.2. Проектирование ПС согласно прототипу

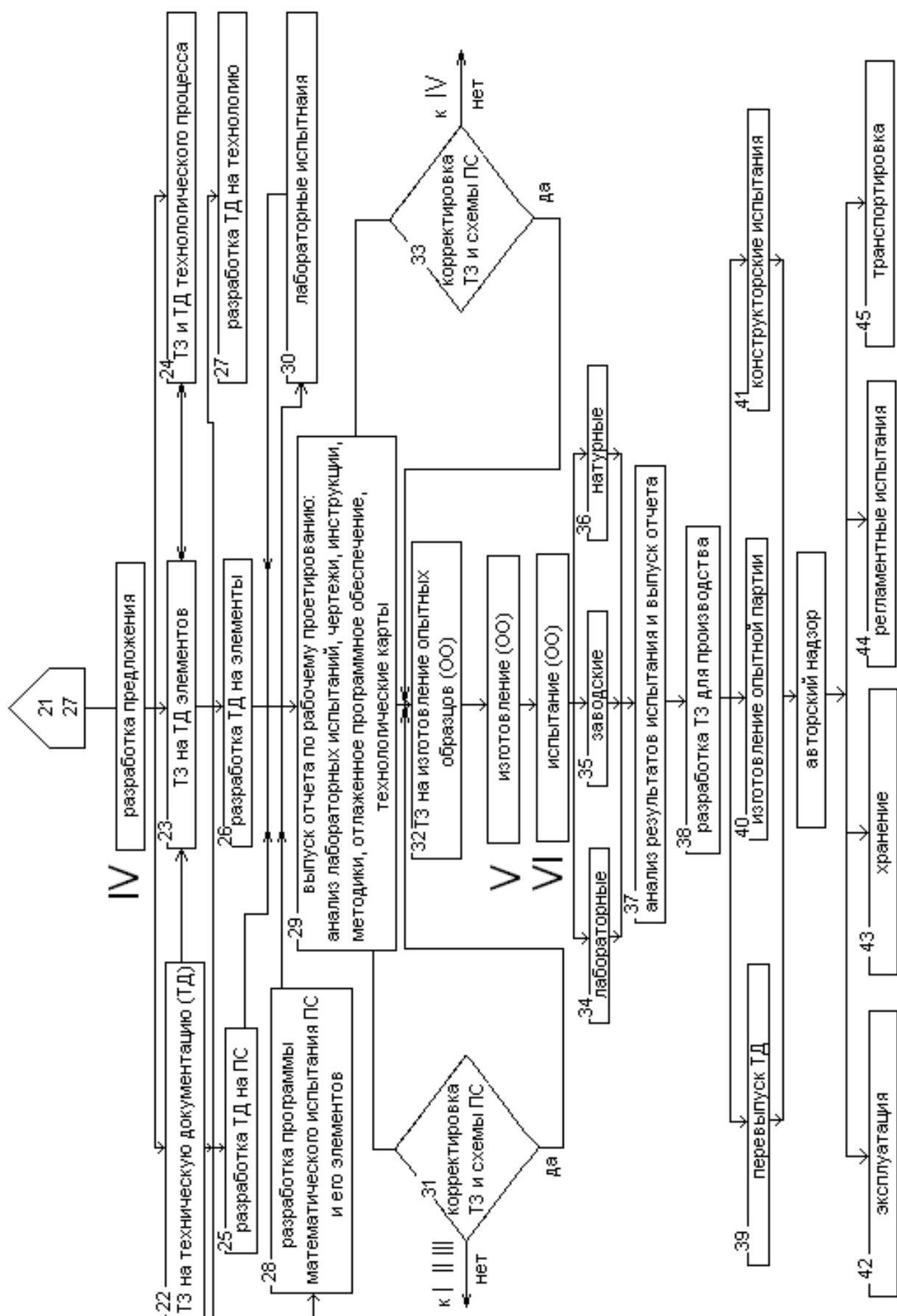


Рис. 2.1.2. Проектирование ПС согласно прототипу (продолжение)

ных проектных процедур ПС – анализ отдельных его устройств и элементов – методами стендовых испытаний и физического моделирования.

Кроме этого, на этапе эскизного проектирования составляется математическая модель, алгоритмы и решаются задачи анализа и синтеза ПС, оптимизации его параметров, вырабатываются вычислительные алгоритмы (блоки 9, 11, 12).

В дальнейшем проводятся конструкторские расчёты устройств ПС на прочность, жёсткость, предварительное согласование габаритных, установочных и присоединительных размеров изделия. Предварительно производят оценку показателей качества изделия, осуществляют и рассчитывают надёжность, проводят детальное технико-экономическое обоснование проекта.

Последний из предлагаемых этапов наиболее длинный и содержит 14 различных блоков. Если обратить внимание на структуру схемы, то можно заметить, что с левой стороны расположены блоки, которые отвечают за документооборот, в середине находятся блоки, выполняющие основную задачу процесса проектирования, а именно, выбор, расчёт и анализ, а справа расположены блоки, отвечающие за испытания и технологию. Для автоматизации процесса эскизного проектирования целесообразно автоматизировать блоки 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 и 21.

Проведённый анализ процесса проектирования ПС позволяет перейти к решению одной из важных задач при создании ИТ – выбору проектных процедур, подлежащих автоматизации. Для решения этой задачи необходимо формализовать процесс проектирования и составляющей его математической модели, с тем чтобы обоснованно и во взаимосвязи проводить автоматизацию проектных процедур.

Следует особо подчеркнуть проблемы, которые появляются при проектировании ПС, а именно [20, 21]:

1. Сложность и уникальность деталей ПС, конструирование которых осуществляется в трёхмерном пространстве.

2. Обеспечение прочности при разработке ПС и в процессе их эксплуатации.
3. Сравнительно низкий уровень межотраслевой и внутриотраслевой унификации и стандартизации деталей, узлов, проектных и конструкторских решений, что требует создания на каждом предприятии своей базы данных, содержащей уникальные математические, графические и информационные модели элементов.
4. Высокая стоимость этапа экспериментально-доводочных работ и стендовых испытаний, которые в несколько раз превышают стоимость этапа конструирования ПС.
5. Сложность и громоздкость математических моделей, описывающих рабочие процессы в ПС, что затрудняет процесс формализации проектирования.

Высокие требования, предъявляются и к конкретному проектировщику и группе проектировщиков сложного технического объекта. В настоящее время продолжительность проектирования сложного технического объекта превышает сроки определенные моральным износом и утратой конкурентоспособности изделия. Поскольку сложность объектов будет возрастать, а время проектирования должно сокращаться, можно сделать вывод, что единственно разумной альтернативой неавтоматизированного производства проектных работ может быть широкое использование САПР.

Практика разработки и эксплуатации САПР показала, что ряд особенностей построения автоматизированной системы может и должен быть оговорен и сформулирован до начала её проектирования.

Специфика проектирования ПС накладывает требования на структуру и организацию САПР, которая включает в себя следующее:

- ПС – это “старый” объект, расчётами и проектированием которого специалисты занимаются уже более 30 лет, следовательно, все принципиальные улучшения конструкции уже, как правило, внесены, а стремле-

ние к повышению технико-экономических показателей ПС заставляет проектировщиков всё глубже вникать в существо физических процессов, что достигается на пути последовательного усложнения математической модели и адекватного отражения процессов, протекающих в нём, в том числе и при различных режимах работы.

- Если трудоёмкость проектирования ПС принять за 100%, то трудоёмкость отдельных проектных процедур можно принять ориентировочно следующим образом: обзор существующих конструкций и определение патентной чистоты изделия $2\div 3\%$; выполнение расчётов $6\div 14\%$; проработка конструкции $12\div 20\%$; выполнение чертежей $37\div 55\%$; согласование технической документации $6\div 18\%$; оформление технической документации $9\div 16\%$.

Процесс автоматизации проектирования для ПС должен в себя включать следующие этапы [18]:

1. Поиск принципиальных проектных решений.
2. Разработка эскизного варианта конструкций и их оптимизация.
3. Уточнение и доработка выбранного варианта конструкции, выполнение полного детального расчёта.
4. Разработка полного комплекта чертежей.

Таким образом, для решения проблем проектирования ПС необходимо создание ИТ, которые позволяют обеспечить:

- высокий уровень проектирования, за счёт использования специального математического аппарата;
- повышение качества выполнения чертежа и возможность многократного использования чертежа;
- уменьшение времени на доработку конструкции за счёт ускорения аналитических расчётов при проектировании;
- сокращение сроков разработки конструкции за счёт сокращения затрат на усовершенствование (средства имитации и анализа позволяют резко

сократить затраты времени и средств на тестирование и усовершенствование прототипов);

- интеграцию проектирования с другими видами деятельности (более точная связь с другими инженерными подразделениями).

Учитывая сложность расчётов, жесткие ограничения по срокам и стоимости проектных работ, необходимо произвести анализ современных средств, математических моделей, а также методов проектирования автоматизированных систем.

2.2. Модель многокритериальной задачи принятия решений

Моделью многокритериальной задачи принятия решения в дальнейшем будем называть упорядоченную шестерку параметров:

$$G = (S, X, f, L, P, V), \quad (2.2.1)$$

где

S – множество решений (альтернатив, вариантов системы);

X – множество показателей;

f – отображение множества вариантов в множество векторных оценок;

L – множество постановок (типов) задач сравнения вариантов;

P – система предпочтений лица, принимающего решение;

V – множество возможных правил выбора решения (решающих правил).

Раскроем содержание элементов модели.

Множество S представляет собой совокупность вариантов системы, каждый из которых способен решить поставленную задачу управления, то есть ведёт к достижению поставленной задачи. Обычно в задаче проектирования систем управления множество вариантов конечно и формируется в результате усилий проектировщиков системы. Упорядочению процедуры

генерирования вариантов способствует построение дерева решений. При построении дерева решений множество решений возникает вследствие существования нескольких способов реализации задач нижнего уровня. Некой формализацией формирования множества вариантов является метод морфологического анализа. Этот метод основан на возможности разбиения проектируемой системы на ряд независимых подсистем, для каждой из которых имеется несколько способов реализации. Вариант построения системы возникает, если объединить в один набор по одной реализации каждой подсистемы. Получившиеся при этом недопустимые сочетания различных подсистем исключаются из анализа [31].

В многокритериальной задаче принятия решения качество варианта оценивается совокупностью показателей $X_1, X_2, \dots, X_m, m \geq 2$, которые полностью характеризуют систему при сравнении вариантов. К таким показателям относятся динамические, надёжностные, ресурсные, технологические и др. Существенным при формировании набора показателей X является требование различимости уровней (интенсивности) присущих вариантам свойств, определяемых показателями. Интенсивности свойств вариантов могут изменяться дискретно или непрерывно. Для измерений степени выраженности свойства разрабатывается оценочная шкала показателя, представляющая собой множество оценок $\{x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^r\}$. В дальнейшем используем для обозначения шкалы тот же символ что и для обозначения показателя – X_j . Шкалы, образующие множество X , могут быть числовые и нечисловые (вербальные) и относиться к различным типам шкал [32]. Наименее совершенной шкалой показателей, применяемых в многокритериальных задачах, является порядковая шкала. Показатели, имеющие порядковую шкалу, называются *качественными*. Значения качественного показателя имеет смысл сравнивать только по отношениям «больше», «меньше», «равно» – они сохраняются при монотонных преобразованиях.

Более совершенны количественные шкалы – шкала интервалов и шкала отношений. Шкала интервалов сохраняет отношение интервалов при умножении на положительное число k и добавлении произвольного числа l :

$$\frac{x^a - x^b}{x^c - x^d} = \frac{(kx^a + l) - (kx^b + l)}{(kx^c + l) - (kx^d + l)} = \text{const.}$$

На шкале отношений сохраняются отношения величин при умножении на положительное число $\frac{x^a}{x^b} = \frac{k x^a}{k x^b} = \text{const}$. Прямое произведение $Y = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$ образует множество векторных оценок. Множество X определяет пространство свойств вариантов [31].

Перечень показателей пьезокермических материалов, может стать основой при формировании системы показателей для решения конкретной задачи сравнения вариантов. Перечень должен охватывать, характерные для оценки пьезосканеров, основные группы показателей.

Отображение $f: S \rightarrow Y$ устанавливает соответствие множества векторных оценок Y множеству вариантов S . Отображение f строится на основе измерения интенсивности свойств каждого варианта из S по шкалам показателей X_1, X_2, \dots, X_m . Совокупность упорядоченных оценок по шкалам $(x_j^i, x_j^i, \dots, x_j^i, \dots, x_m^i)$, где x_j^i – оценка j -го показателя и является векторной y_i из Y вариантов $s_i, i=1, \dots, n$ из S . Обозначим векторные оценки вариантов Z . Обычно число векторных оценок в Y больше, чем число вариантов S , поскольку, с одной стороны, не все сочетания свойств, описываемые векторными оценками, могут быть реализованы в вариантах. С другой стороны, если бы каждой векторной оценке соответствовал вариант, то проблемы выбора не было бы, так как множество Y содержит вектор с максимальными оценками по всем показателям. Число векторных оценок вариантов в Z

может быть меньше числа вариантов в S , так как некоторые варианты могут иметь одинаковые векторные оценки. Будем считать, что векторные оценки Y/Z соответствуют гипотетическим вариантам. Отображение f при конечном числе вариантов удобно задавать таблицей $(m+1) \times n$, каждая строка которой содержит код (номер) варианта и m оценок по каждому показателю. В таблице 2.1 приведены выделенные варианты пьезосканеров и соответствующие им векторные оценки по десяти показателям [31].

Постановка задачи L зависит от целей лица, принимающего решение, в частности от этапа создания системы, на котором решается задача сравнения и выбора вариантов. Так, на этапе предэскизного и эскизного проектирования может потребоваться исключить из дальнейшей проработки худшие варианты. Такими могут быть признаны доминируемые варианты, у которых векторная оценка имеет равные и по крайней мере одну худшую оценку по показателям, чем векторная оценка какого-либо другого варианта.

Таблица 2.1

Варианты пьезосканеров и соответствующие им векторные оценки

S	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
S ₁	x_1^2	x_2^2	x_3^1	x_4^2	x_5^2	x_6^3	x_7^2	x_8^2	x_9^1	x_{10}^1
S ₂	x_1^1	x_2^2	x_3^3	x_4^2	x_5^2	x_6^1	x_7^2	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S ₃	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^2	x_5^3	x_6^2	x_7^4	x_8^1	x_9^1	x_{10}^1
S ₄	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^3	x_5^3	x_6^1	x_7^4	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S ₅	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^1	x_5^1	x_6^3	x_7^1	x_8^2	x_9^1	x_{10}^2
S ₆	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^2	x_5^1	x_6^2	x_7^1	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S ₇	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^2	x_5^3	x_6^3	x_7^3	x_8^2	x_9^1	x_{10}^1
S ₈	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^3	x_5^2	x_6^2	x_7^3	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1

На этапе рабочего проектирования при создании опытных образцов возникает задача выделения заданного числа лучших вариантов, в серийное производство передается один, наиболее предпочтительный. В некоторых случаях может потребоваться упорядочение представленных вариантов, чтобы затем провести границу между перспективной и неперспективной группами вариантов. Таким образом, некоторые постановки задачи принятия решений можно связать с конкретными этапами создания ПС.

При сравнении и оценке вариантов по совокупности свойств предполагается, что лицо, принимающее решение, может сопоставлять и делать вывод о предпочтительности интенсивностей различных свойств, изменений интенсивностей свойств, сочетаний интенсивностей различных свойств на основе своих представлений о ценности свойств. Эти представления и образуют систему предпочтений P . Обычно предполагается, что ЛПР, высказывая суждения, действует рационально, то есть остается последовательным, не допускает противоречий и т.д. Формально, при таком способе получения информации о предпочтениях, система описывается отношениями предпочтения на множествах векторных оценок.

Решающее правило (метод принятия решений) определяет принцип сравнения векторных оценок с целью установления предпочтительности одних из них по отношению к другим. Оно может быть представлено аналитическим выражением или алгоритмом. Решающее правило должно учитывать: особенность используемой в задаче информации о предпочтениях ЛПР, имеющиеся ограничения и принятые допущения, тип решаемой многокритериальной задачи [31]. Этим обусловлено большое число предлагаемых решающих правил, и одна из трудностей решения многокритериальных задач связана с выбором решающего правила, адекватного поставленной задаче. Например, выделение недоминируемых вариантов осуществляется на основе правила, задающего частичный на множестве вариантов. Если решающее правило допускает упорядочение элементов

множества вариантов, то процесс упорядочения автоматически определяет любое требуемое число вариантов, которые являются более предпочтительными по сравнению с другими. Если ЛПР действует рационально, то оно должно согласиться с предлагаемым решением. Иначе следует пересмотреть решающее правило или информацию о цели, показателях и оценках по показателям.

Решающее правило в задачах выбора наиболее предпочтительного варианта и полного упорядочения на множестве вариантов часто имеет вид функций, зависящих от оценок вариантов по всем показателям. С этой целью вводится новое понятие (ценность, полезность, важность), с помощью которого удается сформулировать решающее правило. Если ЛПР строит свои действия на основе определенных допущений, то на множестве векторных оценок Y может быть определена функция полезности, связывающая это множество со множеством чисел. Используя методы теории полезности, информацию о предпочтениях ЛПР преобразуют в численную информацию о полезности свойств вариантов. Затем эту численную информацию применяют для вычисления полезностей реальных вариантов. Полученные результаты сравнения численных значений полезностей вариантов вновь преобразуются в суждения о предпочтении [31].

В соответствии с моделью многокритериальной задачи (2.2.1) в процедуре принятия решения можно выделить следующие этапы:

- постановка задачи принятия решения;
- составление перечней вариантов и показателей, которые должны учитываться при оценке каждого варианта;
- разработка оценочных шкал для всех показателей;
- формирование оценок всех вариантов по каждому показателю – получение векторных оценок вариантов;
- выявление структуры предпочтений лица, принимающего решение;
- формирование решающего правила;

- оценка предпочтительности вариантов на основе решающего правила;
- принятие решения.

Каждому этапу соответствуют свои источники информации и методы получения результата. Основным источником информации служат эксперты. Разработку методов, применяемых в процедуре сравнения вариантов, осуществляют специалисты по принятию решений. Таким образом, в процессе принятия решения наряду с ЛПР, участвуют ещё две категории лиц: консультанты-исследователи – специалисты по принятию решений; эксперты – специалисты в области проектирования и исследования систем управления.

Это деление условно. Вся работа может выполнять один человек или в каждом направлении будет работать коллектив, но содержание работ должно сохраниться. Если в задаче индивидуального принятия решений в качестве ЛПР выступает коллектив, то рассматривается согласованное мнение группы лиц.

2.3. Сравнение вариантов на основе порядковой шкалы оценок и на основе интегральной шкалы полезности оценки по показателям

2.3.1. Сравнение вариантов пьезосканеров на основе порядковой шкалы оценок по показателям

Рассмотрим задачу сравнения вариантов пьезосканеров по совокупности показателей на основе порядковой шкалы оценок. Для сравнения применим данные об объективных, физических свойствах вариантов, не затрагивающие вопросы индивидуальной, субъективной оценки полезно-

сти свойств вариантов ЛПР. Пусть для сравнения представлены варианты $s_1, s_2 \dots s_n, n \geq 2$, которые характеризуются показателями $X_1, X_2, \dots, X_m, m > 2$.

Тогда оценки по показателям образуют векторные оценки

$$y \in Y = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$$

следующего вида [31]:

$$y = (x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Каждому варианту $s_i \in S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ соответствует векторная оценка

$$Y_i = f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i),$$

где x_j^i – оценка i -го варианта по показателю X_j ; $x_j^i \in X_j$; $i = 1 \dots n$; $j = 1 \dots m$.

Оценки вариантов по каждому показателю x_j^i могут быть получены непосредственным измерением и с помощью специалистов-экспертов или ЛПР. На степень объективности оценок влияют характер показателя, тип шкалы и участие эксперта в процессе получения оценок. Наиболее достоверны оценки, полученные по числовым шкалам в результате аналитических расчётов или непосредственного измерения (при условии, что расчёты или измерения выполнены правильно). При оценке по вербальным шкалам разные эксперты могут дать различные оценки вариантам. Тогда применяют процедуры согласования мнений специалистов или построения усреднённой оценки. В дальнейшем все показатели будем считать однонаправленными, т. е. с возрастающей интенсивностью свойства от начала шкалы показателя. Векторные оценки вариантов $f(s_i), i = 1, 2, \dots, n$, могут быть при некоторых условиях непосредственно использованы для сравнения. Рассмотрим эти условия. Используем для обозначения пространства векторных оценок, не содержащего оценок по показателю X_j , символ

$$Y_j^- = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_{j-1} \times X_{j+1} \times X_m, \quad (2.3.1)$$

а элементов этого пространства – y_j^- . Считаем, что показатель x_j независим по предпочтению от остальных показателей, если порядок предпочтения векторных оценок (x_j^i, y_j^-) , $i=1..r_j$ с фиксированным y_j^- – остается неизменным независимо от значения y_j^- . Здесь r_j – число оценок по показателю X_j .

В этом случае оценки каждого показателя могут быть упорядочены по отношению «не менее предпочтительно, чем»

$$x_j^{r_j-1} \geq x_j^{r_j} \geq \dots \geq x_j^1, \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (2.3.2)$$

Однако порядок оценок в (2.3.2) может не совпадать с порядком оценок по шкале показателя, если не будет выполняться второе условие, а именно что большие значения оценок по каждому показателю предпочтительнее меньших. Другими словами, векторная оценка $y=(x_j, y_j^-)$ предпочтительнее векторной оценки $y'=(x'_j, y_j^-)$, которая получена из y заменой x_j на $x'_j \in X_j$ при любом $j \in \{1, 2, \dots, m\}$. Это условие реализует «принцип монотонности» изменения свойств варианта.

При соблюдении условий независимости каждого показателя от остальных и монотонности оценки, полученные варьированием ПС, делают возможным выделение подмножества неподчиненных векторных оценок Z_0 и соответствующего ему подмножества неподчиненных вариантов S_0 . Векторная оценка принадлежит множеству неподчиненных оценок Z_0 , если среди векторных оценок представленных вариантов не содержится более предпочтительной, то есть такой, которая имеет хотя бы по одному показателю более предпочтительную оценку, а по остальным – не менее предпочтительную. Вариант $s^* \in S$ принадлежит множеству неподчиненных вариантов S_0 , если его векторная оценка $f(s^*)$ принадлежит множеству неподчиненных оценок Z_0 [31].

Множество неподчиненных оценок (вариантов) называют также эф-

фективными оценками, неулучшаемыми оценками, множеством Парето, областью компромиссов.

Легко видеть, что наиболее предпочтительный вариант, выбираемый на основе многокритериального подхода, независимо от решающего правила, всегда должен принадлежать множеству неподчинённых вариантов, иначе в множестве S найдется вариант более предпочтительный. Множество Парето – область потенциально наилучших решений. Среди неподчинённых вариантов находятся решения, имеющие высшие оценки по одному из локальных показателей. Следовательно, при выборе варианта по совокупности показателей поиск наиболее предпочтительного решения можно ограничить множеством Парето, которое содержится в множестве представленных для анализа вариантов. В этом состоит практический результат выделения множества неподчинённых вариантов.

Анализ вариантов s_1, s_2, \dots, s_n осуществляется на основе анализа матрицы векторных оценок всех вариантов по всем показателям $\|x_j^i\|$ путём покоординатного сравнения пар векторных оценок вариантов из $\{S\}$.

Возможны три результата сравнения:

1) вариант s_i более предпочтителен, чем вариант s_g ($s_i > s_g$), если все оценки вектора $f(s_i)$ не хуже, а по крайней мере одна оценка лучше оценок вектора $f(s_g)$;

2) варианты s_i и s_g эквивалентны в смысле предпочтения ($s_i \sim s_g$), если оценки по показателям одинаковы;

3) варианты s_i и s_g несравнимы ($s_i \Delta s_g$), если оценки по крайней мере по двум показателям l и k таковы, что одновременно $x_l^i > x_l^g$ и $x_k^i > x_k^g$, $j, k \in \{1, 2, \dots, m\}, l \neq k$.

Совокупность несравнимых вариантов и вариантов, эквивалентных им образуют множество неподчинённых вариантов S_0 . Алгоритм выделения множества неподчинённых вариантов представлен на рис. 2.3.1.

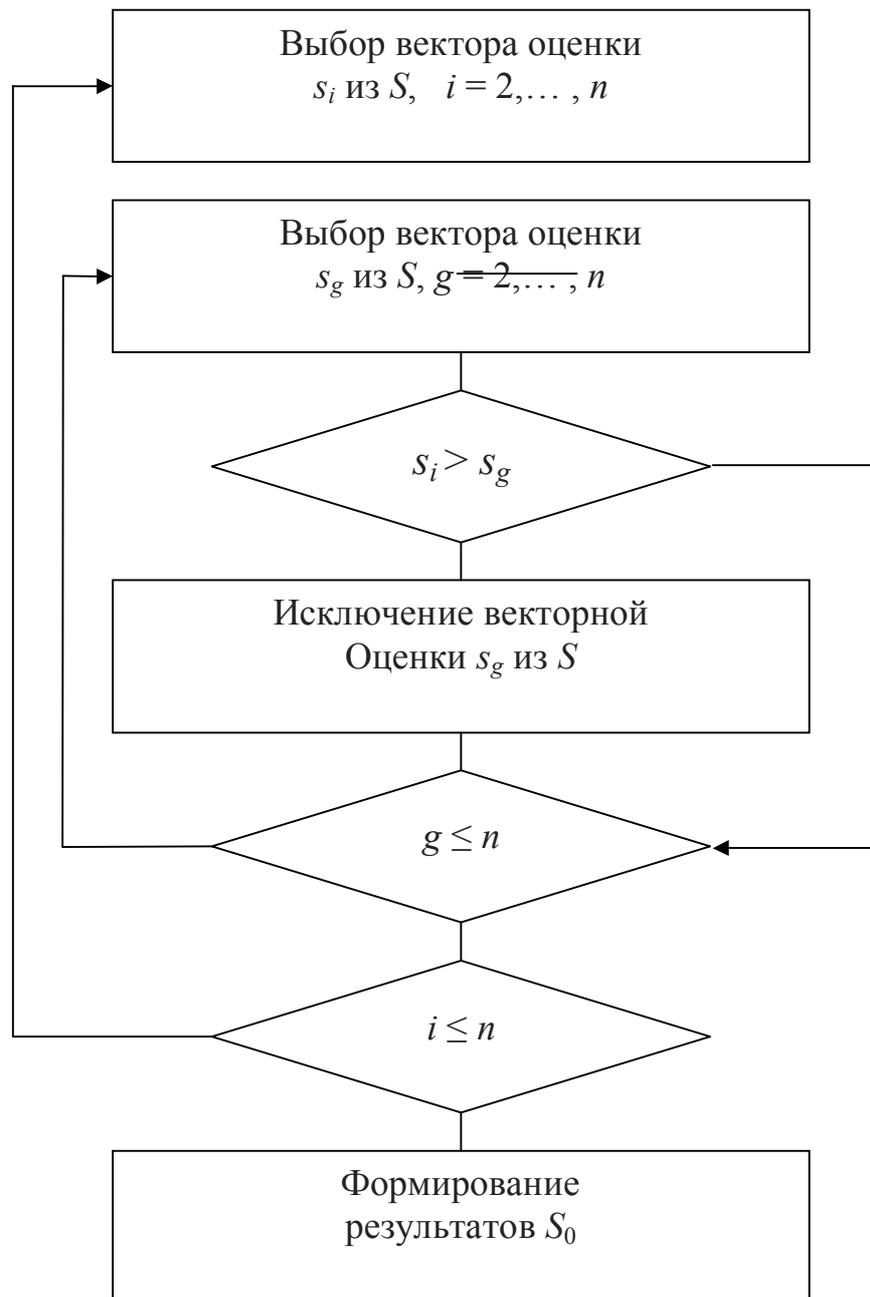


Рис. 2.3.1. Алгоритм выделения множества неподчинённых вариантов

Для выполнения необходимых операций варианты перенумеровывают и им приписывают соответствующие векторные оценки. Векторная оценка $f(s_i)$ варианта s_i из множества S поочерёдно сравнивается с вектор-

ными оценками $f(s_g)$ вариантов s_g того же множества. Производится поординатное сравнение двух векторных оценок. Если вариант s_i более предпочтителен, чем вариант s_g , то вариант s_g исключают из S . Если вариант s_g не менее предпочтителен, то его оставляют в множестве S . Затем для сравнения выбирают следующий вариант s_{g+1} из множества S . После сравнения с последним вариантом s_g выбирают следующий вариант s_{i+1} и сравнивают с оставшимися вариантами s_g . Таким образом, исключаются все доминируемые варианты, а оставшиеся образуют множество неподчинённых вариантов $\{s^*\}$ [31].

Выделение множества неподчинённых вариантов может способствовать выбору наиболее предпочтительного варианта, но только в исключительных случаях приводит сразу к выделению одного варианта. Число вариантов в множестве Парето зависит от расположения векторных оценок $f(s_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ в пространстве значений показателей. Как правило, их значительно больше, чем требуется для решения задачи выбора вариантов. На то, что делать дальше с множеством неподчинённых решений, существует несколько точек зрения. Предлагается, например, выбрать вариант с помощью механизма случайного выбора, предполагая, что выбор между неподчинёнными вариантами безразличен для ЛПР. Этот путь связан с отказом от дальнейшего анализа задачи.

Разработаны принципы, на основе которых возможно сужение множества неподчинённых вариантов. Однако доминирующей стала точка зрения, предлагающая использовать для выделения предпочтительных вариантов дополнительную информацию о предпочтительности свойств варианта, которая должна быть получена у ЛПР, экспертов или в результате исследования моделей, построенных для анализа задачи.

2.3.2. Сравнения вариантов пьезосканеров на основе интервальной шкалы оценок по показателям

Для сравнения вариантов на основе интервальной шкалы оценок по показателям, необходима информация о предпочтительности изменения свойств при изменении оценок по показателям, которая отражает систему предпочтений ЛПР. Информацию такого рода можно получить от ЛПР, предлагая ему сравнить варианты пьезосканеров, векторные оценки которых имеют различные оценки по двум показателям, причём по одному показателю – лучшую, а по другому – худшую при равенстве оценок по остальным показателям. Задачи сравнения векторных оценок такого вида считаются простейшими. С увеличением числа показателей, по которым варианты имеют различные оценки, трудность задачи сравнения возрастает. Дополнительная информация рассмотренного вида может быть использована для сравнения вариантов, представленных в задаче различными моделями [31]. Рассмотрим сравнение вариантов при независимости показателей по предпочтению.

Интервалы между оценками на шкалах показателей могут быть упорядочены по предпочтению на основе дополнительной информации, полученной от ЛПР, при независимости показателей по предпочтению.

Используем для обозначения пространства векторных оценок, не содержащего показателей X_i и X_k , $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_{j-1} \times X_{j+1} \times \dots \times X_{k-1} \times X_{k+1} \times \dots \times X_m$ символ Y_{ik} , а элементы этого пространства обозначим y_{ik} . Рассмотрим две векторные оценки x_j^1, x_k^2, y_{ik} и x_j^2, x_k^1, y_{ik} , такие, что $x_j^2 > x_j^1$ и $x_k^2 > x_k^1$. Пусть первая векторная оценка предпочтительнее второй. Очевидно, предпочтительность первой оценки обусловлена предпочтительностью изменения оценки x_j^1 на оценку x_j^2 по сравнению с изменением оценки x_k^1 на оцен-

ку x_k^2 . Будем считать показатели X_i, X_k независимыми по предпочтению от остальных показателей, если предпочтение между изменениями оценок показателей X_i, X_k остается неизменным при любых значениях остальных показателей. Независимость по предпочтению позволяет использовать результаты сравнения интервалов для сравнения произвольных векторных оценок из Y [31].

Рассмотрим произвольные векторные оценки $y_i, y_g \in Y$:

$$\begin{aligned} y_i &= (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i); \\ y_g &= (x_1^g, x_2^g, \dots, x_m^g), \\ i, g &\in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq g. \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Интервалом между векторными оценками $y_i, y_g \in Y$ называется вектор, элементами которого являются интервалы между оценками вариантов на шкалах соответствующих показателей:

$$(y_i, y_g) = (x_1^i, x_1^g; x_2^i, x_2^g; \dots; x_m^i, x_m^g). \quad (2.3.4)$$

Поскольку оценка по показателю X_i векторной оценки y_i , может быть более предпочтительной, равной или менее предпочтительной, чем оценка по тому же показателю X_i векторной оценки y_g , то интервалы между оценками вариантов s_i и s_g на шкалах показателей $X_j, j=1, \dots, m$, входящие в интервал между векторными оценками (y_i, y_g) , могут быть разбиты на три подмножества:

1. Интервалы, у которых более предпочтительная оценка по шкале показателя принадлежит первой векторной оценке интервала между векторными оценками, обозначим $\frac{ig}{j}$.
2. Интервалы, ограниченные равными оценками соответствующих показателей вариантов s_i и s_g («пустые» интервалы), обозначим 0.

3. Интервалы, у которых менее предпочтительная оценка по шкале показателя принадлежит первой векторной оценке интервала между векторными оценками, обозначим $\frac{g^i}{k}$.

Таким образом, интервал между векторными оценками можно представить в следующей форме

$$(y_i, y_g) = (\{\frac{ig}{j}\}, \{0\}, \{\frac{g^i}{k}\}), \quad j, k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad j \neq k.$$

Сравнение по предпочтению векторных оценок двух вариантов, различающихся оценками по двум показателям X_i и X_k проводимое ЛПР, устанавливает отношение нестрогого предпочтения между интервалами на шкалах этих показателей:

$$\frac{ig}{j} > \frac{g^i}{k},$$

где $j, k \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j \neq k$, $i, g \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \neq g$, поскольку интервалы между равными оценками «пустые».

При выполнении предположения о независимости показателей по предпочтению, отношение предпочтения между интервалами не меняется при изменении значений других оценок, и может быть использовано при сравнении различных пар вариантов. С помощью отношения нестрогого предпочтения на множестве интервалов между оценками показателей можно задать отношения строгого предпочтения P , безразличия I и несравнимости N , на множестве векторных оценок Y и соответственно отношения строгого предпочтения $>$, безразличия \sim и несравнимости Δ , на множестве вариантов S . Запишем условия предпочтительности, безразличия и несравнимости двух произвольных векторных оценок (2.3.3).

1. Векторная оценка y_i предпочтительнее векторной оценки y_g ($y_i P y_g$), если каждому интервалу из $\{\frac{g^i}{k}\}$ можно поставить в соответствие такой интервал из $\{\frac{ig}{j}\}$, что для всех пар будет $\frac{ig}{j} > \frac{g^i}{k}$ и по крайней мере

одно неравенство будет строгим.

2. Векторные оценки y_i и y_g равноценны ($y_i I y_g$), если можно составить такие пары $(\overset{ig}{j} \geq \overset{gi}{k}) \wedge (\overset{gi}{k} \geq \overset{ig}{j})$ интервалов $\overset{gi}{k}$ и $\overset{ig}{j}$ что для всех $k, i \in \{1, 2, \dots, m\}$.

3. Векторная оценка y_i несравнима с векторной оценкой $y_g(y_i I y_g)$, если невозможно каждому интервалу из $\{\overset{gi}{k}\}$ поставить в соответствие не менее предпочтительный интервал из $\{\overset{ig}{j}\}$.

Введённые отношения позволяют сформулировать достаточные условия предпочтительности вариантов, основанные на упорядочении оценок по показателям, и выделить множество предпочтительных вариантов S_i .

Пусть требуется сравнить произвольные варианты s_i и s_g , которым соответствуют векторные оценки $f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$ и $f(s_g) = (x_1^g, x_2^g, \dots, x_m^g)$.

Обозначим $\max(x_i, x_g) = \hat{x}_j$, а $\min(x_i, x_g) = \overset{\vee}{x}_j$. Рассмотрим векторные оценки специального вида $f(j) = (\overset{\vee}{x}_1, \overset{\vee}{x}_2, \dots, \overset{\vee}{x}_j, \dots, \overset{\vee}{x}_m)$, особенностью которых является то, что оценка по шкале показателя: $X_j - \overset{\vee}{x}_j$, а по шкалам других показателей — $\overset{\vee}{x}_k, k=1, 2, \dots, m, k \neq j$. Варианты $j, j=1, 2, \dots, m$, соответствующие таким векторным оценкам, иногда называют опорными ситуациями [46]. Из вариантов j образуются пары, предъявляемые ЛПР, для сравнения.

Если по результатам сравнения варианты будут упорядочены:

$$j_1 \geq j_2 \geq \dots \geq j_k \geq \dots \geq j_m,$$

то это индуцирует упорядочение векторных оценок

$$f(j_1) \geq f(j_2) \geq \dots \geq f(j_k) \geq \dots \geq f(j_m). \quad (2.3.5)$$

В выражениях j_k и $f(j_k)$, $j, k \in \{1, 2, \dots, m\}$, индекс j означает номер показателя, по которому векторная оценка имеет оценку $\overset{\vee}{x}_j$, а индекс k – место варианта или векторной оценки в упорядоченном ряду, начиная с наиболее предпочтительного.

Установлена связь между результатами сравнения «опорных ситуаций» и упорядочением по предпочтению интервалов между оценками на шкалах показателей. Если ЛПР может проводить непосредственное сравнение интервалов, то этап обработки информации о предпочтениях исключается [34].

В соответствии с (2.3.4) интервал между векторными оценками $f(s_i)$ и $f(s_g)$ имеет вид

$$(f(s_i), f(s_g)) = (x_1^i, x_1^g; x_2^i, x_2^g; \dots; x_m^i, x_m^g).$$

Обозначим элементы интервалов между векторными оценками

$$(x_j^i, x_j^g) = a_j(\hat{x}_j, \overset{\vee}{x}_j); \quad j=1, 2, \dots, m,$$

где

$$a_j = \begin{cases} 1, \text{если } \hat{x}_j \in f(s_i); \\ 0, \text{если } \hat{x}_j = \overset{\vee}{x}_j; \\ -1, \text{если } \hat{x}_j \in f(s_n). \end{cases}$$

Тогда

$$(f(s_i), f(s_g)) = (a_1(\hat{x}_1, \overset{\vee}{x}_1), a_2(\hat{x}_2, \overset{\vee}{x}_2), \dots, a_m(\hat{x}_m, \overset{\vee}{x}_m)). \quad (2.3.6)$$

Расположим элементы в (2.3.6) в соответствии с упорядочением интервалов в (2.3.3)

$$(f(s_i), f(s_g)) = (a_{j_1}(\hat{x}_{j_1}, \overset{\vee}{x}_{j_1}), a_{j_2}(\hat{x}_{j_2}, \overset{\vee}{x}_{j_2}), \dots, a_{j_m}(\hat{x}_{j_m}, \overset{\vee}{x}_{j_m})). \quad (2.3.7)$$

Здесь, как и ранее, первый нижний индекс указывает номер показателя в задаче сравнения вариантов, второй - определяет упорядочение интервалов между оценками на шкалах показателей, полученное в результате опроса ЛПР.

Выражение (2.3.7) позволяет сформулировать достаточные условия справедливости утверждений $s_i \geq s_g$ и $s_g \geq s_i$.

Для определения предпочтительности той или иной векторной оценки и соответствующего ей варианта следует подсчитать

$$\sum_{k=1}^r a_j, r = 1, 2, \dots, m.$$

Тогда

$$f(s_i) \geq f(s_g), \text{ если } \sum_{k=1}^r a_j \geq 0, r = 1, 2, \dots, m; \quad (2.3.8)$$

$$f(s_g) \geq f(s_i), \text{ если } \sum_{k=1}^r a_j \geq 0, r = 1, 2, \dots, m. \quad (2.3.9)$$

Таким образом, выполнение (2.3.8) является достаточным условием справедливости утверждения $s_i \geq s_g$, а выполнение (2.3.9) – $s_g \geq s_i$. В случае выполнения и (2.3.8) и (2.3.9) варианты эквивалентны, а при невыполнении и (2.3.8) и (2.3.9) варианты оказываются несравнимыми по сформулированному выше решающему правилу выбора наиболее предпочтительного варианта при независимости показателей по предпочтению.

Отметим, что рассмотренная процедура сравнения двух вариантов при независимости показателей по предпочтению делится на два этапа: выявление системы предпочтений эксперта; проверка условий предпочтительности одного из вариантов.

Выделение подмножества предпочтительных вариантов и эквивалентных им по предпочтению S_1 из множества вариантов $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$

возможно в результате многократного применения процедуры попарного сравнения. В результате будут исключены из дальнейшего рассмотрения варианты, доминируемые по отношению P , при имеющейся информации о предпочтениях ЛПР. Однако при такой организации процедуры сравнения вариантов возникает ряд трудностей, главные из которых связаны с выявлением предпочтений ЛПР. В этом случае процесс сбора информации о предпочтениях распадается на ряд мелких операций, разнесённых во времени. Главная трудность связана с возможным появлением противоречивости в суждениях ЛПР. При сравнении различных пар вариантов могут возникать одинаковые интервалы между оценками на шкалах показателей, которые в разное время будут предъявляться для сравнения эксперту или ЛПР. За время, прошедшее между предъявлениями, ЛПР может изменить свое суждение о предпочтительности интервалов, что может остаться незамеченным [34]. Поэтому целесообразно этапы процедуры выявления системы предпочтений реализовать на множестве вариантов $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, а затем проводить их попарное сравнение. Заметим, что при сравнении векторных оценок, отличающихся оценками по двум показателям и имеющих одинаковые оценки по остальным $(m-2)$ показателям, происходит упорядочение двух интервалов, то есть с каждой парой векторных оценок связана пара интервалов на шкалах показателей. Верно и обратное. Для каждой пары интервалов на шкалах разных показателей можно построить векторные оценки и предъявить эксперту для сравнения. Поэтому в дальнейшем будем говорить о сравнении интервалов между оценками как о результате сравнения векторных оценок. В начале опроса следует проводить сравнение интервалов между соседними оценками на шкале показателей. При этом окажутся упорядоченными и некоторые интервалы между произвольными оценками на шкалах показателей, например при выполнении соотношения [31]:

$$[(x_j^i, x_j^g) \geq (x_k^i, x_k^g)] \cup [(x_j^i, x_j^r) \geq (x_k^g, x_k^r)] \Rightarrow [(x_j^i, x_j^g) \cup x_j^i, x_j^r] \geq \\ \geq [(x_j^i, x_j^g) \cup x_k^g, x_k^r] = (x_j^i, x_j^r) \geq (x_k^i, x_k^r).$$

В тех случаях, когда такие условия не выполняются, проводится сравнение интервалов между произвольными оценками. В силу предположения о независимости показателей по предпочтению отношение нестрогого предпочтения между интервалами сохраняется при различных значениях оценок по другим показателям. В результате опроса ЛПР будет построено отношение нестрогого предпочтения на множестве интервалов между оценками по показателям $X_j, j = 1, 2, \dots, m$. Для удобства представления и обработки полученной информации поставим в соответствие каждому интервалу Δ_j^{ig} на шкале показателя число δ_j^{ig} , такое, что

$$\Delta_j^{ig} \geq \Delta_k^{gi} \Leftrightarrow \delta_j^{ig} \geq \delta_k^{gi}, \quad i, g \in \{1, 2, \dots, n\}; \\ j, k \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

С тем же успехом числа можно присваивать и оценкам на шкалах показателей, но при этом

$$\Delta_j^{ig} \geq \Delta_k^{gi} \Leftrightarrow (\delta_j^i - \delta_j^g) \geq (\delta_k^g - \delta_k^i).$$

В дальнейшем будем пользоваться последним соотношением. Таким образом, осуществляется переход к системе однородных линейных неравенств.

В дальнейшем будем пользоваться последним соотношением. Таким образом осуществляется переход к системе однородных линейных неравенств

$$\sum_{g=1}^N a_{jg} \delta_g \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad g = 1, 2, \dots, N; \quad \delta_g \geq 0, \quad (2.3.10)$$

где

M – число сравнений интервалов в эксперименте;

$N = \sum_{j=1}^m r_j$ – число оценок на шкалах показателей;

r_j – число оценок на шкале показателя X_j .

Общее решение системы однородных линейных неравенств представляется в виде неотрицательной комбинации её фундаментальных точек A_1, A_2, \dots, A_p :

$$A = k_1 A_1 + k_2 A_2 + \dots + k_p A_p,$$

где k_1, k_2, \dots, k_p – произвольные неотрицательные числа.

Координаты точек

$$\begin{aligned} A_1 &= (\delta_{11}, \delta_{12}, \dots, \delta_{1N}); \\ A_2 &= (\delta_{21}, \delta_{22}, \dots, \delta_{2N}); \\ &\dots \\ A_p &= (\delta_{p1}, \delta_{p2}, \dots, \delta_{pN}), \end{aligned}$$

соответствуют допустимым значениям оценок по показателям, согласованным с предпочтениями ЛПР, но только общее решение A отображает отношение предпочтения, выявленное при опросе ЛПР. При использовании полученных численных значений оценок по шкалам показателей для оценки вариантов могут встретиться два случая [31]:

1. В любой точке A для двух произвольных вариантов $s_i, s_g \in \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ справедливо $s_i \geq s_g$ либо $s_g \geq s_i$.
2. Для двух произвольных вариантов s_i, s_g множество точек A разбивается на две части, в одной из которых справедливо $s_i \geq s_g$, а в другой $s_g \geq s_i$.

Второй случай показывает, что информации, полученной от ЛПР, недостаточно для упорядочения вариантов проекта. Вариант s_i , не менее предпочтителен, чем вариант s_g (или наоборот), в любой точке A , если он не менее предпочтителен во всех точках A_1, A_2, \dots, A_p .

Предпочтительные варианты множества $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ выделяются путем отсеивания менее предпочтительных вариантов при попарном сравнении. Алгоритм сравнения вариантов при независимости показателей по предпочтению приведен на рис. 2.3.2. Векторная оценка $f(s_i)$ варианта s_i , поочередно сравнивается с векторными оценками $f(s_g)$, $g = i+1, i+2, \dots, n$ других вариантов. Для каждой пары вариантов определяют интервал между векторными оценками путем покоординатного вычитания векторной оценки $f(s_g)$ из векторной оценки $f(s_i)$. Численные значения координат векторных оценок получают при совместном решении неравенств (2.3.10), описывающих систему предпочтений ЛПР. Элементы интервала между оценками содержат информацию как о предпочтительности данного интервала между оценками (численное значение), так и о принадлежности большей оценки интервала к одной или другой векторной оценке (знак интервала). Операция по разбиению элементов интервала между векторными оценками на два подмножества $\{+\Delta_j\}$ и $\{-\Delta_k\}$ может быть совмещена с упорядочением элементов в каждом подмножестве. С этой целью достаточно провести упорядочение элементов интервала между векторными оценками, начиная с наибольшего положительного. Попарное сравнение элементов левой и правой половин интервала по абсолютному значению, начиная с крайних элементов, позволяет установить тип отношений между векторными оценками $f(s_i)$ и $f(s_g)$. Сравнение векторных оценок проводят во всех точках A_1, A_2, \dots, A_p . Если какая-либо векторная оценка оказывается менее предпочтительной, её исключают из дальнейшего анализа. Несравнимые векторные оценки остаются в множестве предпочтительных векторных оценок. Таким образом, рассматривают все пары векторных оценок и менее предпочтительные векторные оценки исключают. Заметим, что выделенное множество предпочтительных вариантов S_1 , множество неподчиненных вариантов S_0 и исходное множество вариантов S находятся в соотношении $S_1 \subseteq S_0 \subseteq S$.

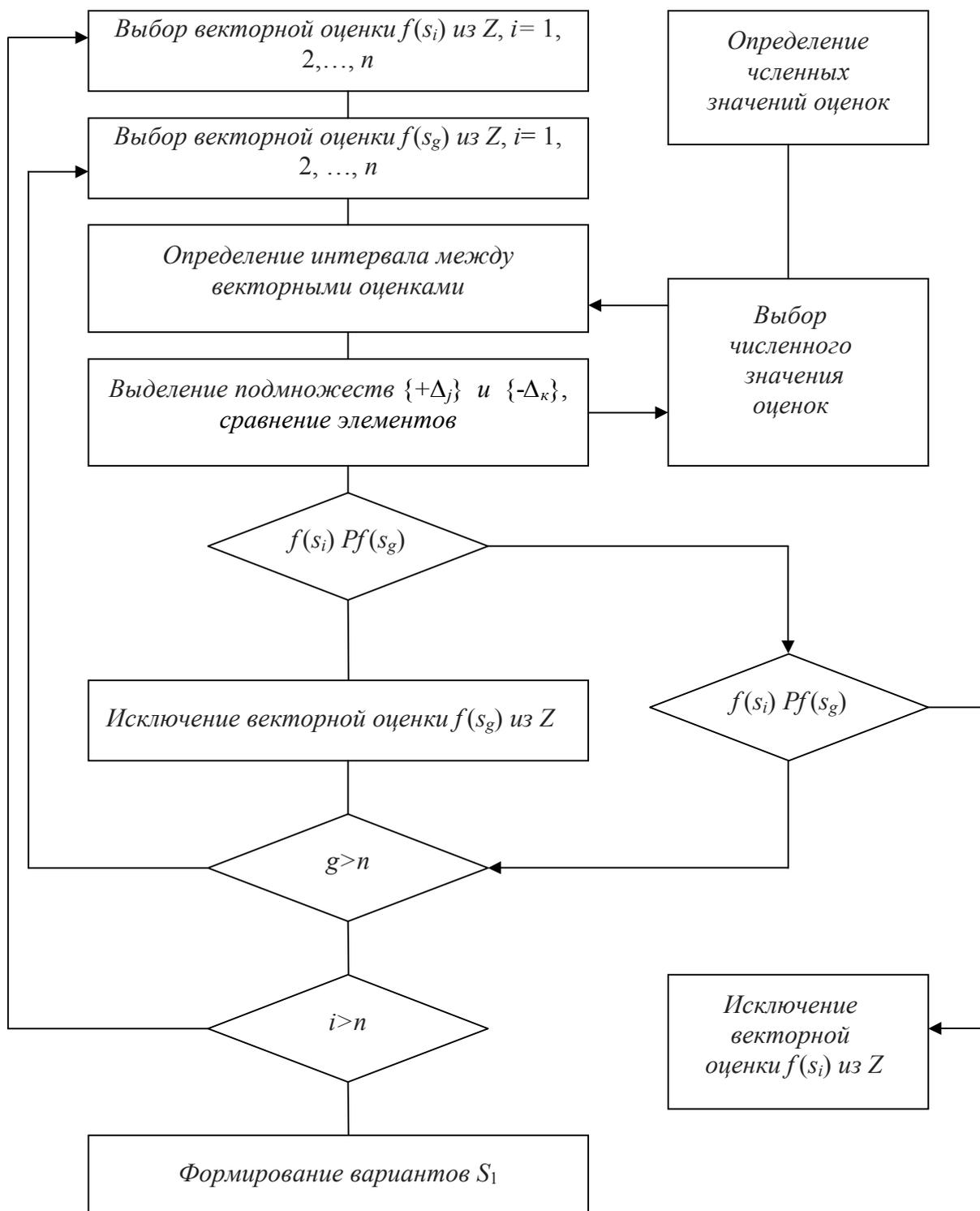


Рис. 2.3.2. Алгоритм выделения предпочтительных вариантов при независимости по предпочтению

2.4. Основы методики выбора предпочтительного варианта пьезосканера по совокупности показателей

Методика предназначена для оценки и сравнения вариантов проектов на различных этапах проектирования и опытных образцов пьезосканеров. Оценку вариантов проводят по качественным и количественным показателям, имеющим дискретные шкалы. Методика не охватывает этапы формулировки цели и составления вариантов, поскольку первый из них целиком относится к компетенции руководителя работы, а второй этап реализуют процессы проектирования системы, исследования опытного образца, в ходе которых возникают различные варианты s_i построения системы, проведения испытаний и т.д [31].

Рекомендуется следующий порядок выполнения работы.

1. Составление перечня показателей:

- а) составить предварительный список показателей. Перечень показателей определяет специфику исследуемой проблемы и характеризует динамические, надёжностные, ресурсные и другие свойства сравниваемых объектов. Полнота оценки вариантов зависит от числа показателей, принятых во внимание;
- б) каждому интуитивно понятному названию показателя поставить в соответствие точно сформулированное описание, соответствующее рассматриваемой задаче. Это позволит избежать неоднозначности и неточности в трактовке показателей;
- в) уточнить перечень показателей.

2. Построение порядковых шкал:

- а) определить диапазон изменения значений показателя на множестве вариантов;
- б) зафиксировать наименьшее и наибольшее значения показателя и

выделить промежуточные значения. Для качественных показателей, оценки даются описательно;

- б) проверить упорядоченность оценок на каждой шкале отношением «не менее предпочтительна, чем»

$$x_j^{r_j} \geq x_j^{r_j-1} \geq \dots \geq x_j^2 \geq x_j^1,$$

где r – число оценок по показателю $X_j, j = 1, 2, \dots, m$.

3. Составление векторных оценок вариантов по форме

$$f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i, \dots, x_m^i), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где x_j^i – координата вектора оценок – оценка i -го варианта по показателю, $X_j; s_i \in \{s\}$ – вариант из множества сравниваемых.

4. Выбор наиболее предпочтительного варианта из множества $\{s\}$ выполняется в два этапа:

- а) выделение множества неподчиненных вариантов $\{s^*\}$. Алгоритм выделения множества неподчиненных вариантов представлен на рис. 2.3.1. Выделение множества неподчиненных вариантов может выполняться формально, без участия ЛПР.
- б) выбор наиболее предпочтительного варианта из $\{s^*\}$ выполняется по критерию

$$s_i^* \geq s_g^* \Leftrightarrow U[f(s_i^*)] \geq U[f(s_g^*)],$$

$$\text{где } U[f(s_i^*)] = \sum_{j=1}^m u_j(x_j^i).$$

Значения полезности оценок $u_j(x_j^i)$ на шкалах показателей должны отвечать предпочтениям ЛПР.

5. Выявление предпочтений ЛПР:

а) составляется векторная оценка $f(x_{jk})$ с произвольными оценками по показателям j и k и наименьшими оценками по остальным показателям:

$$f(x_{jk}) = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_j^i, \dots, x_k^g, \dots, x_m^l), \quad j, k = \{1, 2, \dots, m\}, \quad j \neq k;$$

$$i = \{1, 2, \dots, r_j\};$$

$$g = \{1, 2, \dots, r_k\};$$

б) лицо, принимающее решение, должно упорядочить (частично или полностью) векторные оценки $f(x_{jk})$:

$$f(x_{jk})_1 \geq f(x_{jk})_2 \geq \dots \geq f(x_{jk})_l.$$

Вместо оценки или наряду с ними ЛППР для сравнения можно представлять интервалы между оценками на шкалах показателей;

в) составить систему однородных линейных неравенств, переменными которых являются полезности оценок. При построении неравенств используют выражение

$$U[f(x_{jk})] = \sum_{j=1}^m u_j(x_j^i),$$

и условие

$$\sum_{j=1}^m u_j(x_j^1) = 0:$$

$$u(x_{j_2}^{i_2}) + u(x_{k_2}^{g_2}) - u(x_{j_1}^{i_1}) - u(x_{k_1}^{g_1}) \leq 0;$$

$$u(x_{j_3}^{i_3}) + u(x_{k_3}^{g_3}) - u(x_{j_2}^{i_2}) - u(x_{k_2}^{g_2}) \leq 0;$$

...

$$u(x_{j_l}^{i_l}) + u(x_{k_l}^{g_l}) - u(x_{j_{l-1}}^{i_{l-1}}) - u(x_{k_{l-1}}^{g_{l-1}}) \leq 0.$$

Система неравенств записывается в канонической форме:

$$\begin{aligned}
& a_{1r_1} u(x_1^{r_1}) + a_{1r_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + \dots + a_{12_1} u(x_1^{2_1}) + \dots + a_{12_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0; \\
& a_{2r_1} u(x_1^{r_1}) + a_{2r_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + \dots + a_{22_1} u(x_1^{2_1}) + \dots + a_{22_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0; \\
& \dots \\
& a_{Mr_1} u(x_1^{r_1}) + a_{Mr_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + \dots + a_{M2_1} u(x_1^{2_1}) + \dots + a_{M2_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0,
\end{aligned}$$

где M – число неравенств;

г) в результате решения системы неравенств получается множество точек

$$\begin{aligned}
A_1 &= (u_1(x_1^{r_1}), u_1(x_1^{r_1-1}), \dots, u_1(x_m^{2_m})); \\
A_2 &= (u_2(x_1^{r_1}), u_2(x_1^{r_1-1}), \dots, u_2(x_m^{2_m})); \\
A_p &= (u_p(x_1^{r_1}), u_p(x_1^{r_1-1}), \dots, u_p(x_m^{2_m})),
\end{aligned}$$

определяющих область решений системы.

6. Оценка вариантов технических решений:

а) оценку каждого варианта проводить путём поочередной подстановки соответствующих координат точек A_1, A_2, \dots, A_p в векторную оценку $f(s_i)$ и вычислений по выражению

$$U_k[f(s_i)] = \sum_{j=1}^m u_k(x_j^i), \quad k = 1, 2, \dots, p.$$

В результате получается для каждого варианта совокупность из p оценок вида

$$U[f(s_i)] = \{U_1[f(s_i)], U_2[f(s_i)], \dots, U_p[f(s_i)]\};$$

б) выделить предпочтительные варианты. К предпочтительным относятся варианты, имеющие в совокупности из p оценок хотя бы одну более предпочтительную оценку при не менее предпочтительных других оценках среди соответствующих оценок всех остальных ва-

риантов. Алгоритм выделения предпочтительных решений совпадает с применённым в п. 4,а.

7. Анализ результатов работы.

Возможны два исхода выполненной работы:

- а) выделено требуемое число предпочтительных вариантов (один или более). Задача решена;
- б) выделенное число предпочтительных вариантов превосходит требуемое количество. Это значит, что от ЛПР необходимо получить дополнительную информацию о предпочтениях. Например – упорядочить по полезности интервалы между любыми двумя вариантами по шкалам показателей, упорядочить интервалы между векторными оценками в упорядоченном ряду (п. 5,б) и т.д., а затем повторить процедуру, начиная с п. 5,б.

2.5. Математическая модель пьезосканера на основе пьезоэлектрического элемента

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент (рис. 2.5.1) 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 .

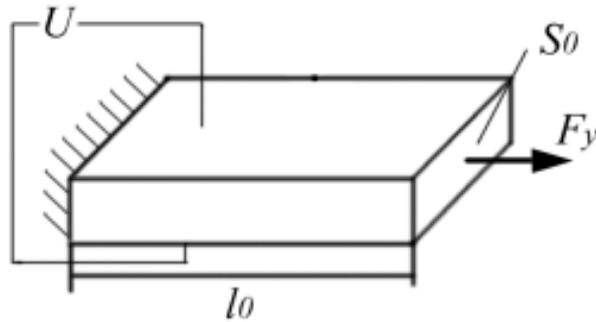


Рис. 2.5.1. Пьезоэлектрический элемент

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

$$P = -d_n \sigma + \varepsilon_0 \chi E, \quad (2.5.1)$$

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

$$\frac{\Delta Y S_0}{l_0} = d_n Y S_0 E - S_0 \sigma, \quad (2.5.2)$$

где Δ – деформация пьезоэлемента;

Y – модуль упругости;

S_0 – поперечное сечение пьезоэлемента;

l_0 – первоначальная длина пьезоэлемента.

Выражение в левой части (2.5.2) описывает усилие упругой деформации F_y , первое слагаемое в правой части (2.5.2) – усилие в ПП, вызванное приложенным электрическим полем $F_{\mathcal{E}}$. Механическое напряжение, входящее во второе слагаемое правой части (2.5.2), определяется статиче-

ским усилием F_C , приложенным к ИО и действующим на ПП со стороны ИО, а также комплексом усилий, возникающих при движении ИО: динамическим усилием $F_{дин}$ пропорциональным ускорению ИО, и демпфирующим усилием F_D пропорциональным скорости смещения ИО и вызванным процессами диссипации энергии в ПП. Описанная детализация позволяет записать (2.5.2) в виде следующего условия равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части ПП:

$$F_Y = F_{\mathcal{E}} + F_C + F_D + F_{дин} , \quad (2.5.3)$$

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

$F_{\mathcal{E}} = d_{II} Y S_0 E$ – 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;

$F_{дин} = -\frac{m_{\Sigma} d^2\Delta}{dt^2}$ – 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:

$$I_{CM} = \frac{S_0 dp}{dt} . \quad (2.5.4)$$

Введём σ из (2.5.2) в уравнение прямого пьезоэффекта (2.5.1) 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 (2.5.4), получим

$$I_{CM} = \frac{C_0 dU}{dt} + K_{II} V, \quad (2.5.5)$$

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:

$$F_{Э} = K_0 U, \quad (2.5.6)$$

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

$$\frac{E_{II} - U}{R_{BT}} = I_{CM}. \quad (2.5.7)$$

После преобразований выражений (2.5.5) – (2.5.7) получим

$$\frac{dF_{\Sigma}}{dt} = \frac{K_0 e_{\Pi} - F_{\Sigma}}{C_0 R_{BT}} - \frac{K_0 K_{\Pi}}{C_0} . \quad (2.5.8)$$

Уравнение (2.5.8), в сочетании с двумя нижеприведёнными (2.5.9) и (2.5.10), которые могут быть выведены из выражений для составляющих усилия F_B

$$\frac{dV}{dT} = \frac{F_{\Sigma} + F_C - K_Y \Delta - K_D}{m_{\Sigma}} ; \quad (2.5.9)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = V , \quad (2.5.10)$$

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

На основании уравнений (2.5.9) – (2.5.10) составлена структурная схема. Сворачивание структуры приводит к следующей передаточной функции ПП, управляемого от источника ЭДС:

$$W_{\Delta f}^{\Sigma}(p) = \frac{\Delta(p)}{e_{\Pi}(p)} = \frac{K_0 / K_Y}{1 + \left(R_{BT} C_0 + \frac{K_D}{K_Y} + R_{BT} K_{\Pi} \frac{K_0}{K_Y} \right) p + \left(\frac{m_{\Sigma}}{K_Y} + R_{BT} C_0 \frac{K_D}{K_Y} \right) p^2 + R_{BT} C_0 \frac{m_{\Sigma}}{K_Y} p^3} . \quad (2.5.11)$$

Выражение (2.5.11) показывает, что в ПП кроме демпфирования, обусловленного внутренними диссипативными процессами, имеет место также демпфирование, связанное с прямым пьезоэффектом [65].

Полученное выше описание ПП (2.5.8) – (2.5.11) 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, биморф-

ных и мембранных ПП. Наилучшее совпадение динамических характеристик модели и объекта получается при использовании для моделирования экспериментально определенных параметров $m_{\Sigma}, K_Y, K_0, K_D, C_0, R_{BT}$.

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 [65]. Пренебрежение в (2.5.11) 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:

$$W_{\Delta f}^{\Sigma}(p) = \frac{\Delta(p)}{e_{II}(p)} \approx \frac{\left(\frac{K_0}{K_Y}\right)}{1 + \frac{m_{\Sigma}}{K_Y} p^2}. \quad (2.5.12)$$

В заключение следует отметить, что по частоте $\omega_M = \left(K_Y/m_{\Sigma}\right)^{\frac{1}{2}}$ и амплитудам первых колебаний реально наблюдаемая затухающая переходная функция, соответствующая передаточной функции (2.5.11), мало отличается от незатухающей переходной функции, отвечающей выражению (2.5.12). Консервативное звено (2.5.12) может рассматриваться как модель самого грубого первого приближения для многих ПП.

2.6. Крип-эффект и методика борьбы с ним

Недостатком пьезокерамики является так называемый крип-эффект (*creep* – ползучесть) – запаздывание реакции на изменение величины управляющего электрического поля. На рис. 2.6.1 схематично показаны временные диаграммы изменения управляющих полей и соответствующих смещений сканера по оси Z и в плоскости X, Y [37].

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 крипа керамики применяются временные задержки в указанных процессах, позволяющие частично компенсировать запаздывание сканера.

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

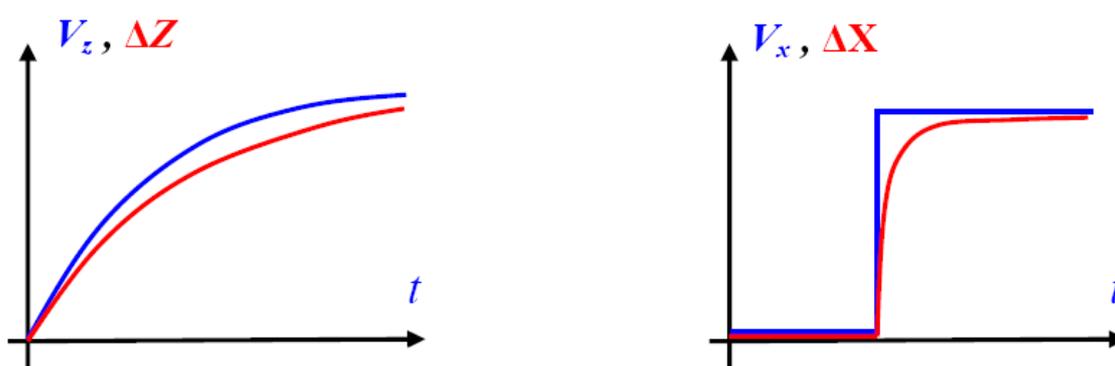


Рис. 2.6.1. Схематические временные диаграммы изменения управляющего поля на Z -электроде в цепи обратной связи и на X -электроде в процессе сканирования (верхние графики). на нижних графиках схематично показаны зависимости, соответствующие реакции сканера на изменение управляющих напряжений

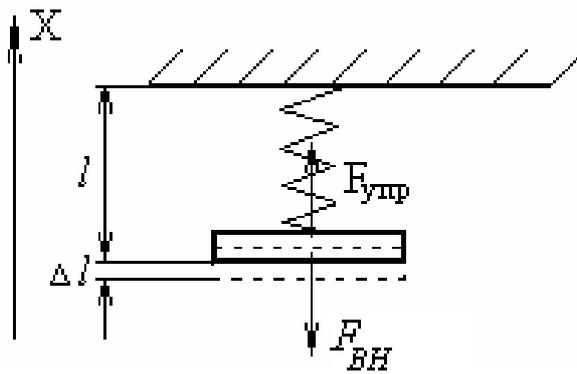


Рис. 2.6.2. Приближенная модель пьезосканера

В качестве модели системы с одной степенью свободы рассмотрим тело массой m , удерживаемое упругой связью с жесткостью k (рис. 2.6.2). 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 свойст-

ва 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.

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

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

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. 2.2.

Таблица 2.2
Результаты расчётов

$U, \text{В}$	$\Delta I \cdot 10^9 \text{ м}$	$U_{ск}, \text{В}$
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.

ГЛАВА 3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПО ПАРАМЕТРАМ ПЬЕЗОСКАНЕРА

3.1. Многоатрибутивный выбор и принятие решения при проектировании пьезосканеров

В тех случаях, когда оценка свойств систем по свободным показателям невозможна или нецелесообразна, прибегают к оценке и сравнению вариантов проектируемых систем по совокупности показателей их свойств. Такие случаи возникают при:

- проектировании управляющих систем широкого назначения, когда конкретный ОУ не известен;
- отсутствие математических моделей, связывающих значения показателей свойств и параметров структуры системы;
- отсутствие количественной информации о свойствах системы;
- необходимости учёта свойств, не поддающихся количественной оценке;
- многоаспектности цели создания системы и, следовательно, понятия качества системы.

Спецификой оценки системы по совокупности показателей является её относительный характер. Такая оценка может быть использована только для сравнения вариантов систем и выбора наилучшего, в некотором смысле, варианта [31].

Проблема оценки и сравнения вариантов системы по совокупности свойств является предметом теории принятия решений. В теории принятия решений разработаны несколько направлений, обусловленных особенностями ситуаций принятия решения, а именно:

- условиями связи конечного результата с принятым решением (условия определённости, риска, неопределённости);

- структурой органа, принимающего решение (коллектив, индивидуум);
- способом оценки изделия (в целом, по совокупности свойств ПС);
- повторяемостью задачи выбора (единичный акт выбора, выбор как массовая процедура);
- ограниченным или неограниченным количеством вариантов ПС.

Примем во внимание:

- в сложившихся условиях проектирования всегда имеется лицо, ответственное за результат работы по созданию системы (главный конструктор проекта, ведущий инженер заказа и т.п.);
- стоит задача оценки системы по совокупности свойств;
- в каждой ситуации осуществляется единичный акт выбора;
- выбор каждого варианта приводит к вполне определённом результату.

Поэтому задача принятия решения, при сравнении проектных вариантов, может быть отнесена к классу задач индивидуального принятия решений в условиях определённости при наличии многих показателей – многокритериальным задачам принятия решений.

Основная проблема в решении задач оценки и выбора вариантов по совокупности показателей состоит в формулировании условий предпочтительности сравниваемых вариантов. В одних случаях для этой цели применяются понятие полезности, с помощью которого производится измерение ценности различных свойств по единой шкале полезности. Полезности свойств объединяются, и упорядочение вариантов производится по значениям скалярной функции полезности на множестве вариантов. В других случаях наиболее предпочтительный вариант выделяется по результатам попарного сравнения вариантов. Но и в том и другом случаях суждение о предпочтительности вариантов строится на основе представления руководителя работ (ЛПР) о достоинствах и недостатках отдельных вариантов, о ценности свойств, присущих соответствующим вариантам. Общая методо-

логия оценки и сравнения вариантов по совокупности показателей направлена на формализацию ряда этапов процедуры принятия решения, разработку методов перехода наиболее рациональным и последовательным путем от представлений руководителя о ценности свойств к заключению о предпочтительности вариантов.

3.2. Оптимизация пьезосканеров по параметрам

Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку функции специалиста состоят в том, чтобы, с одной стороны, проектировать новые, более эффективные, менее дорогие технические системы, а с другой стороны, разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем.

В практической деятельности часто из многих возможных решений задачи необходимо выбрать оптимальный.

Во множестве случаев задача поиска оптимального решения может быть формализована и решена точно или приблизительно известными методами.

Оптимизация – целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов при соответствующих условиях.

При постановке задачи оптимизации необходимо [43]:

1. Наличие объекта оптимизации и цели оптимизации. При этом, формулировка каждой задачи оптимизации должна требовать экстремального значения лишь одной величины. Одновременно системе не должно приписываться два и более критериев оптимизации, так как практически всегда экстремум одного критерия не соответствует экстремуму другого.
2. Наличие ресурсов оптимизации, под которыми понимают возможность выбора значений некоторых параметров оптимизируемого объекта.

Объект должен обладать определёнными степенями свободы – управляющими воздействиями.

3. Возможность количественной оценки оптимизируемой величины, поскольку только в этом случае можно сравнивать эффекты от выбора тех или иных управляющих воздействий.
4. Учёт ограничений.

3.2.1. Математическая постановка задач оптимизации. Виды ограничений

Несмотря на то, что прикладные задачи относятся к совершенно разным областям, они имеют общую форму. Все эти задачи можно классифицировать как задачи минимизации вещественнозначной функции $f(x)$ N -мерного векторного аргумента $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, компоненты которого удовлетворяют системе уравнений $h_k(x) = 0$, набору неравенств $g_j(x) \geq 0$, а также ограничены сверху и снизу, т.е. $x_i^{(u)} \geq x_i \geq x_i^{(l)}$. В последующем изложении функцию $f(x)$ будем называть целевой функцией, уравнения $h_k(x) = 0$ – ограничениями в виде равенств, а неравенства $g_j(x) \geq 0$ – ограничениями в виде неравенств. При этом предполагается, что все фигурирующие в задаче функции являются вещественнозначными, а число ограничений конечно.

Задача общего вида:

минимизировать $f(x)$ при ограничениях

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, K; \quad g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J; \quad x_i^{(u)} \geq x_i \geq x_i^{(l)}, \quad i = 1, \dots, N$$

– называется задачей оптимизации с ограничениями или задачей условной оптимизации.

Задача, в которой нет ограничений, то есть

$$J = K = 0; \quad x_i^{(u)} = -x_i^{(l)} = \infty, \quad i = 1, \dots, N$$

– называется оптимизационной задачей без ограничений или задачей безусловной оптимизации.

3.2.2. Критерии оптимальности

Обычно оптимизируемая величина связана с экономичностью работы рассматриваемого объекта (пьезосканера). Оптимизируемый вариант работы объекта должен оцениваться какой-то количественной мерой – критерием оптимальности.

Критерием оптимальности называется количественная оценка оптимизируемого качества объекта.

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на её значение.

Таким образом, задача оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции.

Наиболее общей постановкой оптимальной задачи является выражение критерия оптимальности в виде экономической оценки. Однако в частных задачах оптимизации, когда объект (пьезосканер) является частью технологического процесса, не всегда удаётся или не всегда целесообразно выделять прямой экономический показатель, который бы полностью характеризовал эффективность работы рассматриваемого объекта. В таких случаях критерием оптимальности может служить технологическая характеристика, косвенно оценивающая экономичность работы агрегата (быстродействие, точность позиционирования и др.). Но, в любом случае, любой критерий оптимальности имеет экономическую природу [43].

Рассмотрим более подробно требования, которые должны предъяв-

ляться к критерию оптимальности:

1. Критерий оптимальности должен выражаться количественно.
2. Критерий оптимальности должен быть единственным.
3. Критерий оптимальности должен отражать наиболее существенные стороны процесса.
4. Желательно чтобы критерий оптимальности имел ясный физический смысл и легко рассчитывался.

Любой оптимизируемый объект можно представить схематично (рис. 3.2.1).

При постановке конкретных задач оптимизации, критерий оптимальности должен быть записан в виде аналитического выражения. В том случае, когда случайные возмущения невелики и их воздействие на объект можно не учитывать. Критерий оптимальности может быть представлен как функция входных, выходных и управляющих параметров:

$$R = R(X_1, X_2, \dots, X_N, Y_1, Y_2, \dots, Y_N, U_1, U_2, \dots, U_N). \quad (3.2.1)$$

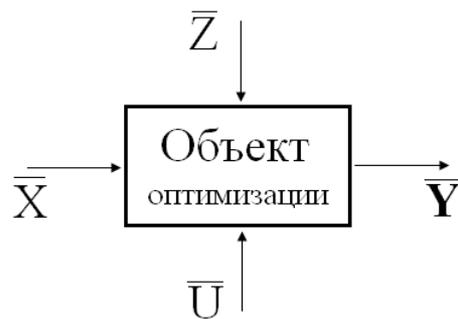


Рис. 3.2.1. Схема объекта оптимизации:

\bar{Y} – выходы объекта;

\bar{X} – контролируемые входные параметры;

\bar{U} – регулируемые (управляющие) входные параметры;

\bar{Z} – неконтролируемые воздействия

Так как $Y = f(U)$, то при фиксированных X можно записать

$$R = R(\bar{U}_i) . \quad (3.2.2)$$

При этом, всякое изменение значений управляющих параметров двояко сказывается на величине R :

- прямо, так как управляющие параметры непосредственно входят в выражение критерия оптимизации;
- косвенно – через изменение выходных параметров процесса, которые зависят от управляющих.

Если же случайные возмущения достаточно велики и их необходимо учитывать, то следует применять экспериментально-статистические методы, которые позволят получить модель объекта в виде функции

$$Y = j(X_i, U_i) , \quad (3.2.3)$$

которая справедлива только для изученной локальной области.

Тогда критерий оптимальности примет следующий вид:

$$R = R(\bar{X}, \bar{U}) . \quad (3.2.4)$$

В принципе, для оптимизации вместо математической модели можно использовать и сам объект.

Однако оптимизация опытным путём имеет ряд существенных недостатков:

- а) необходим реальный объект;
- б) необходимо изменять технологический режим в значительных пределах, что не всегда возможно;
- в) длительность испытаний и сложность обработки данных; наличие математической модели (при условии, что она достаточно надёжно описывает процесс) позволяет значительно проще решить задачу оптимизации аналитическим либо численным методами.

В задачах оптимизации различают простые и сложные критерии оптимизации.

Критерий оптимальности называется простым, если требуется определить экстремум целевой функции без задания условий на какие-либо другие величины. Такие критерии обычно используются при решении частных задач оптимизации (например, определение максимального перемещения пьезосканера, оптимального времени пребывания пьезосканера в рабочем состоянии и т.п.).

Критерий оптимальности называется сложным, если необходимо установить экстремум целевой функции при некоторых условиях, которые накладываются на ряд других величин (например, определение максимального быстродействия при заданной точности перемещения и др.).

Процедура решения задачи оптимизации обязательно включает, помимо выбора управляющих параметров, ещё и установление ограничений на эти параметры (взрывобезопасность, мощность управляющих сигналов и т.д.). Ограничения могут накладываться как по технологическим, так и по экономическим соображениям.

Итак, для решения задачи оптимизации необходимо:

а) составить математическую модель объекта оптимизации:

$$Y = f(X, U); \quad (3.2.5)$$

б) выбрать критерий оптимальности и составить целевую функцию:

$$R = \phi(\bar{Y}) = F(\bar{X}, \bar{U}); \quad (3.2.6)$$

в) установить возможные ограничения, которые должны накладываться на переменные:

$$\psi_i(\bar{X}, \bar{U}) = 0, \psi_i(\bar{X}, \bar{U}) < 0; \quad (3.2.7)$$

г) выбрать метод оптимизации, который позволит найти экстремаль-

ные значения искомым величин.

Принято различать задачи статической оптимизации для процессов, протекающих в установившихся режимах, и задачи динамической оптимизации.

В первом случае решаются вопросы создания и реализации оптимальной модели процесса, во втором – задачи создания и реализации системы оптимального управления процессом при неустановившихся режимах эксплуатации.

3.3. Основные методы, с помощью которых происходит выбор наилучших вариантов пьезосканеров по параметрам

Несмотря на то, что безусловная оптимизация функции одной переменной – наиболее простой тип оптимизационных задач, она занимает центральное место в теории оптимизации как с теоретической, так и с практической точек зрения. Это связано с тем, что задачи однопараметрической оптимизации достаточно часто встречаются в инженерной практике и, кроме того, находят своё применение при реализации более сложных интерактивных процедур многопараметрической оптимизации.

Своеобразным индикатором важности методов оптимизации функции одной переменной является огромное множество реализованных алгоритмов, которые условно можно сгруппировать следующим образом:

- методы исключения интервалов:
 - метод половинного деления,
 - метод "золотого" сечения,
 - метод Фибоначчи;
- методы полиномиальной аппроксимации;
- методы с использованием производных.

Методы безусловной оптимизации делятся на методы одномерной и многомерной оптимизации.

К методам *многомерной оптимизации* относятся:

1. Методы нулевого порядка:
 - покоординатного спуска;
 - Хука-Дживса;
 - симплексный метод Нелдера-Мида.
2. Методы первого порядка:
 - градиентный;
 - наискорейшего спуска;
 - сопряженных градиентов:
 - метод Давидона-Флетчера-Пауэлла,
 - метод Флетчера-Ривса.

3.3.1. Необходимые и достаточные условия оптимизации

Рассмотрим функцию n действительных переменных

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x).$$

Точка в n -мерном евклидовом пространстве с координатами $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ обозначается вектором-столбцом x .

Градиент функции, то есть вектор с компонентами

$$\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n},$$

обозначается $\nabla f(x)$ или, иногда, $g(x)$.

Матрица Гессе (гессиан) функции $f(x)$ обозначается как $G(x)$ и является симметричной матрицей $n \times n$ элементов вида

$$G_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial y_j}.$$

Функция $f(x)$ имеет локальный минимум в точке x_0 , если существует окрестность точки x_0 , такая, что $f(x) > f(x_0)$ во всех точках этой окрестности, то есть существует положительная величина δ , такая, что для $|x - x_0| < \delta$ справедливо неравенство $f(x) \geq f(x_0)$.

В случае глобального минимума в точке x^* для всех x справедливо неравенство $f(x) \geq f(x^*)$.

Необходимым условием минимума в точке x_0 является уравнение

$$\nabla f(x_0) = 0, \quad (3.3.1)$$

то есть

$$\frac{\partial f(x_0)}{\partial x_i} = 0, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (3.3.2)$$

Тогда знак разности $f(x_0 + h) - f(x_0)$ определяется членом

$$0,5 h^T G(x_0) h. \quad (3.3.3)$$

Если матрица $G(x_0)$ положительно определена, то этот член положителен для всех h .

Таким образом, необходимыми и достаточными условиями минимума являются:

$$\nabla f(x_0) = 0, \quad G(x_0) - \text{положительно определена.}$$

Необходимыми и достаточными условиями максимума являются:

$$\nabla f(x_m) = 0, \quad G(x_m) - \text{отрицательно определена.}$$

3.3.2. Метод покоординатного спуска

Одними из методов нахождения минимума функции n -переменных являются методы прямого поиска. Методы прямого поиска являются мето-

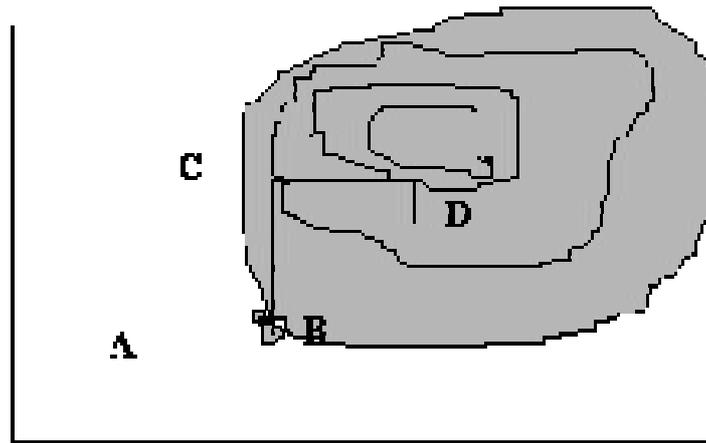


Рис. 3.3.1. Метод прямого поиска

дами, в которых используются только значения функции.

Рассмотрим функцию двух переменных. Её линии уровня представлены на рис.3.3.1, а минимум лежит в точке (x_1^*, x_2^*) . Простейшим методом поиска является метод покоординатного спуска. Из точки **A** произведем поиск минимума вдоль направления оси x_1 и, таким образом, находим точку **B**, в которой касательная к линии постоянного уровня параллельна оси x_1 . Затем, производя поиск из точки **B** в направлении оси x_2 , получаем точку **C**, производя поиск параллельно оси x_2 , получаем точку **D**, и т.д. Таким образом приходим к оптимальной точке. Эту идею можно применить для функции n -переменных.

Теоретически, данный метод эффективен в случае единственного минимума функции. Но на практике он оказывается слишком медленным. Поэтому были разработаны более сложные методы, использующие больше информации на основании уже полученных значений функции.

3.3.3. Метод наискорейшего спуска

В методе наискорейшего спуска желательно использовать рассмотренное свойство направления градиента. Поэтому, находясь в точке x_i на

некотором шаге процесса оптимизации, поиск минимума функции осуществляется вдоль направления $-\nabla f(x_i)$. Данный метод является итерационным. На шаге i точка минимума аппроксимируется точкой x_i .

Следующей аппроксимацией является точка

$$x_{i+1} = x_i - \lambda_i \nabla f(x_i), \quad (3.3.4)$$

где λ_i – значение λ , минимизирующее функцию

$$\varphi(\lambda_i) = f[x_i - \lambda \nabla f(x_i)]. \quad (3.3.5)$$

Значение λ_i может быть найдено с помощью одного из методов одномерного поиска (например, методом квадратичной интерполяции).

3.4. Оценка надёжности систем из многофункциональных модулей

Проектирование систем автоматического управления пьезосканерами связано с расчётом потенциального уровня надёжности возможных вариантов их реализации. Построение современных систем управления на базе микропроцессорной техники, для которой характерна многофункциональность модулей, определяет актуальность развития методов оценки надёжности, учитывающих взаимозависимость событий потери пьезомодулями способности выполнять различные функции.

Полученные в этом направлении результаты, в основном, касаются пьезомодулей (узлов), отказ которых приводит либо к потере способности выполнения всех его функций одновременно, либо только одной функции. Ниже предложены методы оценки надёжности ПС из многофункциональных пьезомодулей с произвольным видом пересеканности нанотехнологического оборудования, задействованного при выполнении различных функций.

Задача формулируется следующим образом. Пусть ПС, выполняющий

функцию $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, состоит из m многофункциональных пьезомодулей (МФПМ), каждый из которых в исходном состоянии выполняет множество функций $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Для каждого нанотехнологического оборудования обозначим через Φ_1 совокупность пьезомодулей, задействованного при выполнении функции f_1 . В общем случае множества $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ могут пересекаться, что приводит к взаимозависимости событий потери способности нанотехнологического оборудования выполнять различные функции. По виду пересекваемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ выделим следующие структуры МФПМ [31]:

$$(\exists i)(\exists j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j \neq \emptyset] ; \quad (3.4.1)$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \emptyset] ; \quad (3.4.2)$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \Omega] , \quad (3.4.3)$$

где $i, j \in N, N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Структура МФПМ (3.4.1) характеризуется независимостью событий потерять нанотехнологическим оборудованием способность выполнять различные функции; структура МФПМ (3.4.2) соответствует произвольному виду пересекваемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$; структура (3.4.3) является частной по отношению к (3.4.2). В МФПМ вида (3.4.2) выделяется некоторые общие пьезомодули Ω , отказ которых приводит к полному отказу нанотехнологического оборудования, и пьезомодули $\Phi_i \setminus \Omega$ ($i = 1, 2, \dots, n$), отказ которых связан с потерей способности нанотехнологического оборудования к выполнению только одной функции f_i . Множества $\Phi_i \setminus \Omega$ не пересекаются.

Условием работоспособности ПС является способность выполнения функции $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. При этом каждая функция $f_i \in F$ должна выполняться хотя бы одним МФПМ, а время ожидания обслуживания запросов на выполнение функций $f_i \in F$ должно быть не больше заданного предель-

но допустимого значения. Надёжность ПС определим по вероятности безотказной работы.

Оценка вероятности безотказной работы ПС. Рассмотрим ПС, для которых условие работоспособности заключается в возможности выполнения каждой функции $f_i \in F$ хотя бы в одном МФПМ. Оценку вероятности безотказной работы проведем на основе известного комбинаторно-вероятностного метода включения–исключения [42], позволяющего получить как точную, так и приближенную, с требуемой погрешностью, оценку.

Для МФПМ вида (3.4.2) вероятности безотказной работы ПС P оценивается как

$$\begin{aligned}
 P = & \sum_{i \in N} P(f_i) - \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \neq j}} P(f_i \vee f_j) + \sum_{\substack{i, j, l \in N \\ i \neq j \neq l}} P(f_i \vee f_j \vee f_l) - \dots \\
 & + (-1)^d \sum_{\substack{i, j, \dots, a \in N \\ i \neq j \neq \dots \neq a}} P(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a) - \dots + (-1)^n P\left(\bigvee_{i=1}^n f_i\right)
 \end{aligned} \tag{3.4.4}$$

где $P(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a)$ – вероятность того в ПС может быть выполнена хотя бы одна функция из множества функций $\{f_i, f_j, \dots, f_a\}$

$$P(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a) = 1 - \left[1 - p(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a)\right]^m.$$

Вероятность сохранения ПС способности выполнения хотя бы одной функции из множества

$$\begin{aligned}
 p(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a) = & \sum_{i \in N} p(f_i) - \sum_{\substack{i, j \in N \\ i \neq j}} p(f_i \wedge f_j) + \\
 & \sum_{\substack{i, j, l \in N \\ i \neq j \neq l}} p(f_i \wedge f_j \wedge f_l) - \dots + (-1)^d \sum_{\substack{i, j, \dots, a \in N \\ i \neq j \neq \dots \neq a}} p(f_i \wedge f_j \wedge \dots \wedge f_a),
 \end{aligned} \tag{3.4.5}$$

где $N_1 = \{i, j, \dots, a\}$, $p(f_i \wedge f_j \wedge \dots \wedge f_a)$ – вероятность исправности в нанотехнологическом оборудовании пьезомодуля, задействованного при выполнении функций f_i, f_j, \dots, f_a .

Значение $p(f_i \wedge f_j \wedge \dots \wedge f_a)$ определяется как вероятность исправности пьезомодулей $\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a$.

При экспоненциальном распределении времени до отказа

$$p(f_i \wedge f_j \wedge \dots \wedge f_a) = \exp(-\Lambda(\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a)t),$$

где $\Lambda(\Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_a)$ – суммарная интенсивность отказов МФПМ, задействованных при выполнении функций f_i, f_j, \dots, f_a ; t – время работы.

Для МФПМ вида (3.4.3) вероятность безотказной работы ПС вычисляется

$$P = \sum_{k=1}^m C_m^k p_\Omega^k (1 - p_\Omega)^{m-k} \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^k], \quad (3.4.6)$$

где p_Ω – вероятность безотказной работы пьезомодулей, составляющего множество Ω ; p_i – вероятность безотказной работы пьезомодулей, относящегося к множеству $\Phi_i \setminus \Omega$.

Если потеря пьезомодулем различных функций равновероятна ($p_i = p_j = p$), то

$$P = \sum_{k=1}^m C_m^k p_\Omega^k (1 - p_\Omega)^{m-k} [1 - (1 - p_i)^k]^n.$$

Для МФПМ вида (3.4.1) вероятность безотказной работы ПС P вычислим как

$$P = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^m].$$

Рассмотрим вероятность безотказной работы конструкции с учётом

ограничения времени обслуживания.

Пусть задано w_0 – предельно допустимое среднее время ожидания обслуживания запросов на выполнение функций $f_i \in F, i \in N$. Каждый пьезомодуль представим простейшей системой массового обслуживания типа М/М/1 [48]. Число пьезомодулей m_0 , при котором запросы обслуживаются за допустимое среднее время, определим как

$$m_0 = \rho \left(1 + \frac{v}{w_0} \right),$$

где $\rho = v\lambda$;

λ – суммарная интенсивность запросов на выполнение функций $f_i \in F$;
 v – среднее время их выполнения.

Будем считать, что ПС исправен, если способность выполнения каждого вида функций $f_i \in F$ сохраняется хотя бы в m_0 МФПМ. При этом вероятность работоспособности ПС определяется по формуле (3.4.4) с той разницей, что $P(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a)$ – вероятность того, что хотя бы одна функция из множества $\{f_i, f_j, \dots, f_a\}$ может быть выполнена не менее чем m_0 пьезомодулями [31]:

$$P(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a) = \sum_{g=m_0}^m C_m^g p(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a)^g \times \left[1 - p(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a) \right]^{m-g},$$

где вероятность $p(f_i \vee f_j \vee \dots \vee f_a)$ вычисляемая по формуле (3.4.5).

Определение значения m_0 при направлении всего потока запросов m_0 МФПМ приводит к нижней (пессимистической) оценке вероятности работоспособности ПС.

Для МФПМ вида (3.4.3) вероятность безотказной работы ПС

$$P = \sum_{k=m_0}^m C_m^k p_\Omega^k (1 - p_\Omega)^{m-k} \prod_{i=1}^n \left[\sum_{s=m_0}^m C_t^s (1 - p_i)^{k-s} \right], \quad (3.4.7)$$

для МФПМ вида (3.4.1) вероятность безотказной работы ПС

$$P = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{s=m_0}^m C_m^s p_i^s (1-p_i)^{m-s} \right].$$

Оценим вероятность безотказной работы ПС с функциональной неоднородностью МФПМ.

Рассматриваемые до сих пор ПС комплектовались из одинаковых МФПМ. Теперь перейдём к ПС, содержащим z типов МФПМ, различаемых по составу выполняемых функций. Будем считать, что множества функций, выполняемых МФПМ различного типа, не пересекаются. В этом случае множество выполняемых в ПС функций и множество МФПМ можно разбить на z непересекающихся подмножеств, что позволяет оценить вероятность безотказной работы ПС как

$$P = \prod_{i=1}^z P_i,$$

где P_i – вероятность безотказной работы подсистемы ПС, включающей МФПМ i -го типа (по функциональной комплектации).

Значение P_i вычисляется по формулам, приведенным выше, для ПС из функционально однородных пьезомодулей.

Приближенная оценка. Оценка вероятности безотказной работы по методу включения–исключения для ПС из пьезомодулей общего вида (3.4.2) сопряжена с достаточно сложными расчётами. Более просто получить приближенную оценку при представлении структуры пьезомодулей вида (3.4.2) структурой пьезомодулей вида (3.4.3).

При нижней (пессимистической) оценке вероятности безотказной работы будем считать, что для преобразования нанотехнологического оборудования к структуре МФПМ Ω относятся пьезомодули

$\Phi_i \setminus \left(\bigcap_{j=1}^n \Phi_j \right) \cup \left(\bigcup_{k=1}^{i-1} \Phi_k \right)$, то есть отказ любого пьезомодуля, задействованного при выполнении более одной функции, вызывает отказ всего нанотехнологического оборудования.

При верхней (оптимистической) оценке вероятности безотказной работы для преобразованной нанотехнологического оборудования к структуре МФПМ Ω , отказ которого вызывает отказ всего нанотехнологического оборудования, относятся пьезомодули $\bigcup_{i=1}^m \Phi_i$.

Задачи пьезомодуля, используемого при реализации нескольких (но не всех) функций, распределяется между непересекающимися множествами $\Phi_i \setminus \Omega$. Например, возможно распределение, при котором в пьезомодуль $\Phi_i \setminus \Omega$ включается $\Phi_i \setminus \left(\bigcap_{j=1}^n \Phi_j \right) \cup \left(\bigcup_{k=1}^{i-1} \Phi_k \right)$. Следует отметить, что чем более равномерно (по суммарной интенсивности отказов) распределение пьезомодулей по множеству $\Phi_i \setminus \Omega$, тем более оптимистична верхняя оценка.

Относительная погрешность предлагаемой оценки:

$$\delta = 0,5 \frac{P_B - P_H}{P_H},$$

где P_B и P_H – вероятности безотказной работы ПС, вычисляемые по формуле (3.4.6) или (3.4.7) при представлении структуры МФПМ, соответственно, для верхней и нижней оценки.

Оцениваемая погрешность предлагаемого метода зависит от равномерности распределения пьезомодулей по множеству $\Phi_i \setminus \Omega$, причём она минимальна при наиболее неравномерном распределении.

Если полученная точность расчётов недостаточна, то возможно её уточнение на основе метода включения–исключения, который при некоторой громоздкости вычислений позволяет получить любое требуемое при-

ближение. Приближенная оценка по методу включения–исключения осуществляется на основе формулы (3.4.4) с учётом того, что при ограничении точности вычислений до члена со знаком плюс получаем верхнюю оценку, а со знаком минус – нижнюю [31].

Последовательное и параллельное расположение пьезомодулей.

Надёжность систем из МФПМ зависит от системы автоматического управления этими пьезомодулями, а в целом ПС, а также надёжностью работы самих пьезомодулей, в которых реализуется преобразование электрической энергии в механическую.

Все ПС можно разделить на конструкции с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным соединением пьезомодулей. При последовательном соединении пьезомодулей (рис. 3.4.1.) погрешность позиционирования ПС пьезосканера представляет собой векторную сумму погрешностей по всем степеням подвижности. При параллельном соединении пьезомодулей (рис. 3.4.2.), как это имеет место, например, в пьезосканерах на основе l -координат, погрешность положения одного пьезомодуля независима от положения других. В этом большое преимущество таких ПС с позиции точности положения рабочего органа.

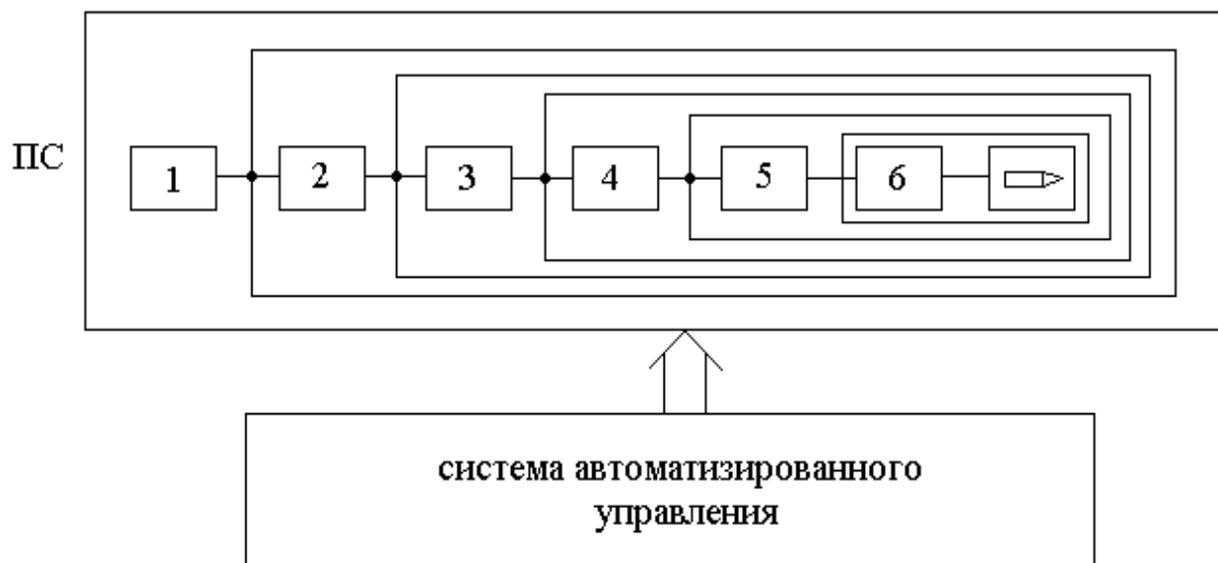


Рис. 3.4.1. Структурная схема ПС с последовательным расположением пьезомодулей

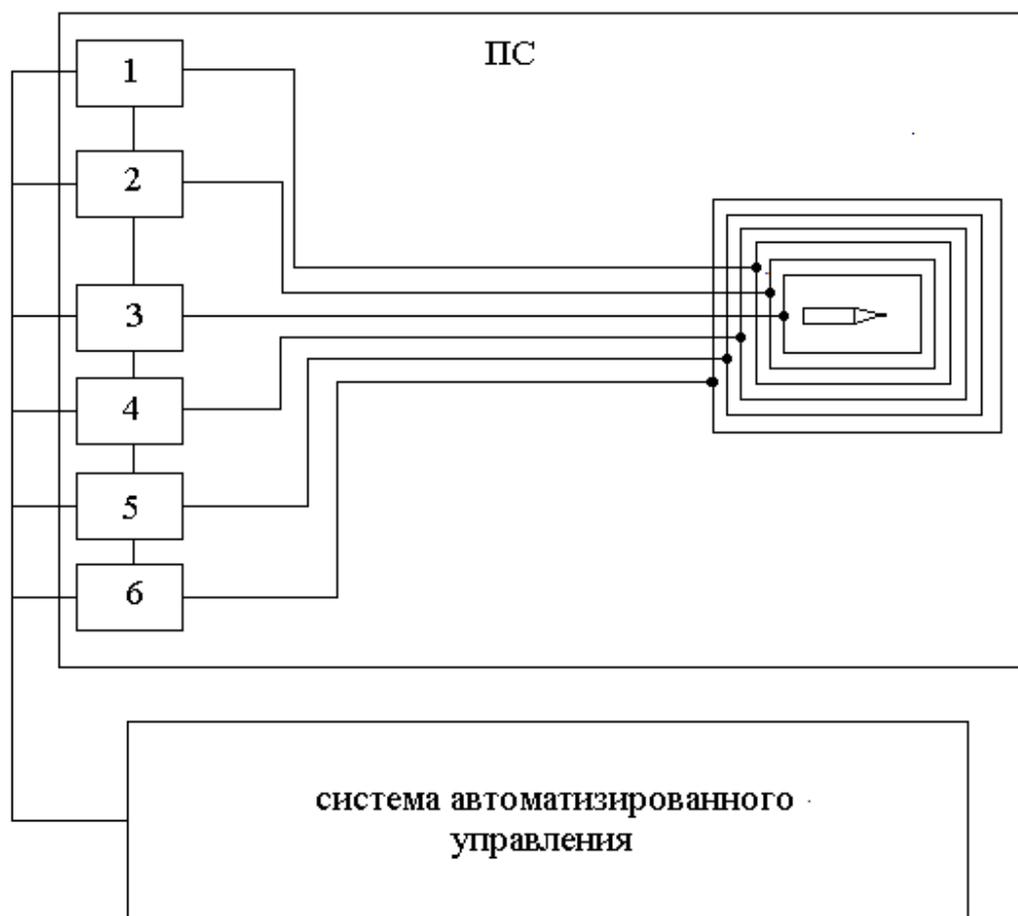


Рис. 3.4.2. Структурная схема ПС с параллельным расположением пьезомодулей

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ НА ЭВМ

4.1. 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 [5].

Перемещение конца пьезодвигателя-трубки (рис. 4.1.1) равно

$$\xi = 2 \frac{d_{31} \ell U}{D - d} - 4 \frac{S_{11} \ell F_c}{\pi (D^2 - d^2)}, \quad (4.1.1)$$

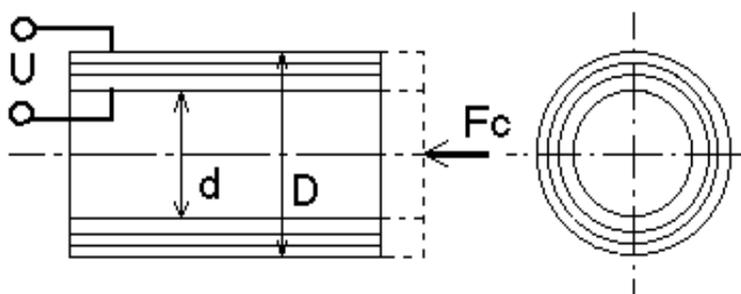


Рис. 4.1.1. Пьезодвигатель-трубка

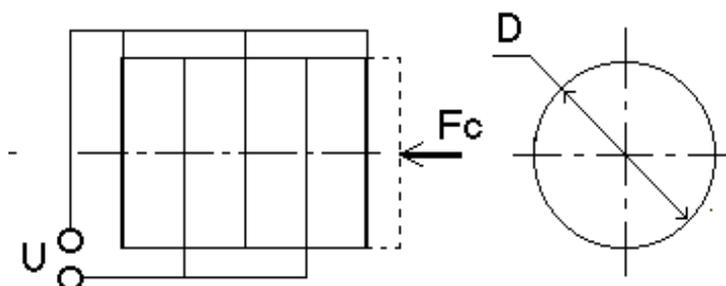


Рис. 4.1.2. Пьезодвигатель-столбец

пьезодвигателя-столбца (рис. 4.1.2):

$$\xi = nd_{33}U - 4\frac{nS_{33}hF_c}{\pi D^2}, \quad (4.1.2)$$

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.

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:

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{31}(d + D)U}{2S_{11}}; \quad (4.1.3)$$

для пьезостолбца:

$$F_{c \max} = \frac{\pi d_{33}D^2U}{4S_{33}h}. \quad (4.1.4)$$

На рис. 4.1.3 представлены зависимости изменения размера пьезосканера от приложенного напряжения.

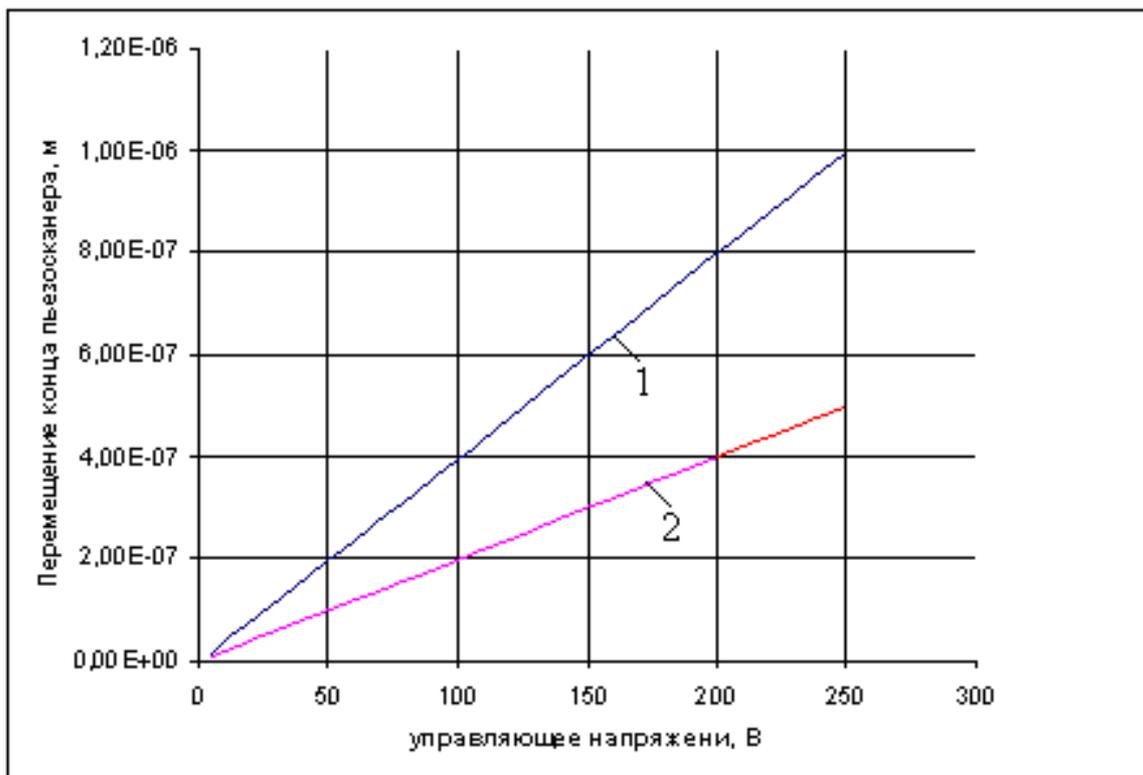


Рис. 4.1.3. Зависимости изменения размера пьезосканера от приложенного напряжения:

1 – для пьезодвигателя-трубки, 2 – для пьезодвигателя-столбца

4.2. Многокритериальный выбор пьезосканера

Формирование альтернатив:

a_1 – пневмомеханический привод;

a_2 – электромеханический привод;

a_3 – пьезоэлектрический привод;

a_4 – магнитострикционный 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.

Альтернативы и критерии выбора пьезосканера представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Альтернативы и критерии выбора пьезосканера

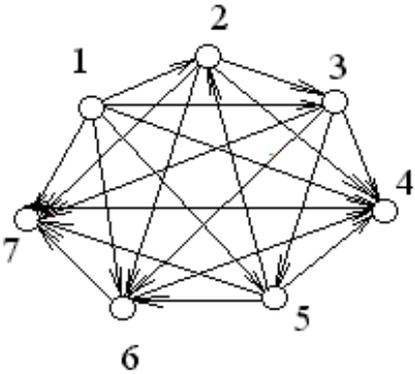
	Пневмомеханический привод	Электро-механический привод	Пьезоэлектрический привод	Магнитострикционный привод
Быстродействие, с	0,05	0,1	0,05	0,05
Погрешность позиционирования, мкм	10	5	0,5	1
Ход исполнительного устройства, мм	100	50	3	2
Масса устройства, кг	7	9	0,3	0,5
Стоимость, у.е.	4	4	7	8
Ресурс, лет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

4.2.1. Определение представительного вектора критерия

Для определения представительного вектора критерия найдём коэффициенты весомости критериев. 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



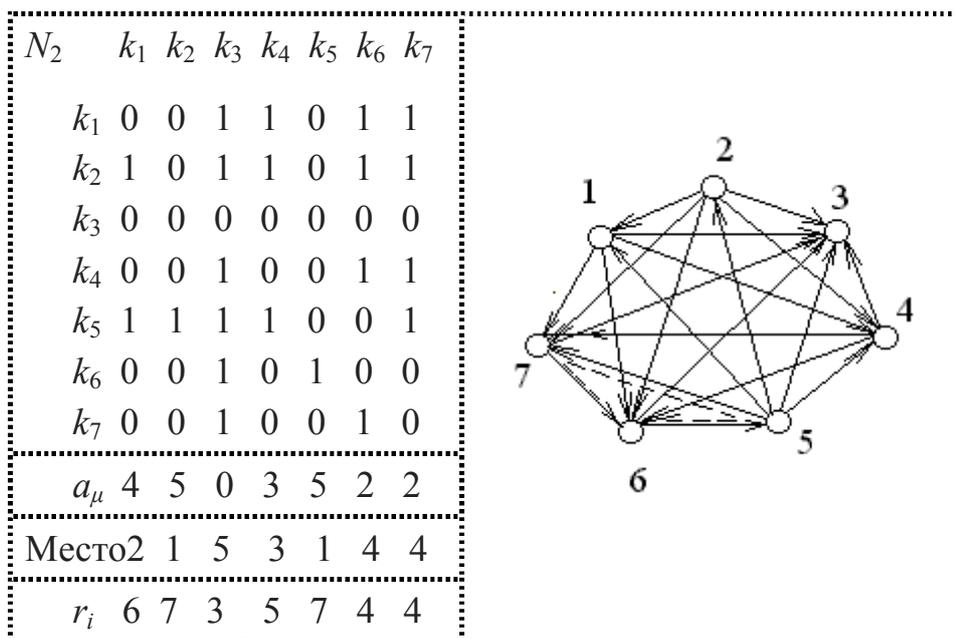
$$a_j = 1 - \left(\frac{24d}{m^3 - m} \right), \text{ если } m\text{-нечётное,}$$

где m – число объектов;

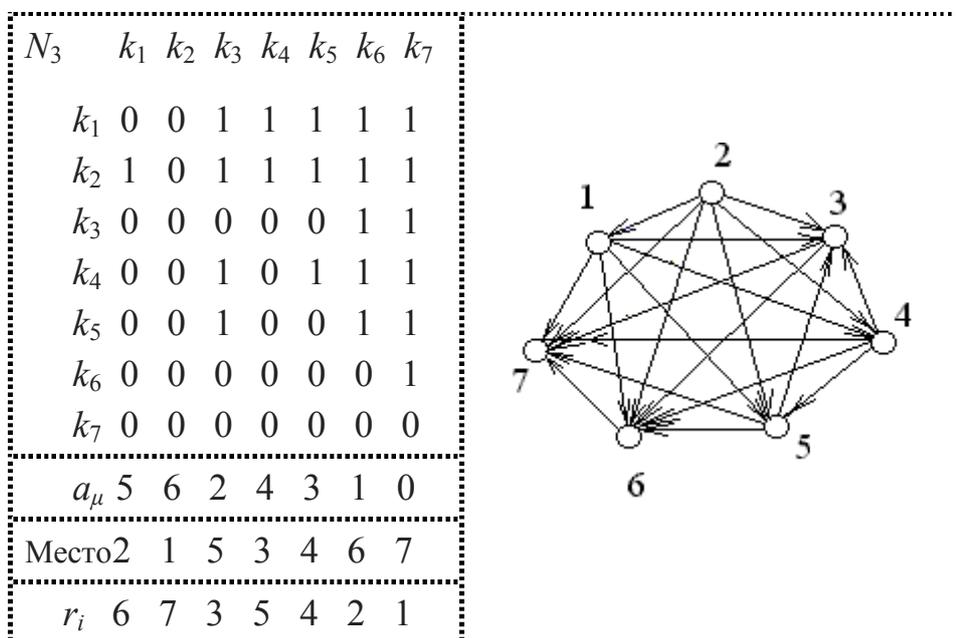
d – число циклов длиной 3.

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

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

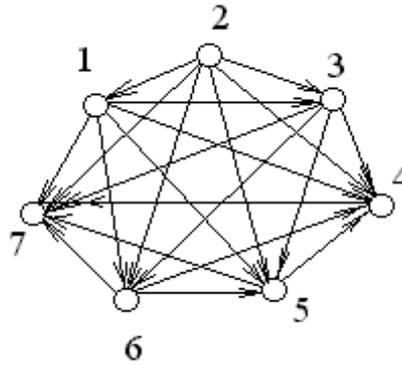


$$a_2 = 1 - \left(\frac{24 \cdot 1}{343 - 7} \right) = 0,93.$$



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

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



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

4.2.2. 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.

4.2.3. 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 быстроедействие;

F_2 – предпочтительная погрешность позиционирования;

F_3 – предпочтительный ход исполнительного устройства;

F_4 – желаемая масса устройства;

F_5 – желаемая стоимость.

4.2.4. Построение функции принадлежности

Смоделированные функции принадлежности представлены на рис. 4.2.1÷4.2.5.

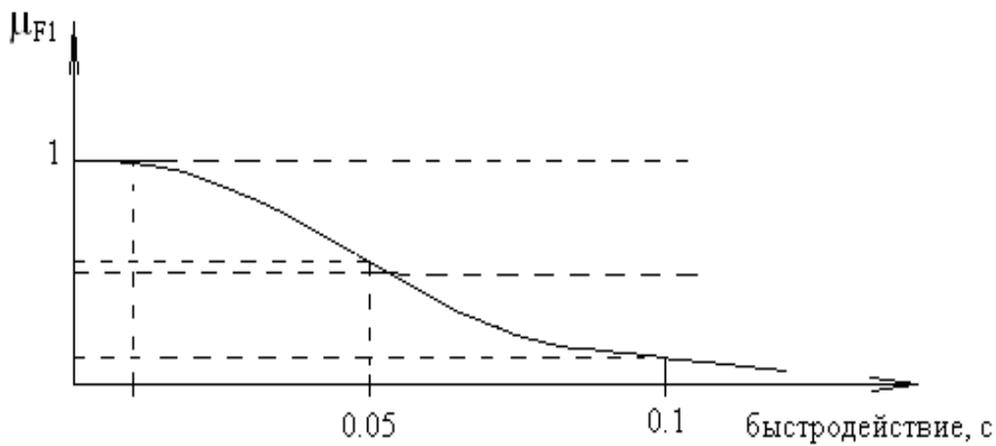


Рис. 4.2.1. Быстродействие привода

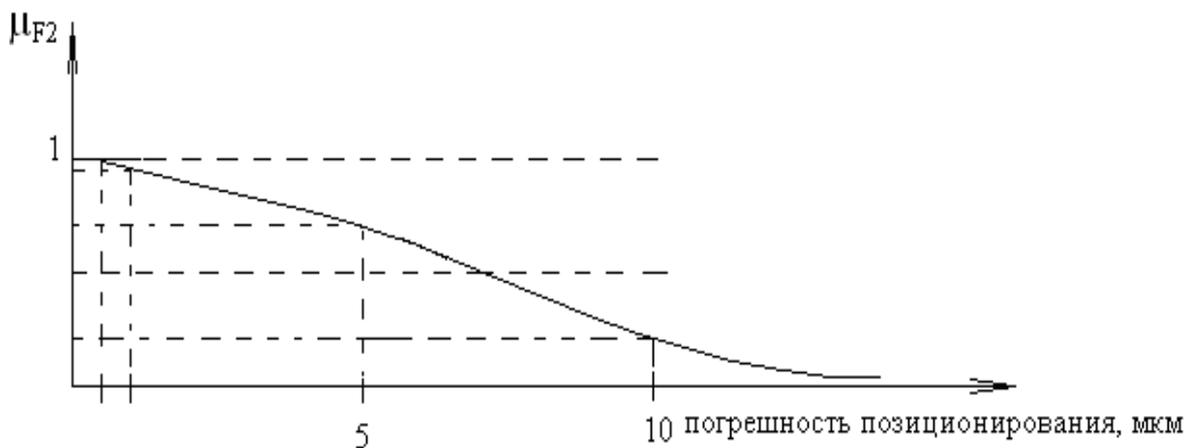


Рис. 4.2.2. Погрешность позиционирования привода

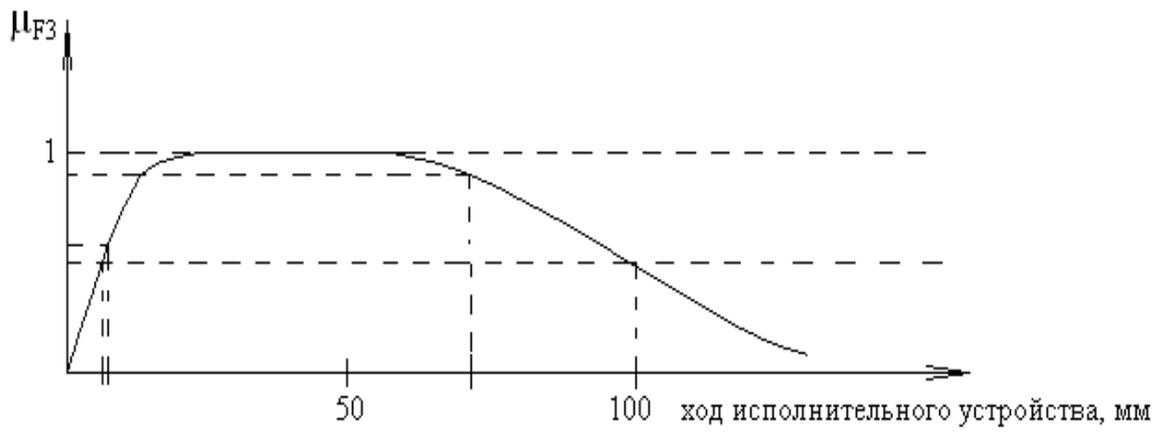


Рис. 4.2.3. Ход исполнительного устройства

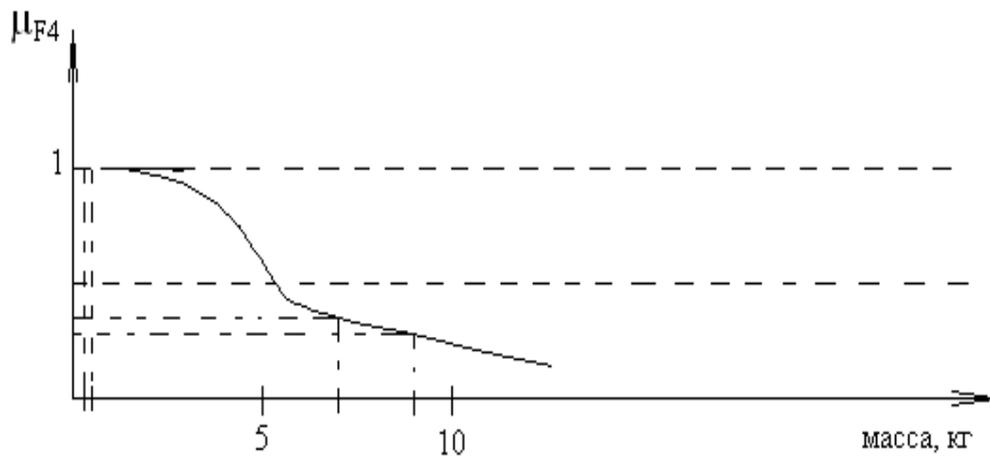


Рис. 4.2.4. Масса устройства

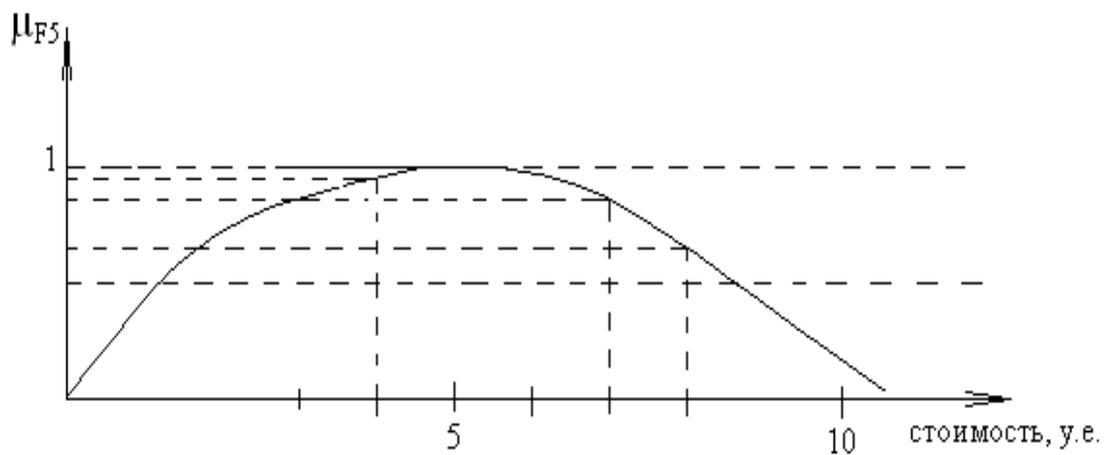


Рис. 4.2.4. Стоимость устройства

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:

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

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

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

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

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

4.2.5. 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.

4.3. Пьезосканер для нанотехнологии

Пьезосканер для нанотехнологии представлен на рис. 4.3.1. 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 переме-

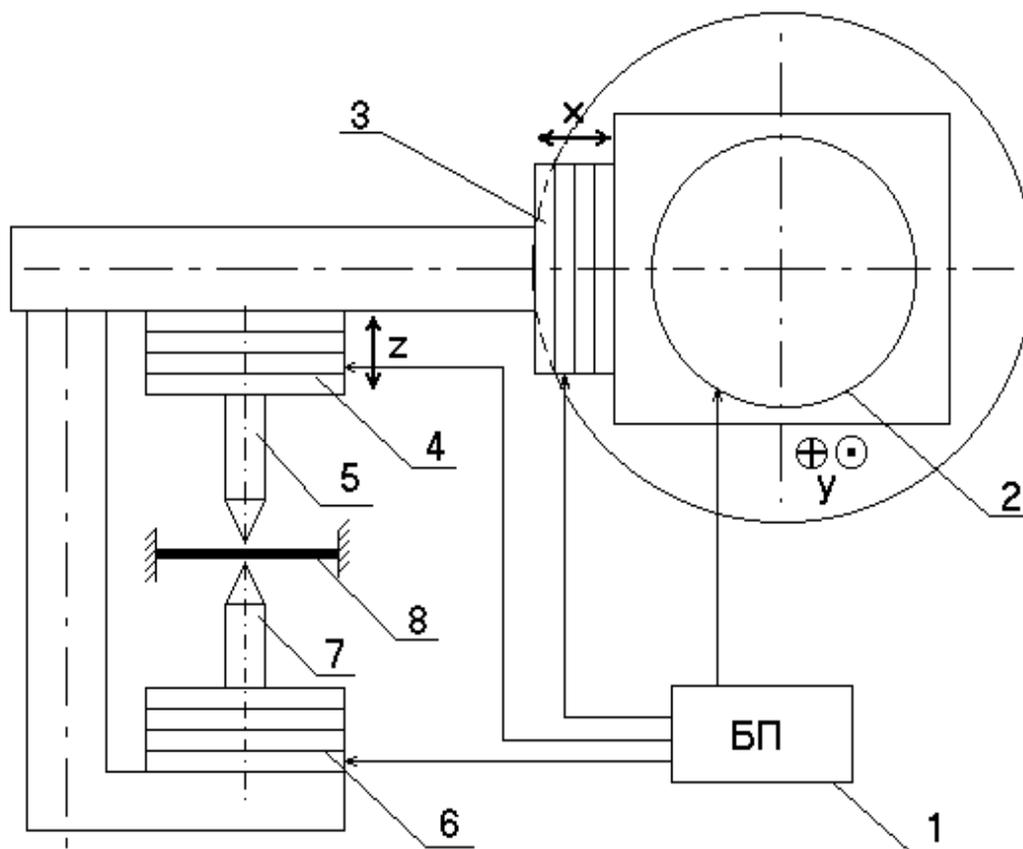


Рис. 4.3.1. Пьезосканер для нанотехнологии

мещение 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.

4.3.1. 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. 4.2 приведены основные характеристики данного материала.

Таблица 4.2

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 $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$		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
Плотность, $\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$, не менее		7,0
Водопоглощение, %, не более		0,2

4.3.2. Расчет основных характеристик и параметров пьезосканера

Пьезопривод можно представить как «черный ящик» с входом и выходом рис. 4.3.2.

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. 4.3.1) одинаковые и расчёты можно провести только для одного модуля.



Рис. 4.3.2. 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.

4.3.2.1. Расчёт характеристик

По приведенным выше формулам (1.1.2)-(1.1.6) 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 :

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

4.3.2.2. Расчёт максимального усилия и перемещения конца пьезостолбца

По формулам для пьезопреобразователя столбца (4.1.2) и (4.1.4), схематично показанного на рис. 4.3.3, произведем расчёт максимального усилия и перемещения конца пьезостолбца.

Максимальное усилие для пьезостолба:

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

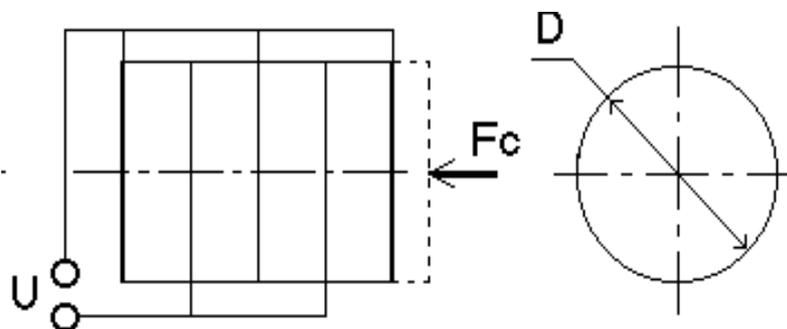


Рис. 4.3.3. Схема пьезостолбца

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(6):

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

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

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

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

4.3.2.3. 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:

$$\nu_1 = \frac{1,758 \cdot 5}{2\pi \cdot 20^2} \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{11}}{7,0}} = 349,7 \text{ кГц.}$$

Для пьезомодуля 4(б):

$$\nu_1 = \frac{1,758 \cdot 5}{2\pi \cdot 20^2} \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^{11}}{7,0}} = 349,7 \text{ кГц.}$$

4.3.2.4. 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 $S' > S$.

Произведем 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.

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 ниже следующий 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:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + \rho S \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 , \quad (4.4.1)$$

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:

$$y = X(x) \cos \omega t , \quad (4.4.2)$$

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

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

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2 X}{dx^2} \right) - \rho \omega^2 SX = 0 . \quad (4.4.3)$$

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:

$$\nu_1 = \frac{1,758}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} , \quad (4.4.4)$$

где r – радиус основания,

l – длина стержня.

4.4.2. Призматический стержень

Рассмотрим поперечные колебания призматического стержня (рис.4.4.1,а) в плоскости XY , которая является плоскостью симметрии для его поперечных сечений. Через Y 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. 4.4.1. б показан малый элемент стержня длиной dx , а также внутренние и внешние силы, действующие на него.

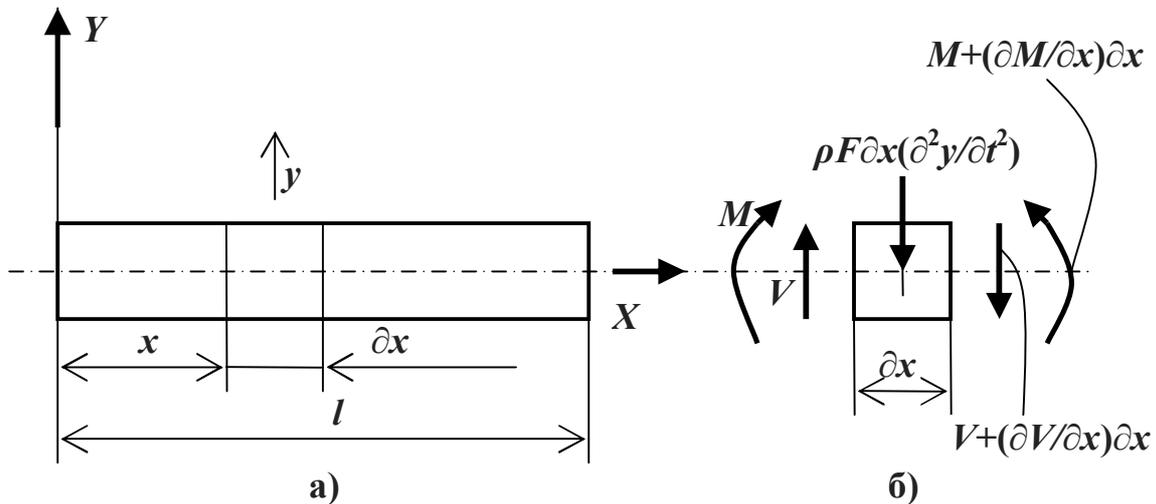


Рис. 4.4.1. Призматический стержень

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 Y , имеет вид:

$$V - V - \frac{\partial V}{\partial x} dx - \rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (4.4.5)$$

а условие равенства моментов даёт:

$$-Vdx + \frac{\partial M}{\partial x} dx \approx 0 . \quad (4.4.6)$$

Выражая V из уравнения (4.4.6) и подставляя результат в уравнение (4.4.5), получим

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} . \quad (4.4.7)$$

Из элементарной теории изгиба стержней имеем соотношение

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} . \quad (4.4.8)$$

Подставляя это выражение в уравнение (4.4.7), находим

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} , \quad (4.4.9)$$

что является общим уравнением поперечных свободных колебаний стержней.

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

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx = -\rho F dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} . \quad (4.4.10)$$

Это уравнение может быть представлено и в такой форме:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} , \quad (4.4.11)$$

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:

$$y = X(A\cos\omega t + B\sin\omega t) . \quad (4.4.12)$$

Для удобства записи, здесь опущен индекс i , обозначающий i -ю форму колебаний. Подставляя (4.4.12) в уравнение (4.4.10), получим

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - \frac{\rho^2}{a^2} X = 0 . \quad (4.4.15)$$

Учитывая необходимость решать обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка, введём обозначение

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

и перепишем уравнение (4.4.13) в виде

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k^4 X = 0 . \quad (4.4.14)$$

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

$$e^{nk} (n^4 - k^4) = 0 . \quad (4.4.15)$$

Откуда

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

Общее решение уравнения (4.4.15):

$$X = Ce^{kx} + De^{-kx} + Ee^{ikx} + Fe^{-ikx} , \quad (4.4.16)$$

можно записать в следующей эквивалентной форме:

$$X = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx . \quad (4.4.17)$$

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

Постоянные C_1 , C_2 , C_3 и C_4 , входящие в выражение (4.4.17), 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

$$X = 0; \quad X'' = 0.$$

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

$$X = 0; \quad X' = 0.$$

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

$$X'' = 0; \quad X''' = 0.$$

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 $x = 0; \quad X = 0; \quad X'' = 0;$

при $x = l; \quad X = 0; \quad X'' = 0.$

Дважды продифференцируем (4.4.17) и с учётом концевых условий получим:

$$C_2 + C_4 = 0; \quad C_1 \operatorname{sinkl} + C_3 \operatorname{shkl} = 0;$$

$$-C_2 + C_4 = 0; \quad -C_1 \operatorname{sinkl} + C_3 \operatorname{shkl} = 0,$$

откуда $C_2 = C_3 = C_4 = 0,$

и $C_1 \operatorname{sinkl} = 0,$

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

$$\operatorname{sinkl} = 0.$$

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

$$k_i l = i\pi, \text{ или } k_i = \frac{i\pi}{l}, \quad (4.4.18)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$

$$\text{Из } \frac{\omega^2}{a^2} = k^4 \text{ получаем } k_i^4 = \frac{\rho F \omega_i^2}{EI}. \quad (4.4.19)$$

Поэтому из (4.4.18) и (4.4.19) собственные круговые частоты рассматриваемой балки будут иметь вид

$$\omega_i = k_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho F}} = \frac{i^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}, \quad (4.4.20)$$

в герцах:

$$\nu = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{i^2 \pi^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho F}}. \quad (4.4.21)$$

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:

$$\nu_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1.014 \sqrt{b^2 + h^2}}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.4.22)$$

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

$$I_z = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{l} \right)^4 X^4. \quad (4.4.23)$$

Площадь поперечного сечения конуса

$$S(X) = \pi y^2 = \pi \left(\frac{r}{l} \right)^2 X^2. \quad (4.4.24)$$

Подставляя (4.4.23) и (4.4.24) в уравнение (4.4.1), получим:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E \frac{\pi}{4} \left(\frac{r}{l} \right)^4 x^4 X'' \right) - \rho \omega \pi \left(\frac{r}{l} \right)^2 x^2 X = 0. \quad (4.4.25)$$

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

$$x^2 X^{IV} + 8x X^{III} + 12X^{II} - \lambda^2 X = 0. \quad (4.4.26)$$

Уравнение (4.30) имеет точное решение, выраженное через функции Бесселя.

Таким образом, первая частота колебаний конуса

$$v_1 = \frac{4.359}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (4.4.27)$$

4.4.4. Поверхности сложной формы.

Поверхность вращения параболы

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

$$v = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{42}}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx \frac{6.5}{2\pi} \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} . \quad (4.4.28)$$

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) $h \times b = 12 \times 17$ мм; 15×21 мм; 22×32 мм и различными длинами, для цилиндрического, конусоидального, призматического стержня и поверхности вращения параболы представлены на рис. 4.4.2 ÷ 4.4.5.

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

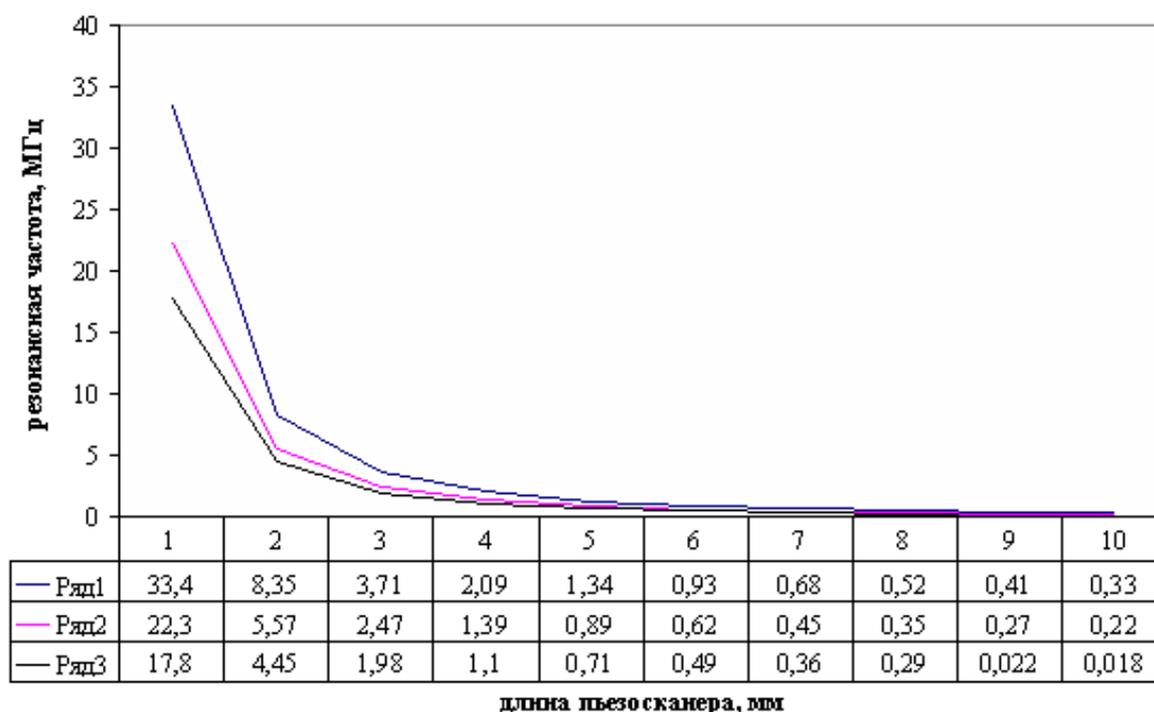


Рис. 4.4.2. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде цилиндрического стержня

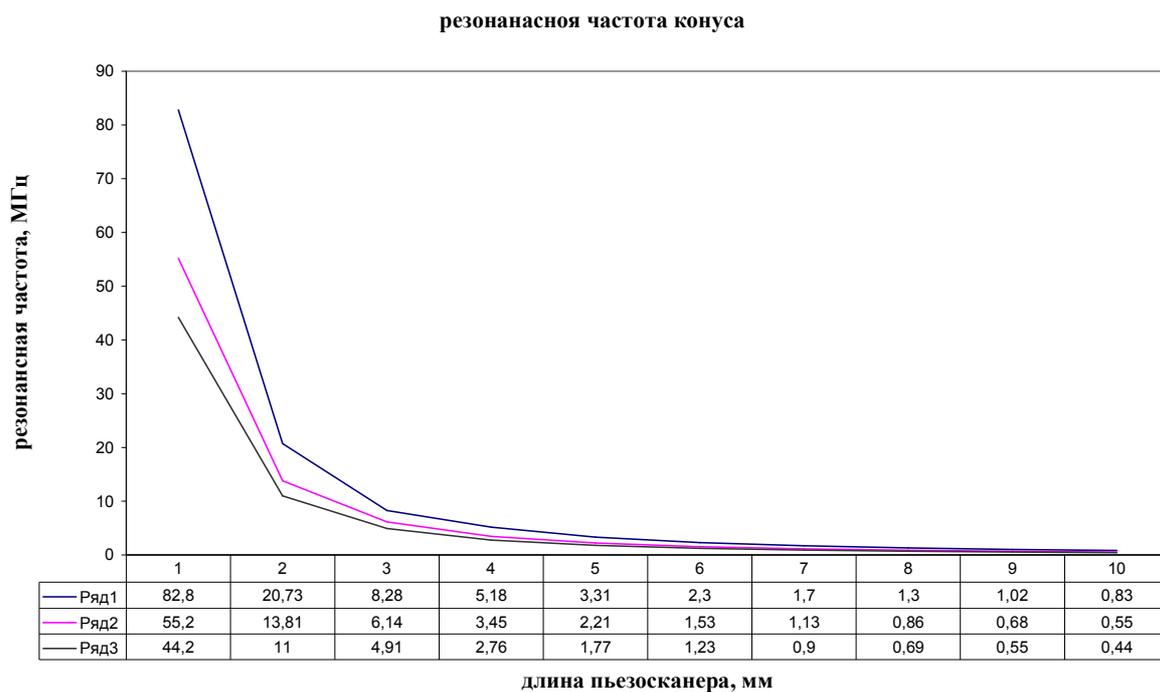


Рис. 4.4.3. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде конуса

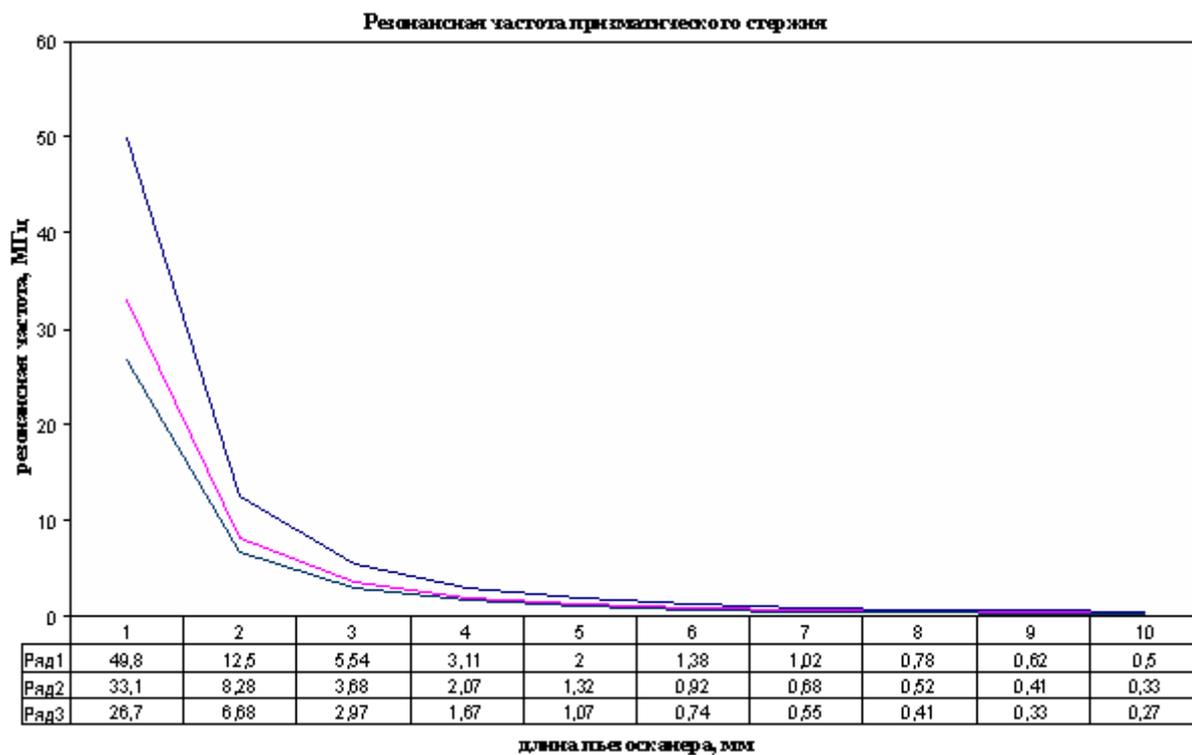


Рис. 4.4.4. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде призматического стержня

резонансная частота поверхности вращения

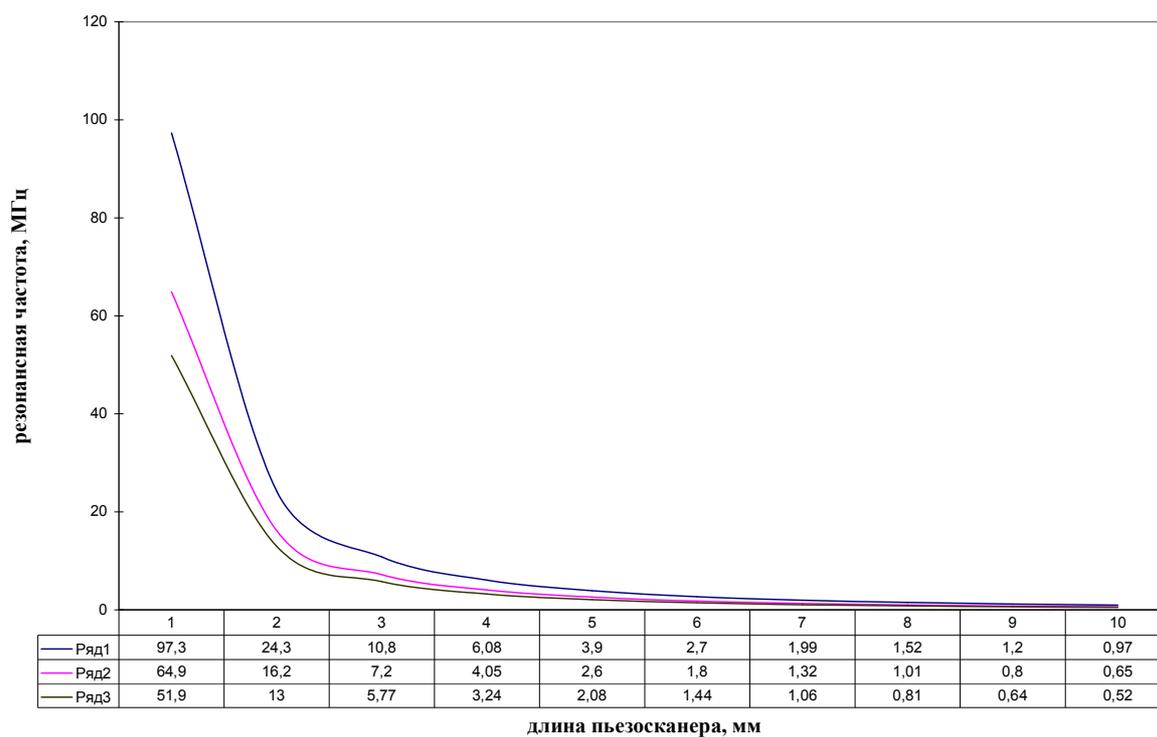


Рис. 4.4.5. Зависимость первой резонансной частоты для пьезосканера, выполненного в виде поверхности вращения

ГЛАВА 5. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПЬЕЗОСКАНЕРА

5.1. Алгоритмы поиска технических решений пьезосканеров

Разработанные алгоритмы поиска технических решений пьезосканеров являются элементами системы автоматизированного проектирования, позволяющими проектировать пьезосканер как исполнительный орган в системе обратной связи сканирующего зондового микроскопа. Чтобы уменьшить время, затрачиваемое на проектирование пьезосканеров, необходимо автоматизировать этот процесс, что и позволяют сделать алгоритмы поиска технических решений пьезосканеров.

Алгоритм выбора наилучшего варианта ПС с помощью обобщенного критерия оценки качества представлен на рис. 5.1.1÷5.1.3.

На первом этапе осуществляется выбор допустимых ПС, удовлетворяющих техническому заданию (ТЗ).

При этом возможны три ситуации: ТЗ соответствует несколько ПС; ТЗ соответствует один ПС; ТЗ не удовлетворяет ни один ПС. В первой ситуации переходим ко второй стадии выбора, во второй – задачу считаем решённой, в третьей ситуации либо пересматриваем ТЗ, либо выбираем ближайший прототип и модернизируем его, после чего добавляем обновленный ПС в морфологическую таблицу, либо разрабатываем новую конструкцию, затем добавляем новый ПС в морфологическую таблицу.

Во второй стадии осуществляется выбор оптимальных ПС (принадлежащих множеству Парето).

В третьей стадии выбирается лучший ПС с помощью обобщённого критерия оценки качества. Желательно иметь некоторую добавочную ин-

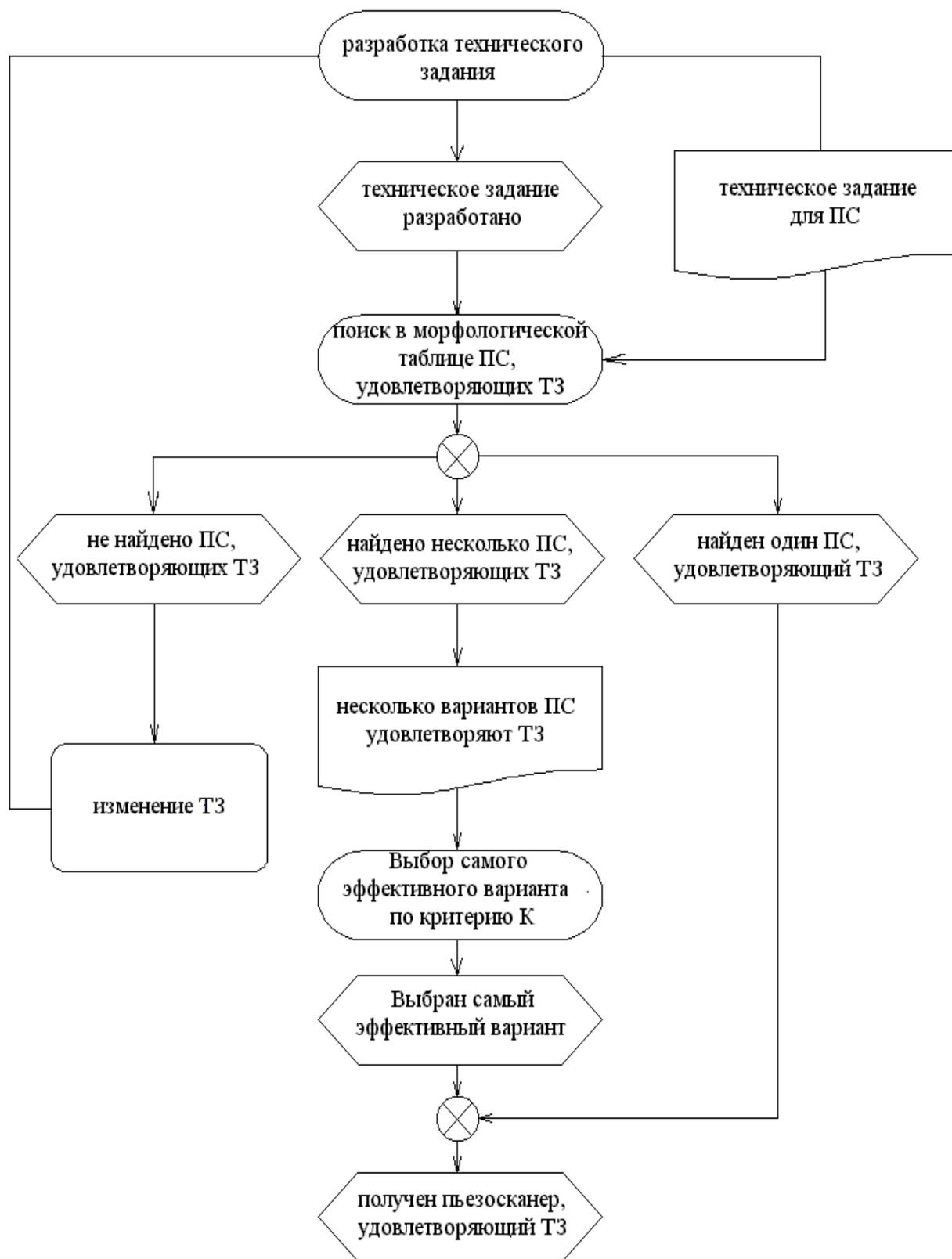


Рис. 5.1.1. Алгоритм выбора оптимального ПС, удовлетворяющего техническому заданию



Рис. 5.1.2. Алгоритм выбора лучшего варианта пьезосканера

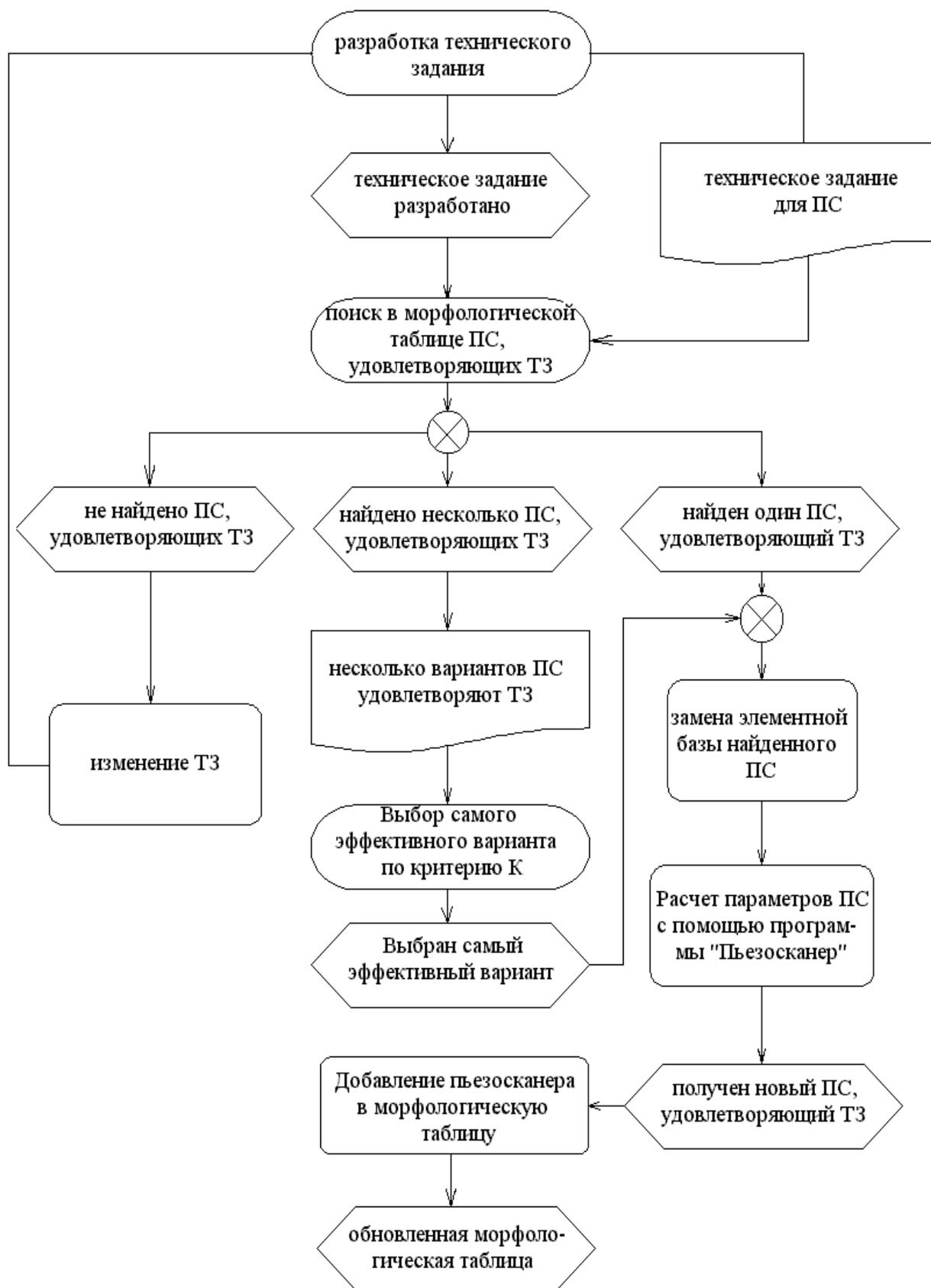


Рис. 5.1.3. Алгоритм выбора, в случае когда не найден ПС, удовлетворяющий техническому заданию

формацию о критериях, что позволило бы выделить ту или иную часть множества Парето или даже найти некоторую единственную точку этого множества. Первое, в чём нуждается проектировщик это в возможно большем количестве информации о критериальном множестве. Только обладая такой информацией, он способен рационально подобрать параметры, используя методы соответствующие требованиям проектирования ПС. Для получения такой информации проводятся теоретические и экспериментальные исследования.

Задача критериальной оптимизации пьезосканеров может быть решена последовательной максимизацией критериев в сужающих подмножествах $A_i \subset G_{xp}$ допустимого множества.

Первое подмножество:

$$\max_{X \in G_{xp}} f_1(X) = f_1^*, \quad A_1 = \{X : X \in G_{xp}, f_1(X) = f_1^*\};$$

второе подмножество:

$$\max_{X \in A_1} f_2(X) = f_2^*, \quad A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) = f_2^*\};$$

m -е подмножество:

$$\max_{X \in A_{m-1}} f_m(X) = f_m^*, \quad A_m = \{X : X \in A_{m-1}, f_m(X) = f_m^*\}$$

Максимальная точка m -го шага является решением исходной задачи. Если к некоторому шагу множества, A_i состоит только из одной точки, то эта точка является решением задачи. Наиболее естественно задачи оптимизации решаются в случае, когда допустимое и критериальное множества – дискретны. Однако если G_{xp} и $F(X)$ непрерывны, то построение подмножества A_i – довольно сложная задача.

Рассматриваемый метод решения задачи оптимизации состоит из стадий, на каждой из которой следует определить максимум функции $f_i(X)$

на множестве A_i , то есть задача оптимизации с ограничениями в виде равенства решается на каждой стадии. Эту задачу можно заменить одной оптимизационной [76].

Возможность этого легко доказать, если критериальное множество F конечно. Однако составленные функции полезности включают максимальное значение критерия f_i . Поэтому хотя функция полезности и может быть построена, но прежде нужно решить m задач на максимум. Например, выбрав в качестве главного критерия $f_1(X)$ и рассматривая остальные критерии как ограничения, получаем традиционную задачу математического программирования:

$$\max_{X \in A} f_1(X) = f_1^*, \quad A = \{X : X \in G_{xp}, \quad f_i(X) \geq a_i, \quad i = 2, 3, \dots, m\},$$

где уровни ограничений a_i могут определяться целями проектирования, известными параметрами прототипа и т.д.

Если, по крайней мере, один из ограничивающих уровней будет слишком высок:

$$a_i > \max_{X \in G_{xp}} f_i(X).$$

Получим пустое множество A . С другой стороны, a_i не может быть ниже допустимого уровня i -ого критерия. Выбор a_i особенно труден, когда критерии противоречивы, например, цена и надёжность. Для того чтобы выбрать уровни a_i , необходимо найти как максимумы всех критериев, так и их средние значения. При использовании этого подхода часто необходимо повторно решать задачи оптимизации, отличающиеся только правыми частями неравенств в ограничениях. Для ряда практических задач критерии могут быть проранжированы. Предположим, что наиболее значимым является критерий с наименьшим номером и каждому критерию приписан порог d_i . Этот порог указывает допустимое отклонение от максимального значения критерия $f_i(X)$ при улучшении значений менее значимых крите-

риев. Тогда вычисление максимального значения наиболее важного критерия определяет допустимую область для максимизации критериев более низкого ранга. Чтобы взяться за многокритериальную проблему таким путём, необходимо решать следующие оптимизационные задачи:

$$a_1 = \max_{X \in G_{xp}} f_1(X), \quad A_1 = \{X : X \in G_{xp}, f_1(X) \geq a_1 - d_1\};$$

второе подмножество:

$$a_2 = \max_{X \in A_1} f_2(X) = f_2^*, \quad A_2 = \{X : X \in A_1, f_2(X) \geq a_2 - d_2\}.$$

Решением многокритериальной задачи является точка максимума m -й задачи на максимум, рассмотренная выше. До решения задачи сложно определить значения порогов. Если все $d_i = 0$, тогда мы имеем решение лексикографической проблемы. Если d_i так велики ($d_i > d_{i\max}$), что дополнительные ограничения не сужают допустимые множества $\{X: f_i(X) \geq a_i - d_i\}$, то полученное решение совпадает с точкой максимума критерия низшего ранга. Таким образом, используя этот метод, необходимо экспериментировать с различными d_i , постоянно консультируясь с экспертами проблемной области.

В общем случае, точка максимума может не принадлежать множеству эффективных точек, однако можно доказать, что если X – ограниченное замкнутое множество и все функции $f_i(X)$ непрерывны, то решающее множество последовательностей d_i - X содержит по крайней мере одну эффективную точку. Данный метод может быть рекомендован для задач, критерии которых естественно ранжируются по важности.

5.2. Разнообразие пьезоэлементов

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять переме-

щения 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 изготавливаются из пьезоэлектриков – материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрики изменяют свои размеры во внешнем электрическом поле. Уравнение обратного пьезоэффекта для кристаллов записывается в виде

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

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. 5.2.1) во внешнем поле [37]. 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 $u_{yy} = d_{\perp} \cdot E_x$.

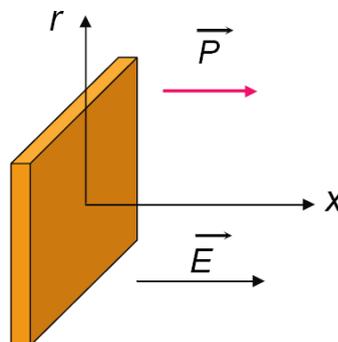


Рис. 5.2.1. Пластина из пьезокерамики во внешнем электрическом поле

Широкое распространение получили трубчатые пьзоэлементы (см. рис. 1.1.2). Они позволяют получать достаточно большие перемещения объектов при относительно небольших управляющих напряжениях. Трубчатые пьзоэлементы представляют собой полые тонкостенные цилиндры, изготовленные из пьзокерамических материалов. Обычно электроды в виде тонких слоев металла наносятся на внешнюю и внутреннюю поверхности трубки, а торцы трубки остаются непокрытыми.

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 пьзотрубки равно

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

где h – толщина стенки пьзотрубки, 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. 5.2.2) позволяет организовать прецизионные перемещения зонда микроскопа в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Такой сканирующий элемент называется триподом.

Недостатками такого пьзосканера являются сложность изготовления и сильная асимметрия конструкции. На сегодняшний день наиболее широко используются пьзосканеры, изготовленные на основе одного

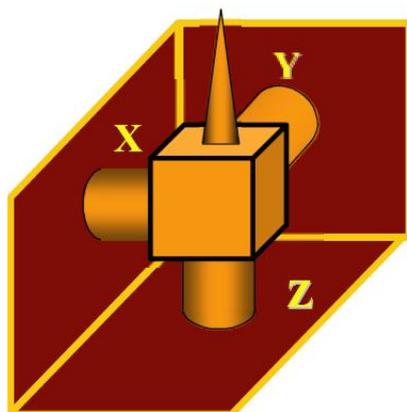


Рис. 5.2.2. Сканирующий элемент в виде трипода, собранный на трубчатых пьезоэлементах

трубчатого элемента (см. рис. 1.1.3). Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

Внутренний электрод обычно сплошной. Внешний 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. 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 [37].

Широкое распространение получили также пьезосканеры на основе биморфных пьезоэлементов. Биморф представляет собой две пластины пьезоэлектрика, склеенные между собой таким образом, что векторы поляризации в каждой из них направлены в противоположные стороны (рис. 5.2.3).

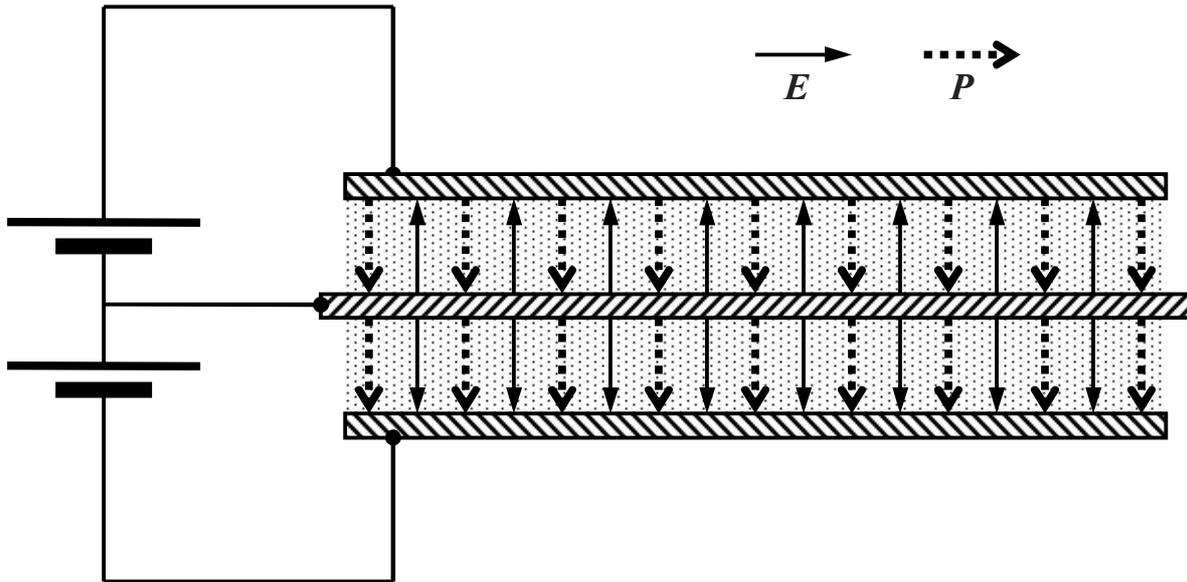


Рис. 5.2.3. Устройство биморфного пьезоэлемента

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. 5.2.4).

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. 5.2.5) [37].

Действительно, подавая противофазные напряжения на противоположные пары секций внешних электродов, можно изгибать биморф так, что зонд будет двигаться в плоскости XU (см. рис. 5.2.5,а,б). Изменяя потенциал внутреннего электрода относительно всех секций внешних электродов, можно прогибать биморф, перемещая зонд в направлении Z (см. рис. 5.2.5,в,г).

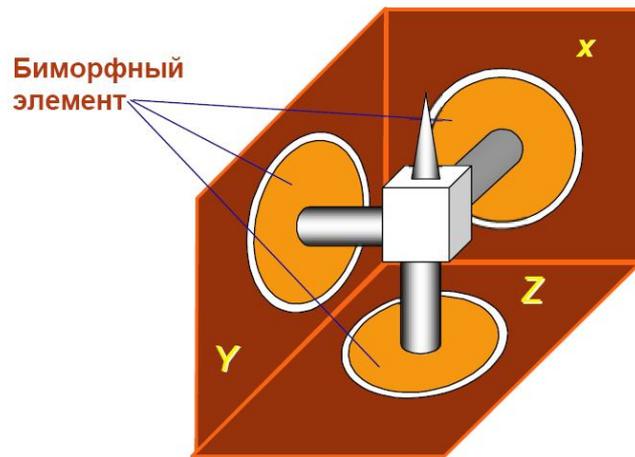


Рис. 5.2.4. Трёхкоординатный сканер на трёх биморфных элементах

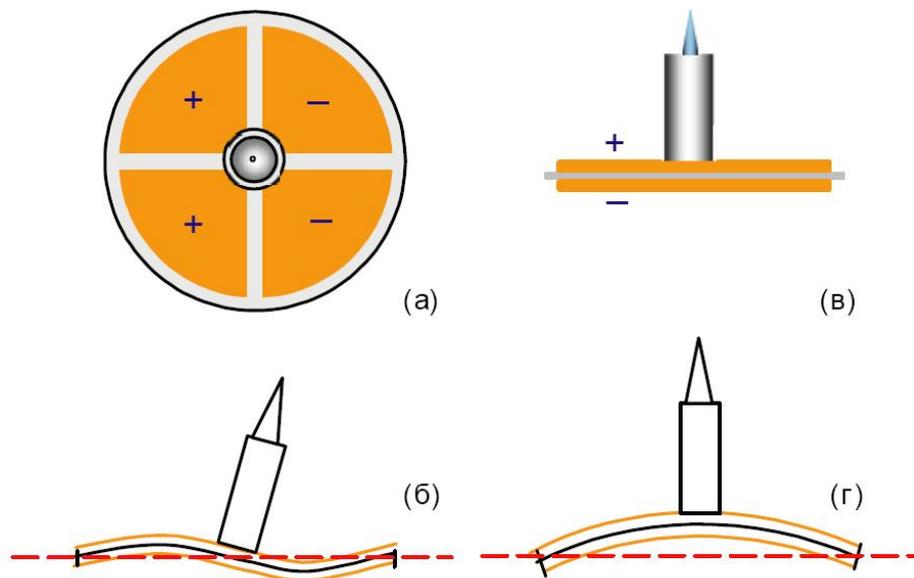


Рис. 5.2.5. Схематическое изображение работы биморфного пьезосканера

5.3. Морфологические характеристики пьезокерамических материалов

Морфологические характеристики пьезокерамических материалов представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1
Характеристики пьезокерамических материалов

материал	Электрофизические свойства								
	$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	$\operatorname{tg} \delta$	k_p	d_{33} , пКл/Н	$-d_{31}$, пКл/Н	Q_M	T_k , °C	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	
«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	—	—
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
материалы ср. "жесткости"	PZTI-1	2200±200	<0.0008	0.58	>350	>180	>450	—	—
	PZTI-2	1800±150	<0.005	0.60	—	>150	>500	—	—
"сегнотожесткие" 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	
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	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
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
ЦТСБС-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”
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.

$\operatorname{tg} \delta$ – 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.

5.4. Разработка технических решений функциональных систем и устройств на основе пьезопроводов

5.4.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений

В основу разработки положена задача обеспечения одновременной реализации нанотехнологических процессов по трём координатным направлениям.

Стереометрическое устройство для наноперемещений (рис. 5.4.1.) содержит основной пьезопровод 1 и три дополнительных 2, 3, 4. На основном пьезопроводе 1 и двух дополнительных пьезопроводах 2, 3 жёстко закреплены зонды 4, 5, 6. Основной пьезопровод 1 и два дополнительных пьезопровода 2 и 3, расположены по координатным осям X , Y , Z , с возможностью независимой подачи напряжения на каждый из них, от блока питания 7.

Дополнительный пьезопровод 8 установлен соосно с основным пьезопроводом 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 пьезопроводы 1, 2, 3 происходит их независимое перемещение вдоль координатных

осей X , Y , Z соответственно. При подаче напряжения от блока питания 7 на пьезопривод 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.

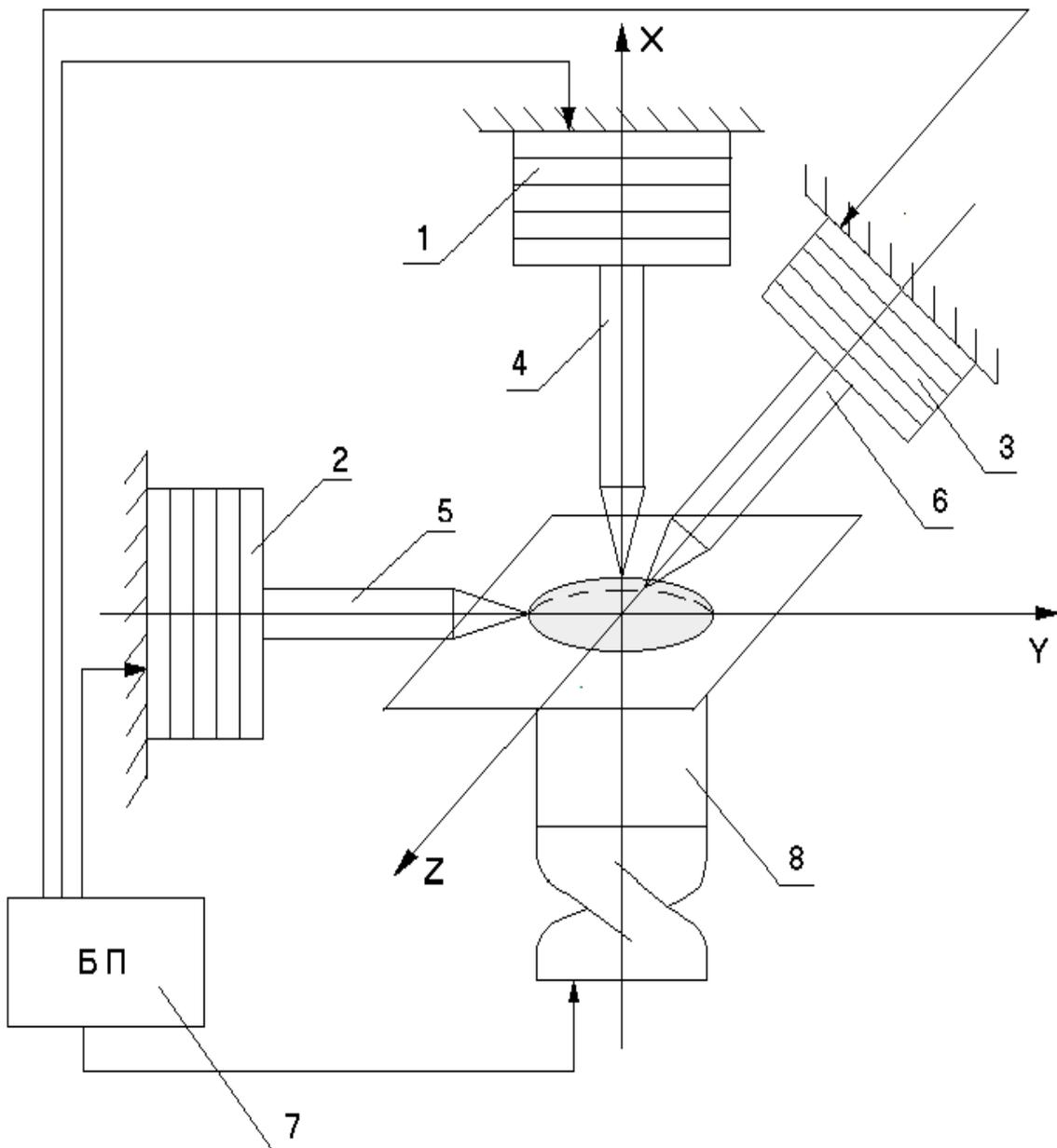


Рис. 5.4.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений

5.4.2. Зондовое устройство для нанотехнологии

Зондовое устройство для нанотехнологии (рис. 5.4.2.) 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 по-

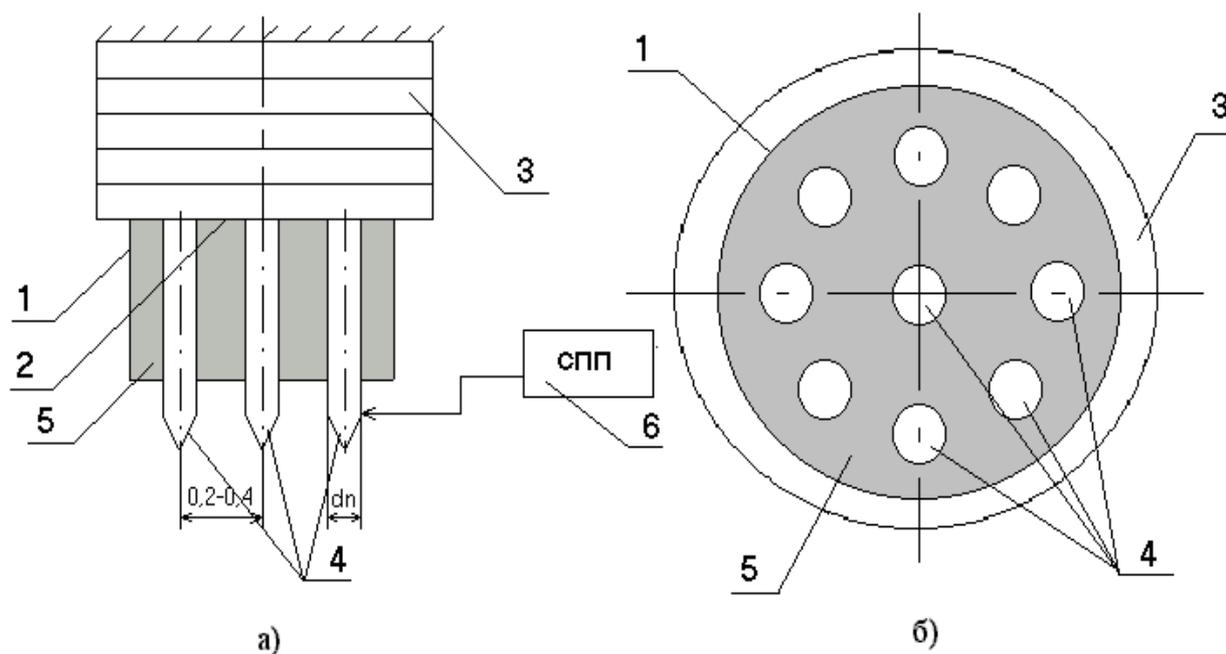


Рис. 5.4.2. Зондовое устройство для нанотехнологии

тенциала 6. При наличии такого напряжения на зондовом устройстве реализуется необходимая аналитико-технологическая операция на подложке (на рис. 5.4.2. условно не показана).

Применение предлагаемого зондового устройства для нанотехнологии позволяет одновременно зондировать несколько точек, расположенных на близком расстоянии друг от друга.

5.4.3. Пьезопривод для нанотехнологии

В основу разработки положена задача обеспечить возможность проведения двухстороннего одновременного зондирования закреплённой подложки.

Пьезопривод для нанотехнологии (рис. 5.4.3.) 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. 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.

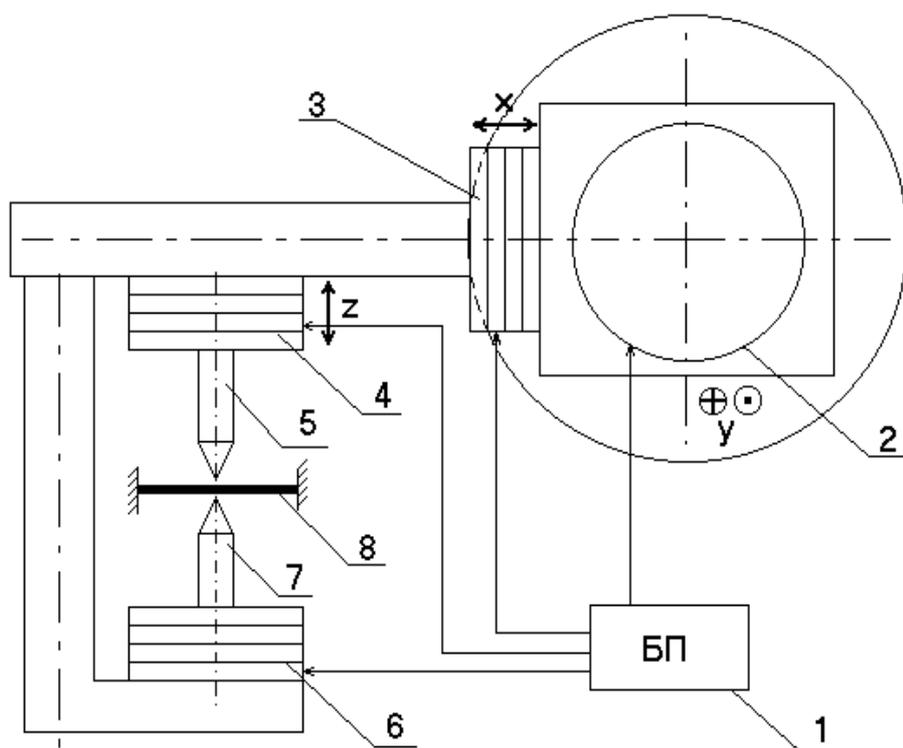


Рис. 5.4.3. Пьезопривод для нанотехнологии

5.4.4. Нанотехнологическое устройство перемещения

Нанотехнологическое устройство перемещения (рис. 5.4.4.) 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.

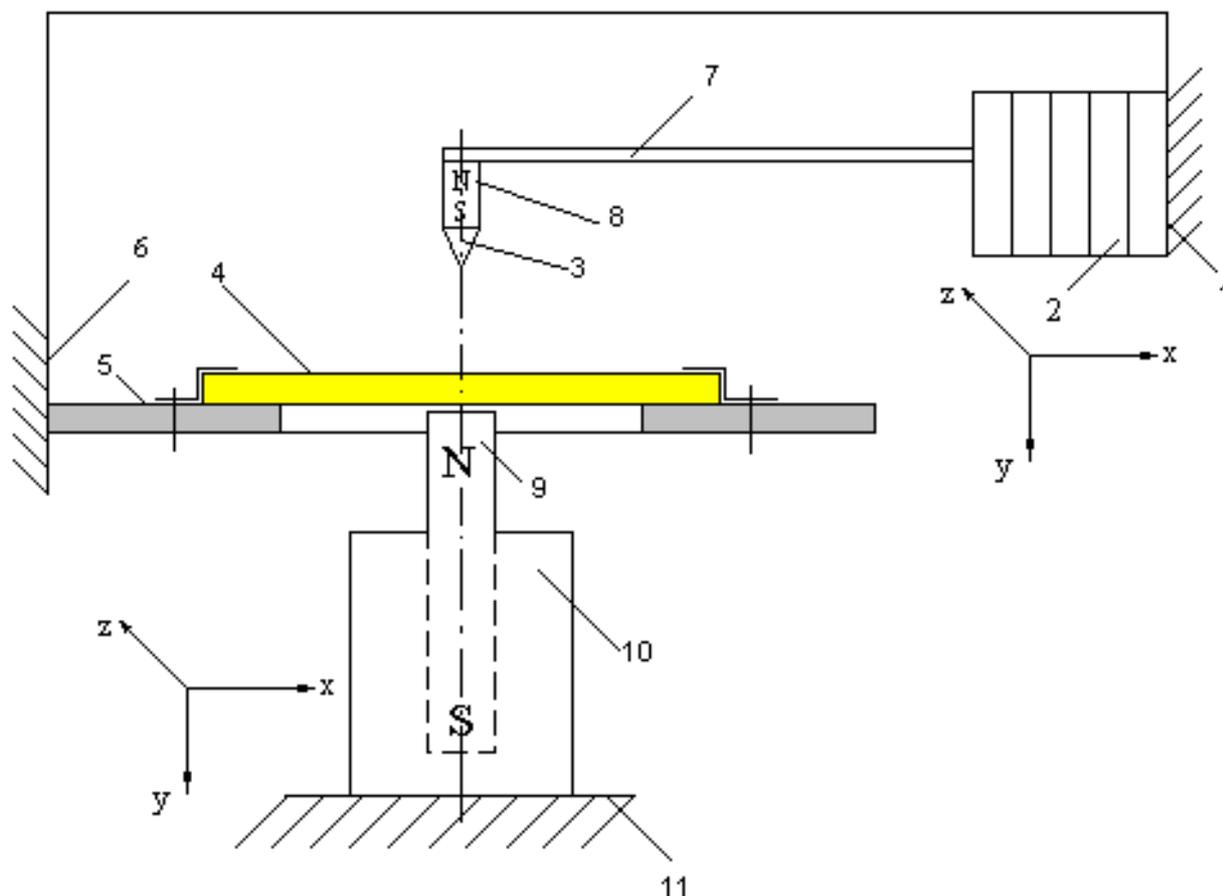


Рис. 5.4.4. Нанотехнологическое устройство перемещения

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 трехкоор-

динатный пьезопривод 10, происходит перемещение электромагнита 9.

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 к значительному уменьшению дрейфовых явлений.

5.4.5. Устройство для формирования нанодорожек

В основу разработки положена задача обеспечения возможности формирования дорожек нанометрового диапазона.

Устройство для формирования нанодорожек (рис. 5.4.5) содержит подложку 1, источник лазерного излучения 2 и отражатель 3. Источник лазерного излучения выполнен щелевым с размером щели 4, $\delta = (2 \div 3) \lambda$ и расстоянием между щелями $\gamma = (4 \div 6) \lambda$ длин волн излучения. Отражатель 3 состоит из двух зеркал 5 и 6, поставленных друг к другу под углом близким к 180° . Подложка 1 установлена на подложкодержателе 7, выполненным в виде кюветы 8 с жидкостью 9 и установленном на шестикоординатном пьезоприводе 10, который закреплён на неподвижном основании 11.

Устройство для формирования нанодорожек работает следующим образом. Источник лазерного излучения 2 формирует когерентный волновой пучок, который выходя из источника 2 разделяется щелями 4 на систему лучей, распространяющихся вдоль параллельных прямых. Расстояние между соседними лучами составляет $\gamma = (4 \div 6) \lambda$ длин волн. Далее излучение, отражаясь от зеркал 5 и 6, проходит слой жидкости 9, уменьшая длину волны пропорционально показателю преломления этой жидкости и попадает на подложку 1. Угол между зеркалами 5 и 6 подобран так, что дости-

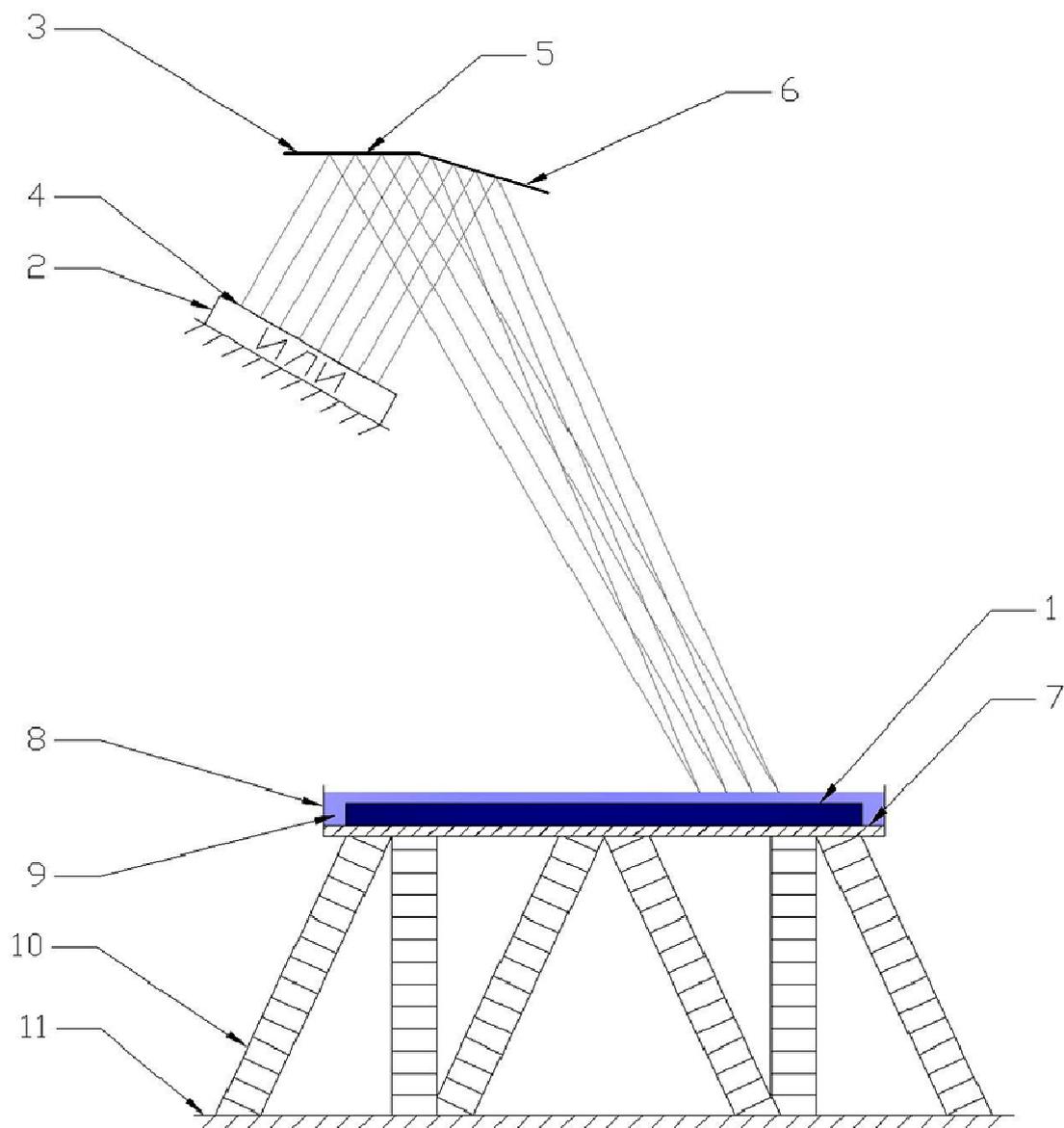


Рис. 5.4.5. Принципиальная схема устройство для формирования нанодорожек (элементы оптической системы условно не показаны)

гая подложки 1, когерентные лучи интерферируют, образуя череду равноудалённых максимумов интенсивности излучения, в местах которых происходит интенсивный выброс материала подложки 1. Это при необходимом перемещении шестикоординатного пьезопривода 10 обеспечивает формирование нанодорожек на подложке 1. Шаговое перемещение шестикоординатного пьезопривода 10 на величину $-(2\div 3)\lambda$ длины волны, в на-

правления перпендикулярном сформированным дорожкам и повторение вышестоящих операций формирования нанодорожек, позволяет участить количество дорожек на площади подложки 1.

Применение предлагаемого устройства позволяет обеспечить возможность формирования дорожек нанометрового диапазона. При использовании методов повышения разрешающей способности проекционной литографии предполагается получать элементы с проектными нормами не более 32 нм.

5.4.6. Устройство наноперемещений

Устройство наноперемещений (рис. 5.4.6) 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 пластины-биморфы 4 можно регулировать линейное перемещение зонда 3 в достаточно широких пределах.

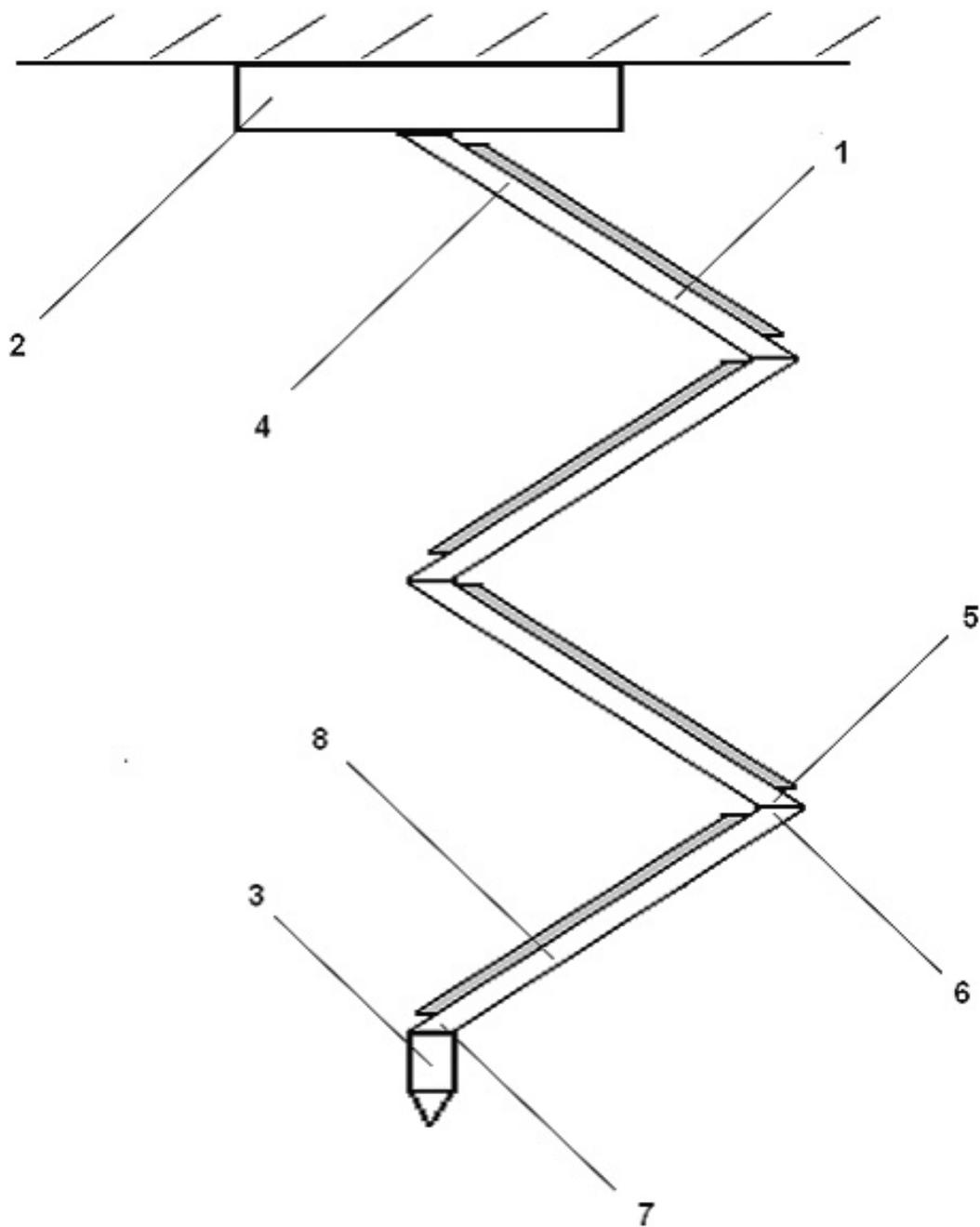


Рис. 5.4.6. Принципиальная схема устройства наноперемещений

Устройство наноперемещений выполнено в виде чётного числа пластин-биморфов и позволяет повысить диапазон перемещений при сохранении прямолинейного характера движения зонда.

5.4.7. 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. 5.4.7) 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.

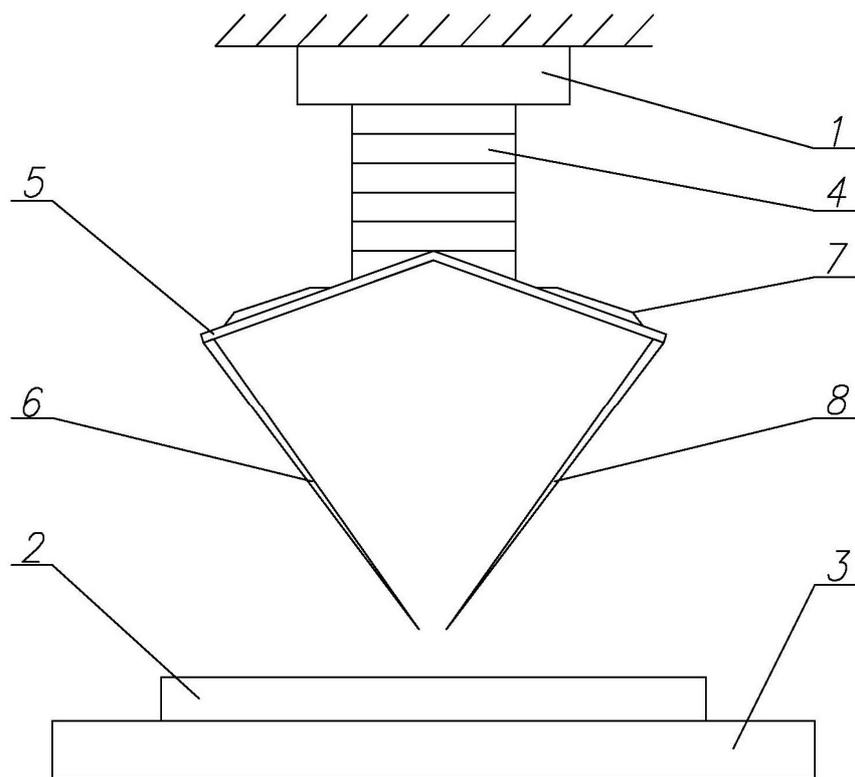


Рис. 5.4.7. Принципиальная схема технологического устройства метрологического обеспечения нанотехнологии

5.4.8. Система перемещения для нанотехнологии

Система перемещений для нанотехнологии (рис. 5.4.8) 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.

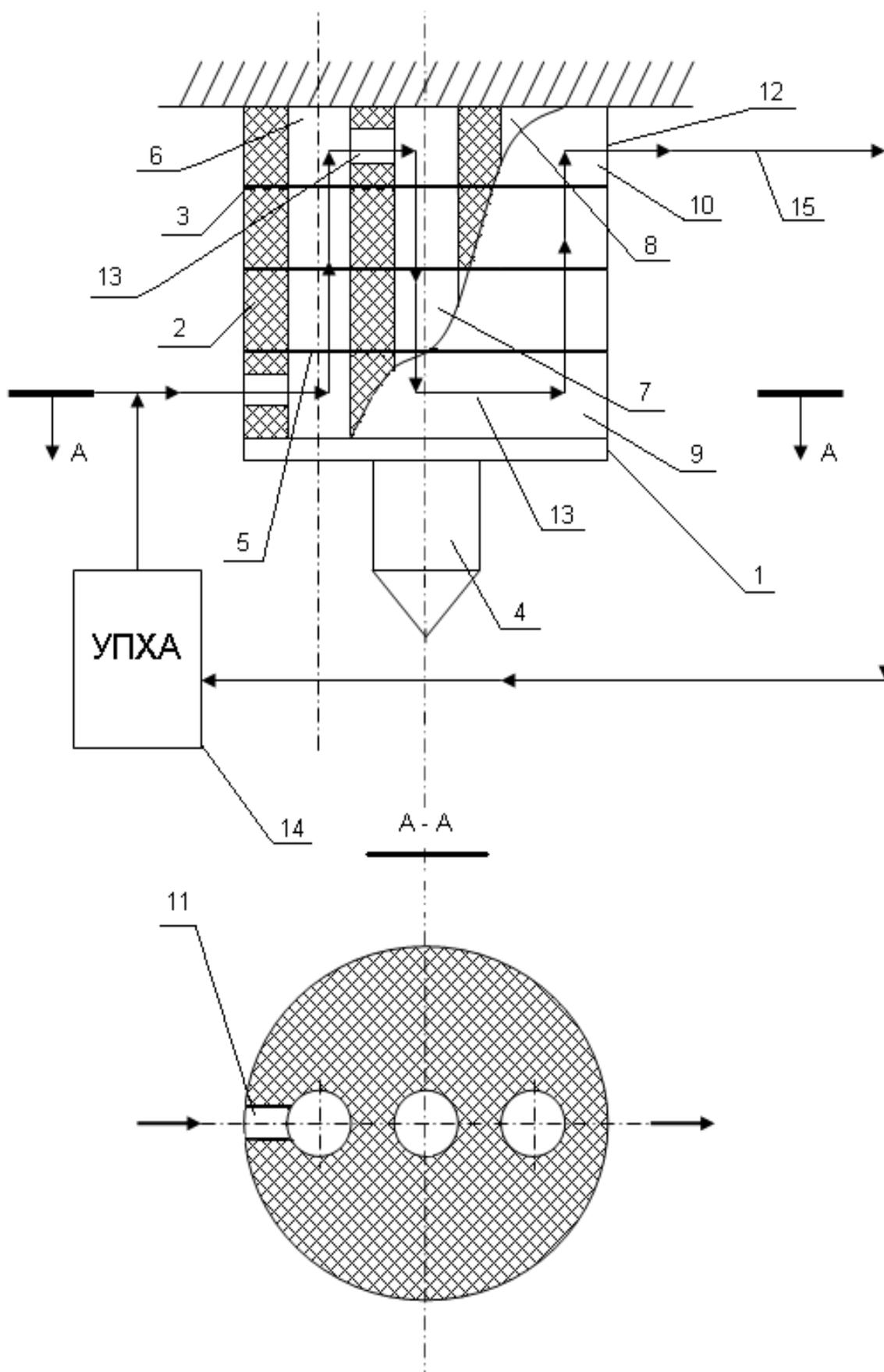


Рис. 5.4.8. Система перемещений для нанотехнологии

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 [69÷74, 98÷102].

ГЛАВА 6. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

Современные исследования, в области физики поверхности и тонкоплёночных технологий, не обходятся без применения методов сканирующей зондовой микроскопии. Развитие сканирующей зондовой микроскопии послужило основой для развития новых методов в нанотехнологии – технологии создания структур с нанометровыми размерами.

Одной из важных технических проблем в сканирующей зондовой микроскопии является необходимость прецизионного перемещения зонда и образца.

Для решения этой проблемы применяются различные типы устройств перемещения, осуществляющих перемещение объектов с высокой точностью.

Широкое применение получили различные механические редукторы, в которых грубому перемещению исходного движителя соответствует тонкое перемещение смещаемого объекта. Механические редукторы в основном применяются для грубой подводки зонда к подложке.

Для точного позиционирования в СЗМ применяют сканирующие элементы. В настоящее время наибольшее распространение получили сканирующие элементы на основе пьезоэлектриков.

Перспективным является применение магнитострикционных материалов для создания прецизионных систем перемещения, так как это позволяет повысить точность позиционирования, в десятки раз, по сравнению с пьезоэлектрическими приводами.

6.1. 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.

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.

6.1.1. Обменная магнитострикция

Этот вид магнитострикции возникает в результате изменения обменного взаимодействия между магнитными моментами атомов M_{am} в кри-

сталлической 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_{cn} (от англ. spin — вращение).

Векторное сложение M_{orb} и M_{cn} дает M_{am} . Следует отметить, что внутри атома M_{orb} и M_{cn} 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. 6.1.1,а). Включим, теперь поле H . Моменты M_{am} повернутся по полю (рис. 6.1.1,б), но это приведёт к изменению обменной энергии (поскольку, согласно теории, данная энергия зависит от направления спинов взаимодействующих электронов, принадлежащих соседним атомам).

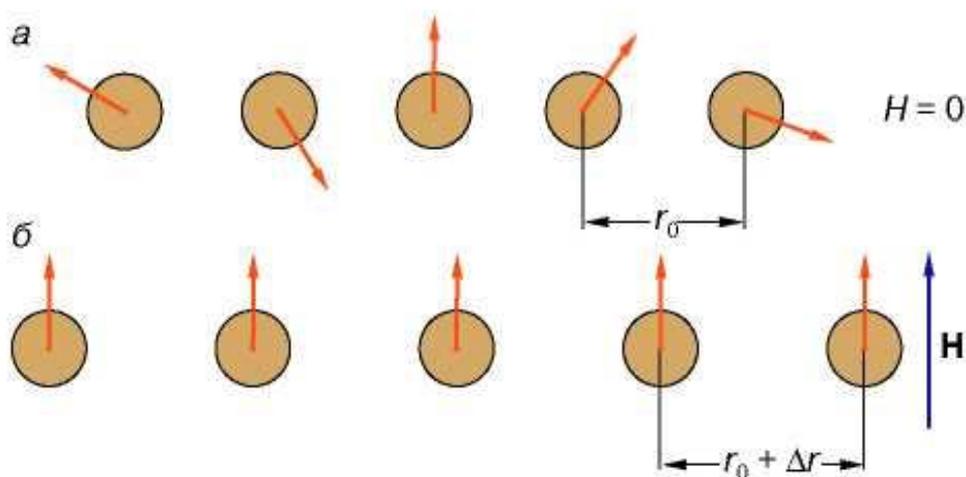


Рис. 6.1.1. Явление обменной магнитострикции

Состоянию ферромагнетика, представленного на рис. 6.1.1,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.

6.1.2. 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. 6.1.2,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

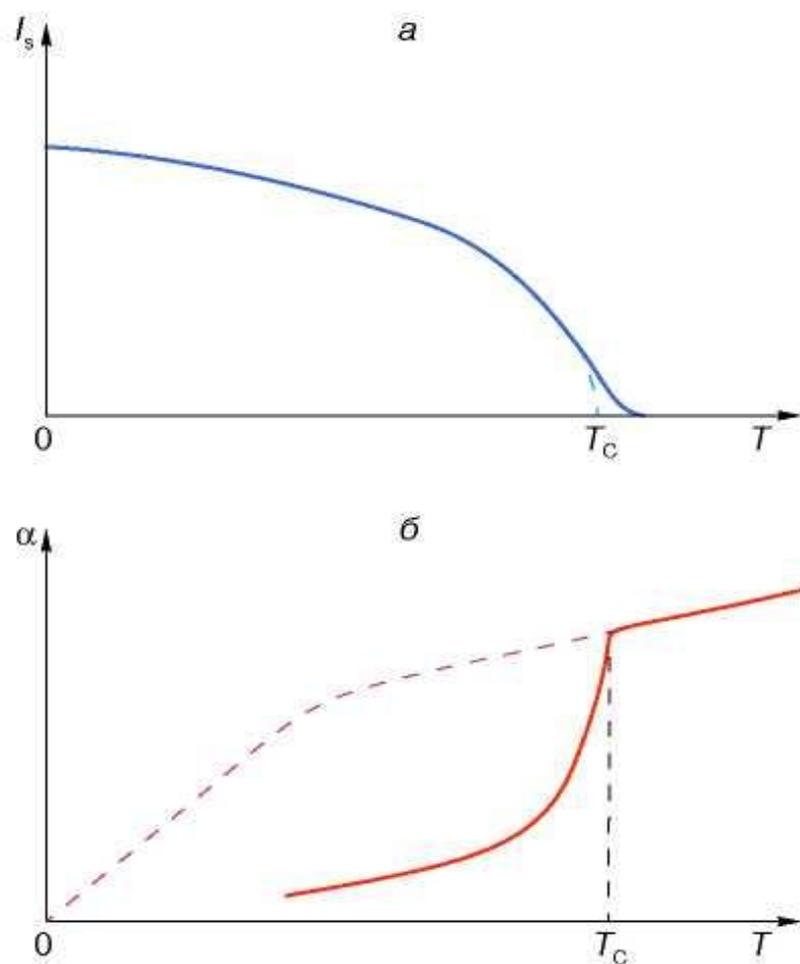


Рис. 6.1.2. Инвар-эффект:

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)

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. 6.1.2,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 от-

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

6.1.3. Магнитострикция (магнитодипольная и одноионная)

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. Ха-

ракторная 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. 6.1.3,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. 6.1.3 условно показаны, тонкими линиями, кристаллические поля создаваемые окружающими ионами, отражающими локальную симметрию кристалла. При приложении поля H магнитный момент иона $M_{am} = M_{cn} + M_{orb}$ ориентируется в направлении H и одновременно с ним поворачивает анизотропное электронное облако иона, которое возмущает

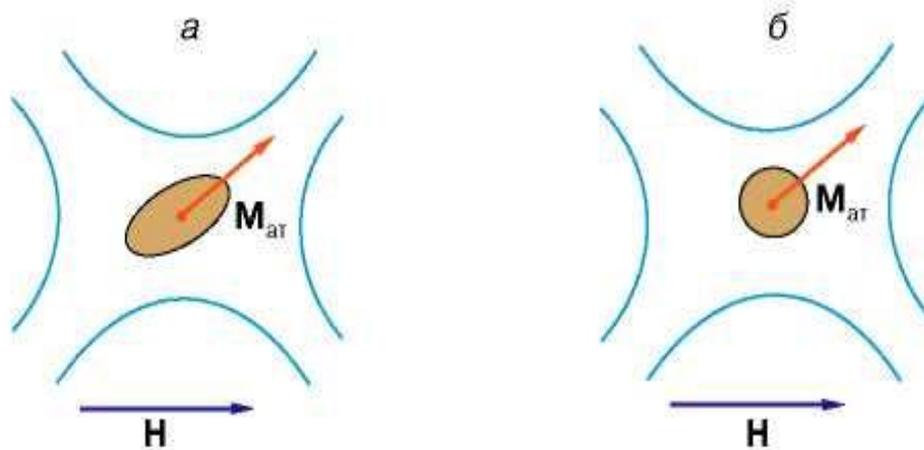


Рис. 6.1.3. Одноионный механизм возникновения анизотропной магнитострикции:

а – случай Tb и Dy;

б – случай Gd

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 $M_{орб}$.

Редкоземельный металл гадолиний не имеет орбитального момента ($M_{орб} = 0$) и его атомный момент $M_{ат}$ содержит только спиновую составляющую ($M_{ат} = M_{сн}$). Вследствие этого электронное облако его иона имеет сферическую форму. Как следует из рис. 6.1.3,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.

6.1.4. 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. 6.1 приведены результаты измерений продольной магнитострикции насыщения $(\lambda_s)_{||}$ (то есть в полях $H = H_s$) при температуре жидкого азота 78К в поликристаллах Tb и Dy (для сравнения даны соответствующие значения $(\lambda_s)_{||}$ для поликристаллов Fe, Co и Ni).

Огромных величин достигает λ_s в гексагональных кристаллах Tb и Dy (табл. 6.2). При этом она особенно велика вдоль гексагональной оси c и несколько меньше вдоль a . (На рис. 6.1.4,а показаны направления этих осей).

Таблица 6.1
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

Видно, что эти значения в сотни раз больше, чем в кристалле Ni. На рис. 6.1.4,б показаны направления осей кубического кристалла Ni символами [111], [100] и [110].

На рис. 6.1.5 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. 6.1.5,а), тогда как в направлении гексагональной оси c тенденция к насыщению не обнаруживается даже в очень сильном поле ($H = 150$ кЭ).

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 6.2

Магнитострикция в кристаллах Tb, Dy, Gd и Ni

Металл	$T, \text{ К}$	$(\lambda_s)_{\parallel} \cdot 10^6$	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	$H \parallel [111]$

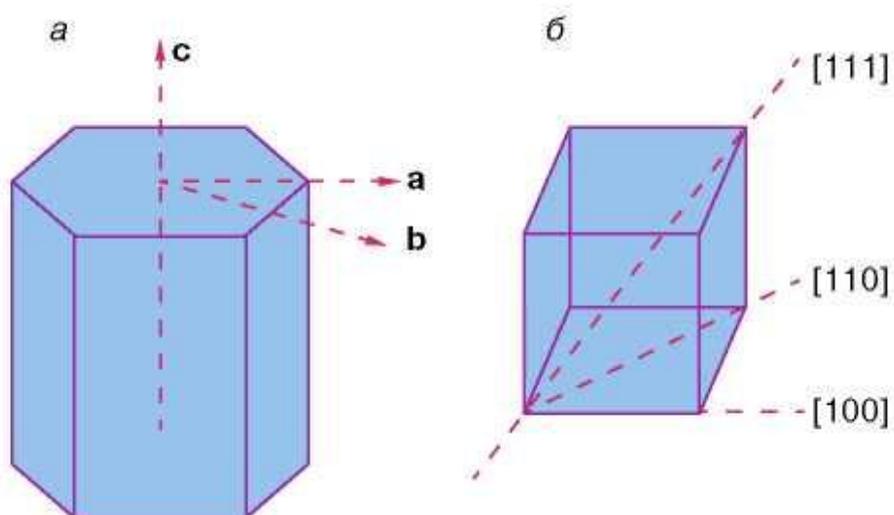


Рис. 6.1.4. Направления осей:

a – в гексагональном кристалле;

б – в кубическом кристалле

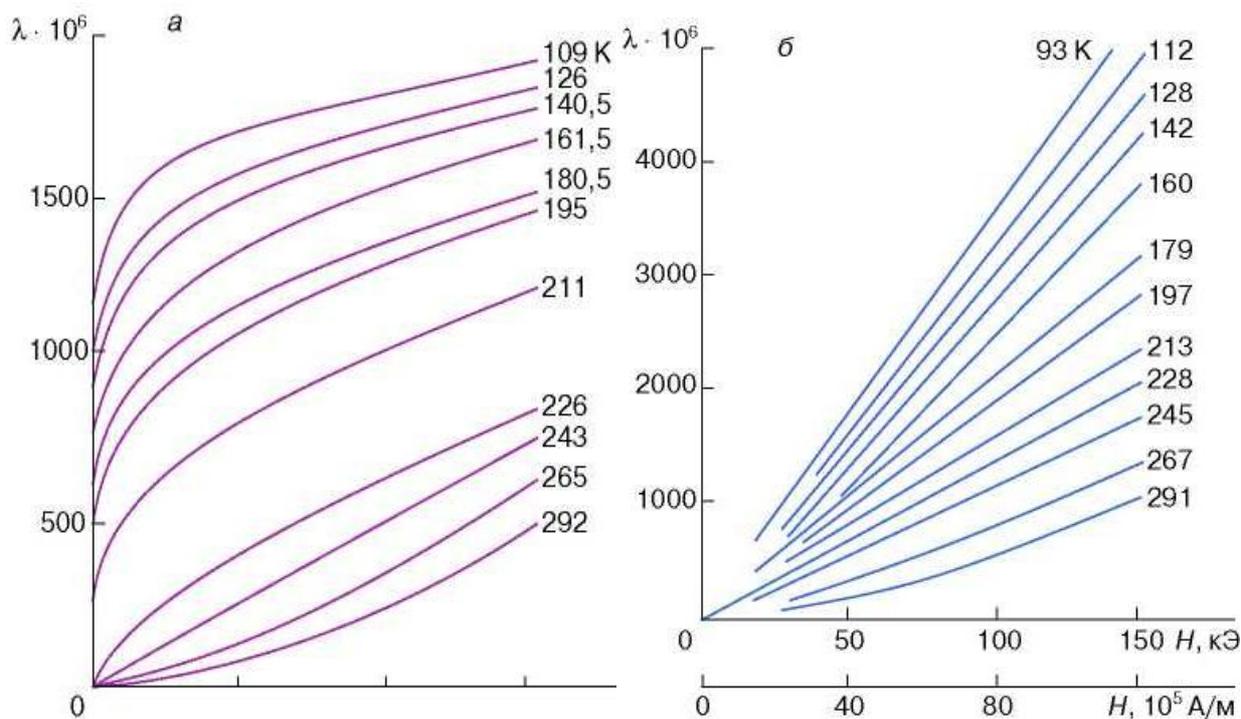


Рис. 6.1.5. Зависимость магнитострикции в кристалле тербия от напряженности магнитного поля H :

а – базисная плоскость ($H \perp c$);

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

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.6.3 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.

Таблица 6.3

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

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.

6.1.5. 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, $Tb_3Fe_5O_{12}$) 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 $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-5}$). Ус-

тановлено, 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.

6.1.6. 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

$$E_0 = -AI_s^2, \quad (6.1.1)$$

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

$$E_{0y} = -\gamma I^2 \omega, \quad (6.1.2)$$

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:

$$E_y = +\frac{k\omega^2}{2}, \quad (6.1.3)$$

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

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

$$\omega_s = -\frac{\gamma I_s^2}{k}. \quad (6.1.4)$$

Величина ω_s называется спонтанной объемной магнитострикцией. Она налагается на обычное тепловое расширение $\frac{\Delta V}{V}(T)$ при $T < T_C$ (рис. 6.1.6, кривая 2). В результате кривая теплового расширения существенно трансформируется (рис. 6.1.6, 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 объемного теплового расширения может быть рассчитан по кривой 3 (см. рис. 6.1.6) по формуле:

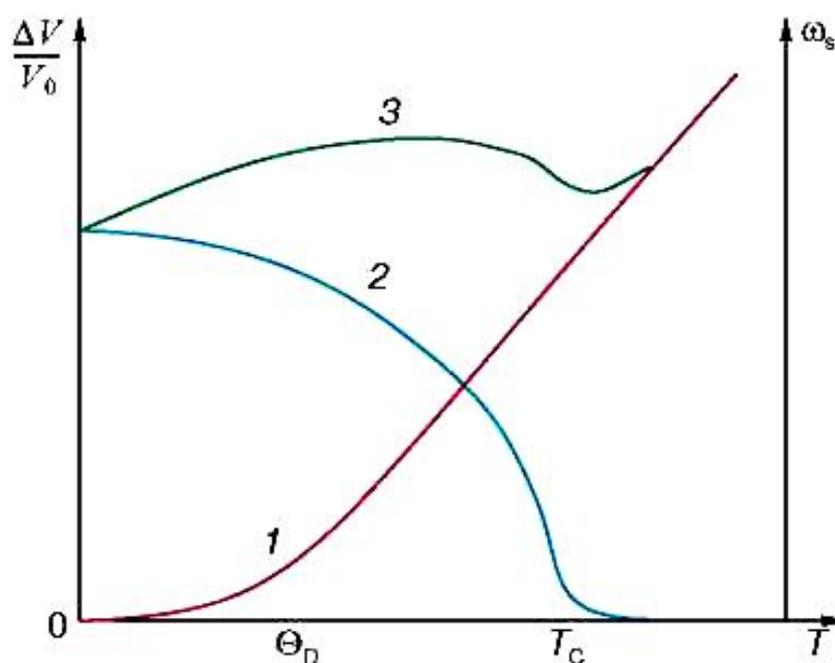


Рис. 6.1.6. Тепловое расширение ферромагнетика:

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

$$\alpha_V = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{V}{\Delta T} . \quad (6.1.5)$$

Из кривой 3 (см. рис. 6.1.6) и формулы (6.1.5) следует, что α может принимать в ферромагнетике не только положительное значение, но может быть отрицательным, а также иметь нулевые значения.

Из соотношений (6.1.2) и (6.1.4) 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. 6.1.6). 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 $T < T_C$ даёт 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 магни-

тострикционного 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.

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 , превышала тепловую энергию:

$$\mu_0 H \gg k_B T, \quad (6.1.6)$$

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 $T < 200\text{К}$ 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_e 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, $H_e \sim 3 \cdot 10^6$ 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 магнитоупругость достигается в сравнительно небольших магнитных полях ($\sim 10^2$ Э).

6.1.7. 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

$$T_c = \frac{2}{3} zS(S+1) \frac{A}{k_B}, \quad (6.1.7)$$

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

Из формулы (6.1.7) следует, что изменение T_c с давлением:

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} zS(S+1) \frac{\Delta A}{\Delta P}. \quad (6.1.8)$$

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 взаимодей-

вие между локализованными моментами $4f$ -ионов осуществляется через электроны проводимости, выполняется соотношение

$$T_c = \frac{2}{3k_B} G A_{\text{косв}} . \quad (6.1.9)$$

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:

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta P} = \frac{2}{3k_B} G \frac{\Delta A}{\Delta P} . \quad (6.1.10)$$

Давление приводит к изменению атомного объёма и межатомных расстояний. Из формул (6.1.8) и (6.1.10) 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 $0,1 \div 10$ К 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 решеткой, как пра-

вило, 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.

6.2. Информационное моделирование магнестрикционного эффекта

6.2.1. Описание магнестрикционного преобразователя

Рассмотрим магнестрикционный эффект подробнее. В магнестрикционном 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). Схема преобразования прямого магнестрикционного эффекта представлена на рис. 6.2.1.

6.2.2. 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, уменьшить стоимость. Поэтому актуальной становится задача создания автоматизированной системы синтеза

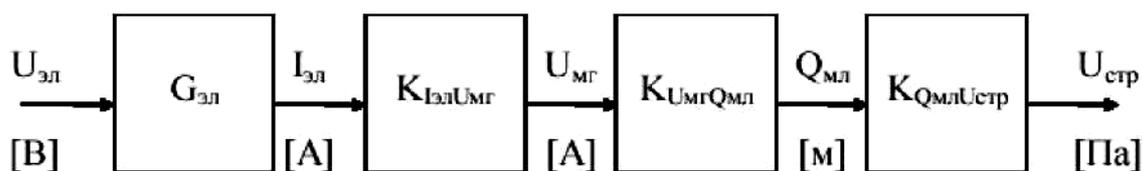


Рис. 6.2.1. Прямой магнестрикционный эффект:

$U_{эл}$ – 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]

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. 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.

6.2.3. 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.

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;

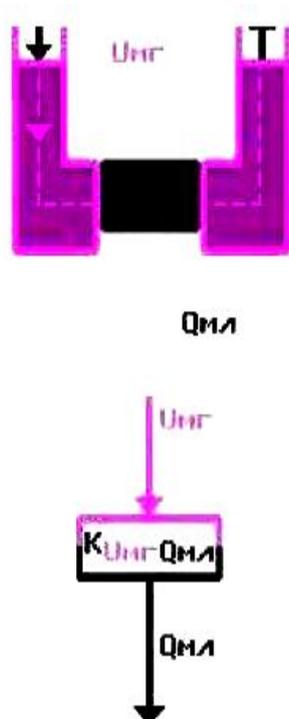
$D = \frac{1}{L}$ – дедуктивность.

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

6.2.4. 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. 6.2.2).

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. 6.2.2. 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. 6.4).

Таблица 6.4

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

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

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, $\frac{H}{A^2}$;

E – модуль упругости, Па.

Коэффициент магнитомеханической связи:

$$K_{U_{MГ} Q_{MЛ}} = k \cdot a = \frac{F}{\Phi} \quad (\text{при } x = 0) = \frac{M}{x} \quad (\text{при } \Phi = 0), \quad \frac{A}{M},$$

где x – деформация, м;

a – магнитострикционный коэффициент (см. выше), $\frac{A}{M}$;

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 мате-

риалов при проектировании датчиковой аппаратуры, что особенно важно при разработке прецизионной и высокочувствительной техники.

6.3. Расчёт 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.

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. 6.3.1).

Напряжённость кольцевого постоянного магнита внутри звукопровода определяется функциями:

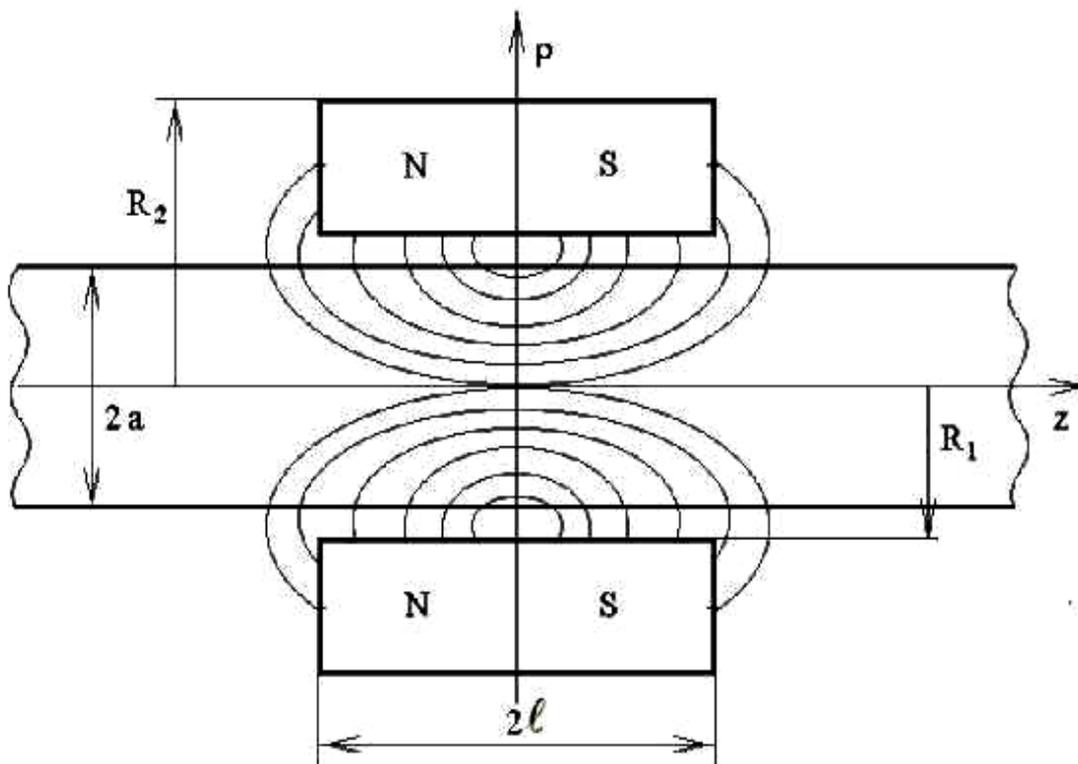


Рис. 6.3.1. Распределение магнитного поля в волноводе МПП в зоне действия кругового постоянного магнита

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

$$H_p(p, z) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_{-l}^l \frac{(p - p_1 \cos\theta_1) p_M}{R^3} p_1 dp_1 d\theta_1 dz_1 . \quad (6.3.1)$$

Здесь $R = \sqrt{(z - z_1)^2 + p^2 + p_1^2 - 2pp_1 \cos\theta_1} ; \quad (6.3.2)$

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 (6.3.2), тройные интегралы (6.3.1) можно привести к двойным интегралам:

$$H_z(p, z) = \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(z+l)p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt[3]{[(z+l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} - \\ - \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(z-l)p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt[3]{[(z+l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} ;$$

$$H_p(p, z) = \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(p - p_1 \cos \theta_1) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt[3]{[(z+l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} - \\ - \frac{B_0}{4\pi\mu_0} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(p - p_1 \cos \theta_1) p_1 dp_1 d\theta_1}{\sqrt[3]{[(z-l)^2 + p^2 + p_1^2 + 2pp_1 \cos \theta_1]^2}} .$$

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. 3.6.2 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. Так как длина маг-

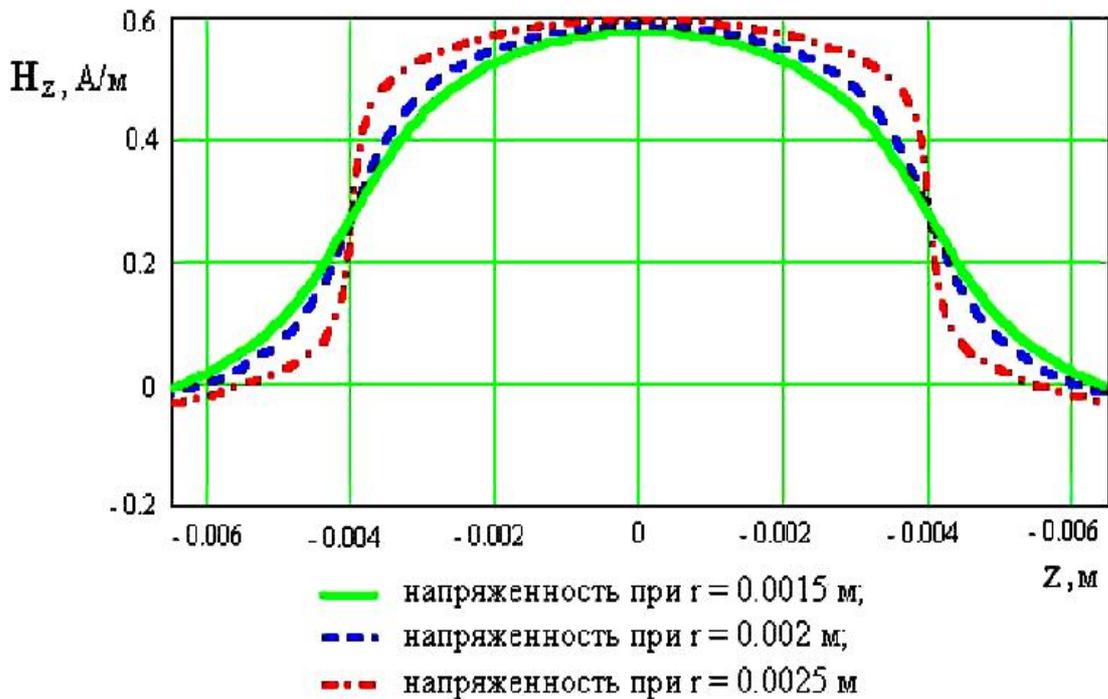


Рис. 6.3.2. Продольная составляющая напряжённости магнитного поля

нита $l = 0,004$ 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. 6.3.3 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.

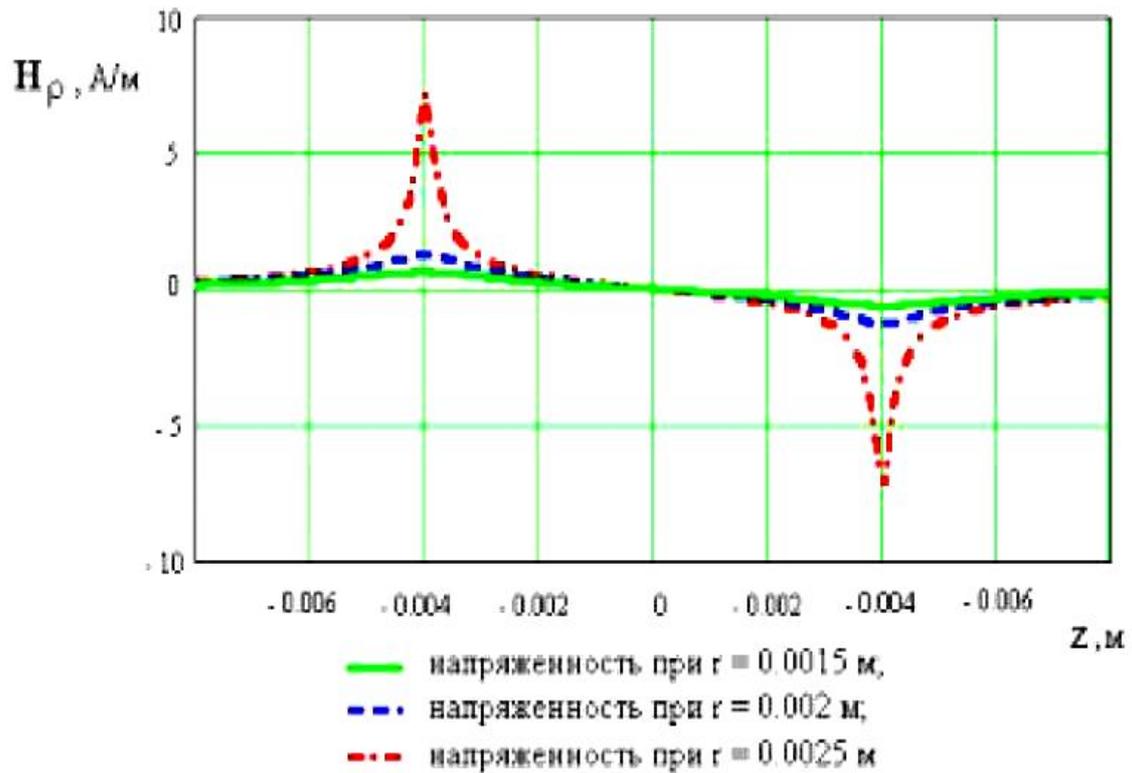


Рис. 6.3.3. Радиальная составляющая напряжённости магнитного поля

6.4. Устройства прецизионного перемещения на основе эффекта магнестрикции

6.4.1. Устройство перемещения для нанотехнологии

В основу разработки положена задача обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения зонда при выполнении различных нанотехнологических операций.

Устройство перемещения (рис. 6.4.1) содержит привод 2, связанный с неподвижным основанием 1 и зондом 3, подложку 5, установленную на

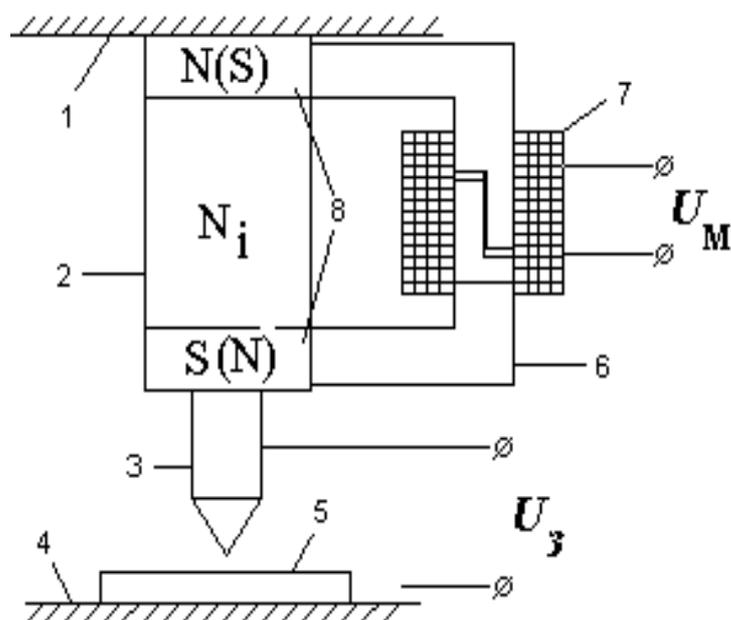


Рис. 6.4.1. Устройство перемещения для нанотехнологии

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.

6.4.2. Привод для нанотехнологии

В основу представленной разработки так же положена задача обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения подложкодержателя.

Привод содержит основание 1, выходное звено 2, шесть стержней 3, шарнирно связанных одним концом 4 с основанием, а другим 5 – с выходным звеном. Приводы перемещения 6 выходного звена, кинематически связаны с соответствующими стержнями 3. Шарнирные связи 7 выполнены упругими, стержни 3 изготовлены из магнитоstrictionного материала и установлены в катушку индуктивности 8, связанную с источником питания.

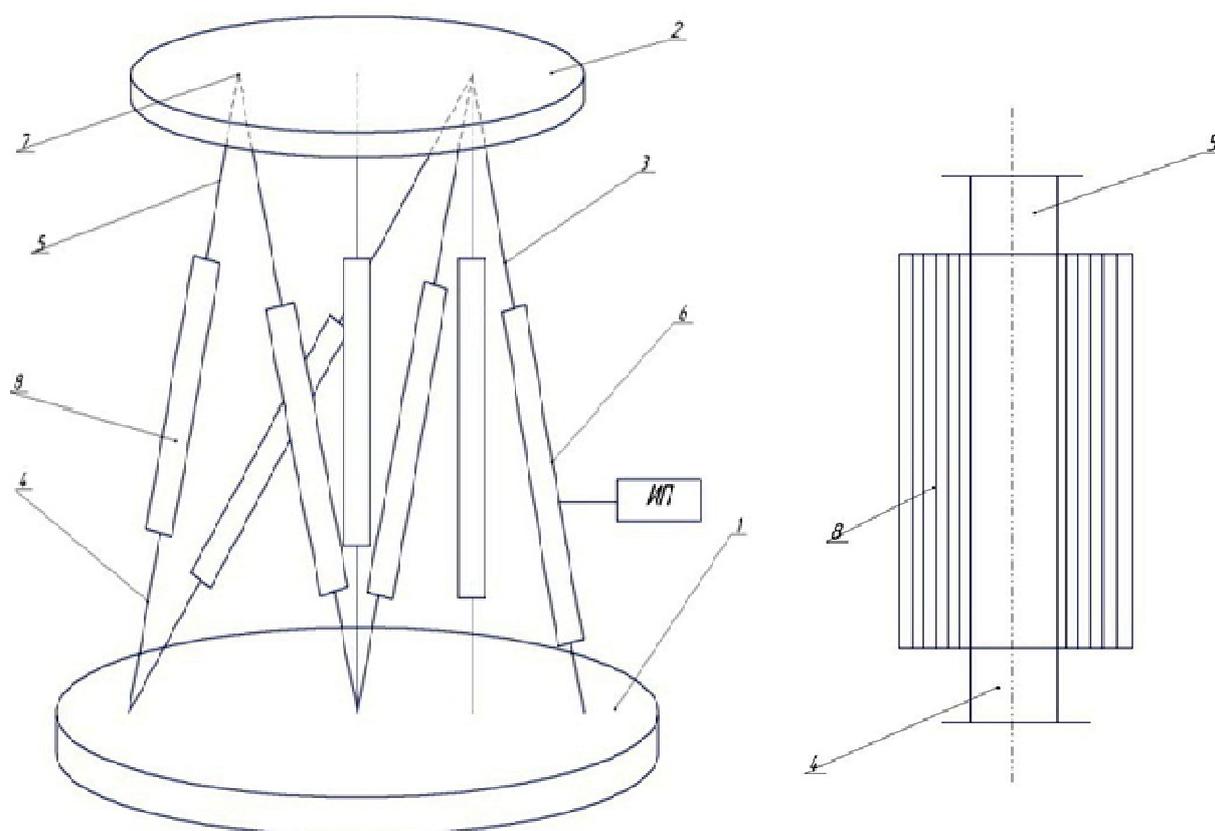


Рис. 6.4.2. Привод для нанотехнологии

При подаче напряжения на катушку индуктивности 8 происходит перемещение привода 6, а вместе с ним и выходного звена 2.

Применение устройства так же позволяет повысить точность перемещения, посредством использования магнитного поля, вместо электрического.

6.4.3. Устройство наноперемещения зонда

Устройство наноперемещения зонда (рис. 6.4.3), 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. Диэлек

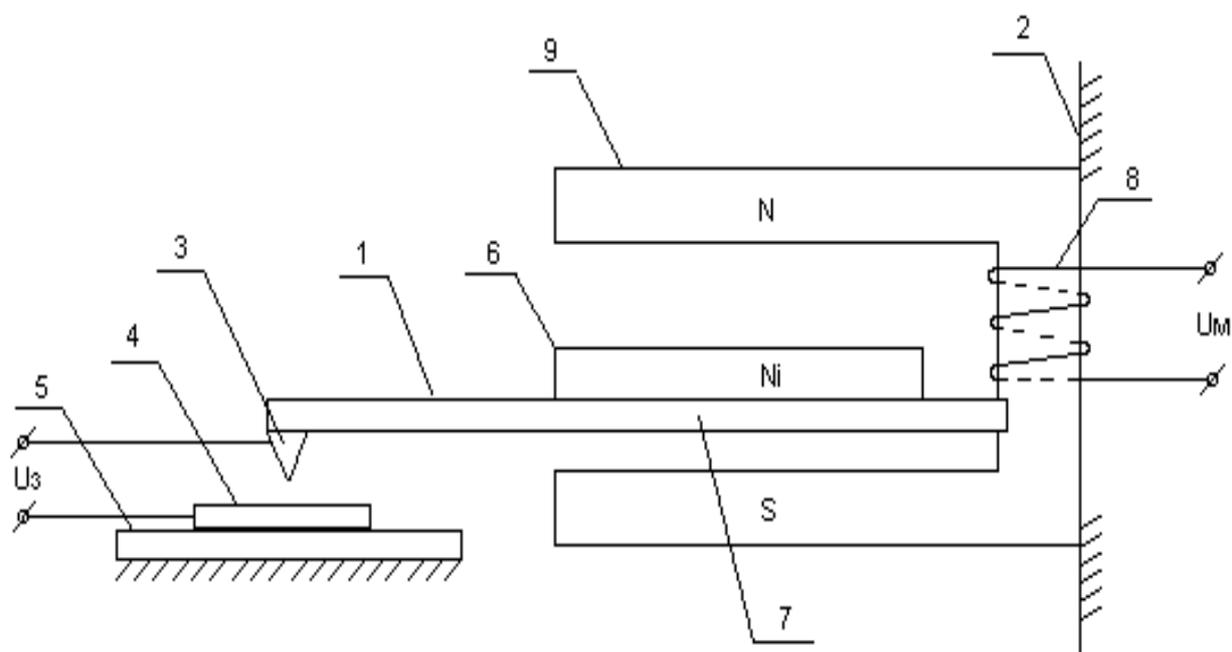


Рис. 6.4.3. Устройство наноперемещения зонда

трическая 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 магнитострикционных 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 [104÷107].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные элементы автоматизированной системы проектирования пьезосканеров позволяют рассчитывать их параметры при заданных исходных данных с учётом требований, предъявляемых к прецизионным системам перемещения, выбирать наилучшие варианты среди спроектированных и создавать новые виды пьезосканеров, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к прецизионному оборудованию электронного машино- и приборостроения, при значительном сокращении времени проектных работ.

Обобщённый критерий, введённый для оценки качества пьезосканеров, учитывает функциональные, экологические и экономические локальные критерии качества, входящие в обобщённый критерий с их весовыми коэффициентами.

Разработанная обобщённая математическая модель, используемая при автоматизированном проектировании пьезосканеров, учитывает крип-эффект, влияющий на точность позиционирования пьезосканера и позволяет выбрать метод его компенсации.

Предложенная модель многокритериальной задачи принятия решений при многоатрибутивном выборе пьезосканера, учитывает множество вариантов пьезосканеров, множество показателей, отображение множества вариантов во множестве векторных оценок, множество типов задач сравнения вариантов, систему предпочтений лица, принимающего решение, множество возможных правил выбора решений.

Морфологические таблицы пьезосканеров и материалов для них, построенные на основе модели многокритериальной задачи принятия решений, теоретических и экспериментальных исследований параметров работоспособности пьезосканеров, обеспечивают эвристический подход к их

проектированию с использованием известной и дополнительной информационной базы знаний элементов автоматизированной системы проектирования.

Предложенные технические решения пьезосканеров для электронного машино- и приборостроения, разработанные на основе элементов автоматизированной системы проектирования, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к прецизионным устройствам перемещений и соответствуют критериям патентоспособной новизны, изобретательского уровня и промышленной применимости.

Разработанная информационная система поддержки принятия решений и база экспертных данных при проектировании пьезосканеров обеспечивают выбор рациональных технических и технологических решений пьезосканеров из множества полученных в результате решения многокритериальной задачи.

Предложенная информационная система поддержки принятия решений при проектировании пьезосканеров позволяет принимать научно обоснованные, технически целесообразные, экономически и технологически выгодные решения.

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.

Редкоземельный сплав Terfenol-D ($Tb_{0,27}Dy_{0,73}Fe_{1,95}$) дал возможность приступить к практическому использованию эффекта "гигантской магнитострикции" для силового позиционирования. В этом случае в магнитных полях $\sim 0,5$ Т относительное удлинение достигает 10^{-3} , а возникающее уси-

лие – 100 Н/мм^2 сечения стриктора. Таким образом, стриктор длиной 1 см и таком же диаметре может обеспечить силовое позиционирование в пределах 10 мкм с усилием до 10^5 Н . Также этот сплав обладает пониженной магнитной анизотропией с сохранением высокой магнитострикции, что позволяет управлять гигантской магнитострикцией с помощью малого поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. В 2-х томах. Т. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 608 с.
4. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 200 с.
5. 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.
6. Снайдер К., Лазанн А. Растровый туннельный микроскоп на основе концентрических трубчатых пьезоэлементов // Приборы для научных исследований, 1988.
7. Сушхара К., Мори И., Тобзе Т., Ито Т., Табста М., Синодзаки Т. Пьезоэлектрический столик с двумя поступательными и одной вращательной степенями свободы для субмикронных литографических систем // Приборы для научных исследований, 1989.
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. Володин А.П., Панич А.Е. Применение пьезокерамических материалов ПТЭ в низкотемпературных сканирующих туннельных микроскопах. // ПТЭ, 1989.

10. Биннинг Д., Рорер Г. Растровый туннельный микроскоп // В мире науки, 1985.
11. Чулков В.П. Комплексные автоматизированные производства. Методические указания по проведению курсовых и дипломных работ: Учебное пособие. – М.: МИЭМ, 2006. – 77 с.
12. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. – М.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 255 с.
13. Сайман Г. Наука об искусственном. – М.: Мир, 1972. – 147 с.
14. Kahneman D., Slovic P., Tversky A. Judgmen under uncertainty: heuristics and biases. – Cambridge: Univ. Press, 1982. – 555 p.
15. Feigenbaum I.A., McCorduck P. The 5th generation / Addison Wesley. Mass, 1983. – 266 p.
16. П.Н. Дьячков Углеродные нанотрубки. Материалы для компьютеров XXI века // Природа, № 11, 2000.
17. Исаакян В.А. Микроскопия вчера, сегодня, завтра / Материалы конференции. – Москва, 2000.
18. Багаев Д.В. Информационная технология проектирования гидромашин на стадиях предварительной разработки. – Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. – Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2003. – 214 с.
19. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 360 с.
20. Сольнищев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по специальности «Автоматика и управление в технологических системах». – М.: Высш. шк., 1991. – 335 с.
21. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беленгард, М.М. Гайцгорн и др.; Под. общ. ред. С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.

22. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов / Под. ред. В.Ф. Казмиренко. – М.: Энергоиздат, 1984.
23. Верминив Ю.Х. Основы автоматизации проектирования. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.
24. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества.: Учеб. пособие для студентов втузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
25. Панов В.М., Степанов А.И. Автоматизированное проектирование гидро- и пневмоприводов. Конструкторское проектирование: Учеб. пособие. – М.: МАДИ, 1987. – 218 с.
26. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 296 с.
27. Автоматизированное проектирование радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пововаров и др.; Под. ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая шк., 2000. – 479 с.
28. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981.
29. Львов Б.Г. Основы теории технических систем. – М.: МИЭМ, 1991. – 136 с.
30. 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.
31. 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.
32. Подиновский В. В. Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.
33. Подиновский В. В. Об относительной важности критериев в много-

- критериальных задачах принятия решения // В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 48÷82.
34. Озерной В.М., Граф М.Г. Методология решения многокритериальных задач // Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 14÷17.
 35. Мамиконов А.Г. Проектирование АСУ. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
 36. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
 37. 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.
 38. Месорович М., Мако Д., Такахара А. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973.
 39. Семенкин Е.Н., Семенкина О.Э., Терсков В.А. Методы оптимизации в управлении сложными процессами: Учебное пособие. – Красноярск: Сибирский юридический институт МВД России, 2000. – 254 с.
 40. Антамошкин А.Н. др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения: Учебное пособие. В 2-х томах. Том 2. – Красноярск: Сибирская аэрокосмическая академия, 1996. – 290 с.
 41. Норменков И.П. Манигев В.Б. Основы теории и проектирование САПР: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1993. – 335 с.
 42. Раинкшкс К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1988.
 43. Юдин Д.Б., Горяшко А.П., Немировский А.С. Математические методы оптимизации устройств и алгоритмов АСУ. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.

44. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука, 1978.
45. Гафт М.Г. Принятие решений при многих критериях. – М.: Знание, 1979.
46. Губанов В.А. и др. Введение в системный синтез / Под ред. Л.А. Петросяна. – Л.: ЛГУ, 1988. – 232 с.
47. Гудман С., Хидетниemi С. Введение в разработку и анализ алгоритмов // Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 366 с.
48. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.
49. Исследование топографии поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии в неконтактном режиме. Описание лабораторной работы (Научно-образовательный центр физики твердотельных наноструктур ННГУ). – Н. Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2003.
50. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии: Учебное пособие. – М.: МИЭТ, 2000.
51. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки – материал для компьютеров XXI века // Труды научного семинара ”Математическое моделирование нанотехнологических процессов и наноструктур”. – М.: МИФИ, 2002.
52. Никишин В. И., Лускинович П.Н. Нанотехнология и наноэлектроника // Электронная промышленность, 1991.
53. Ревокатова И.П., Силин А.П. Вакуумная туннельная микроскопия – новый метод изучения поверхности твердых тел // УФН, 1984.
54. Эдельман В.С. Сканирующая туннельная микроскопия // ПТЭ, 1989.
55. Описание установки Луч-2. – М.: Нанотехнологический центр российского фонда конверсии, 2001.
56. Zvyagin A., Ohtsu M. Near-field optical microscope for true surface to-

- pography: Theoretical study // Optics Communications, 1997.
57. Хайкин М.С., Трояновский А.М., Эдельман В.С., Пудалов В.И., Семенгинский Е.Г. Сканирующая туннельная микроскопия границы раздела Si – SiO₂ в МДП – структуре // Письма в ЖЭТФ, 1986.
 58. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанoeлектроники. Часть II. Микроэлектроника, том 29, №1, 1999.
 59. Яминский И.В. Работы ученых МГУ в области туннельного спектроскопии и нанoeлектроники // Электронная промышленность, 1993.
 60. Оисеев Ю.Н., Панов В.И., Савинов С.В., Яминский И.В. Атомно – силовая микроскопия поверхности // Электронная промышленность, №3, 1991.
 61. Сканирующий туннельный микроскоп – измерительное средство нанoeлектроники / С.Ф. Бычихин, М.О. Галлямов, В.В. Потемкин, А.В. Степанов, И.В. Яминский // ИТ, №4, 1998.
 62. Бухараев А.А., Овчинников Д.В., Бухараева А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии // Заводская лаборатория, 1997.
 63. Яминский И.В. Сканирующая туннельная микроскопия // Электронная промышленность, 1993.
 64. Kawasaki T., Jiang L., Iyoda T., Araki T., Hashimoto K., Fujishima A. AFM molecular images during tip – induced surface modification on the surface of a KСР (Br) single crystal // J. Phys. Chem, 1997.
 65. Валиахметов В., Звездин В.В., Заморский В.В. Модель привода точной подстройки на основе пьезоэлектрического элемента / Материалы конференции. – Камский государственный политехнический институт, 2005.
 66. Шермергор Т.Д., Алексперов С.Д. Модификация поверхности твердых тел с помощью сканирующего туннельного микроскопа // Физ.

- основы функционирования микроэлектроники, 1989.
67. Васильев С.И., Савинов С.В., Яминский И.В. Методы изготовления острий для сканирующего туннельного микроскопа // Электронная промышленность, №3, 1991.
 68. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Тимофеев В.А., Типисев С.Я. Пьезоэлектрическое устройство перемещения. Авторское свидетельство СССР №1541741 от 08.10.1989.
 69. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю. Стереометрическое устройство для наноперемещений. Патент РФ на ПМ №36924. Оpubл. 27.03.2004, Бюл. №9.
 70. 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.
 71. 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.
 72. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю., Пискарев Д.А., Реутова М.В., Степанов М.В. Колебательный контур для нанoeлектроники. Патент РФ на ПМ №40539. Оpubл. 10.09.2004, Бюл. №25.
 73. 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.
 74. 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.
 75. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987.
 76. Земсков О.В. Разработка автоматизированной системы проецирования вакуумных пьезоэлектрических приводов. – Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. – М.:МИЭМ, 2003. – 158 с.
 77. Чулков В.П. САПР оборудования и технологии производства СБИС:

- Учебное пособие. – М.: МИЭМ., 2003. – 180 с.
78. Быков В.А., Иконников А.В., Кацур С.Ф. и др. Сканирующий туннельный микроскоп и головка для него (варианты). Патент РФ №2069056 от 18.04.1994.
 79. Володин А.Н. Новое в сканирующей зондовой микроскопии // ПТЭ, №6, 1998.
 80. Казанцев Д.В., Савинов С.В., Яминский И.В. Высоковольтный усилитель для пьезоманипулятора сканирующего туннельного микроскопа // Электронная промышленность, 1993.
 81. Калейдин В.В., Козлитин А.И., Пилевин А.В., Сретенский В.Н. Метрологическое обеспечение измерений сверх малых размеров с использованием теоретических моделей, мер и природных констант // Измерительная техника, 1996.
 82. Выскуб В.Г., Розов Б.С. Савельев В.И. Прецизионные цифровые системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1984.
 83. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника, 2000.
 84. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю. Исследование пьезосканеров в СЗМ. – М.: МИЭМ, 2005. – 32с.
 85. Павлов А.Ю. Моделирование пьезомеханических систем перемещения в нанотехнологии / Сборник докладов научно-технической конференции аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2005.
 86. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю. Расчет резонансных частот и перемещений пьезосканера для нанотехнологии. – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610179. Зарегистрирована 10.01.2006.
 87. Ивашов Е.Н., Павлов А.Ю. Прецизионные перемещения на пьезоэффекте / Сборник докладов VII Международной научно-технической

- конференции “Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросис-
темы”. – Ульяновск: УлГУ, 2005.
88. Павлов А.Ю. Учет крип-эффекта при автоматизированном проектировании пьезосканеров – Сборник докладов научно-технической конференции аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2006.
89. Павлов А.Ю. Информационная технология проектирования пьезосканеров на этапах предварительной разработки / «INTERMATIC - 2006» // Материалы Международной НТК “Фундаментальные проблемы радиэлектронного приборостроения”. – М.: МИРЭА, 2006, Часть 3. – С. 270÷273.
90. Болнокин В.Е., Динь Суан Нгуен Ван Тханг, Павлов А.Ю. Модели адаптивного формирования вариантов управления динамической системой // Системы управления и информационные технологии (Спецвыпуск рубрики “Перспективные исследования”). – № 1,2 (23), 2006.
91. Физика и химия редкоземельных элементов. Справочник / Под ред. Е.М. Савицкого. – М.: Металлургия, 1982.
92. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. – М.: Мир, 1974.
93. Никитин С.А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 248 с.
94. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука, 1987. – 159 с.
95. Андреевко 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.
96. Надеев А. И. Магнитострикционные интеллектуальные преобразова-

- тели параметров движения: Монография. Рукопись деп. в ВИНТИ 22.07.1999 № 2385-В99. – Астрахань: АГТУ, 1999. – 155 с.
97. Ивашов Е.Н., Оринчев С.М., Степанчиков С.В. и др. Электрический микродвигатель постоянного тока для работы в чистых помещениях. Патент РФ на изобретение №2003214. Оpubл. 15.11.1993, Бюл. №41÷42.
 98. 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.
 99. 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.
 100. 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.
 101. 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.
 102. Григорьев И.Ю., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Пьезопривод. Патент РФ на изобретение №2086417. Оpubл. 10.08.1997, Бюл. №22.
 103. Земсков О.В., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Вакуумный пьезопривод. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ №2001611099.
 104. 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.
 105. 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.

106. 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.
107. Александров Е.В., Домась К.И., Ивашов Е.Н. и др. Устройство для регистрации химического состава. Патент РФ на ПМ №43104. Оpubл. 27.12.2004, Бюл. №36.
108. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 1 / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 462 с.
109. Производство тонкоплёночных структур в электронном машиностроении: Учебник для вузов в 2-х томах. Т. 2 / А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 427 с.
110. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Нанотехнологические процессы и оборудование электронной техники. – М.: МИЭМ, 2009. – 264 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. Обзор и анализ систем автоматизированного проектирования пьезосканеров	5
1.1. Пьезосканеры в приборостроении	5
1.1.1. Пьезоэлектрический сканер зондового микроскопа.....	6
1.1.1.1. Искажения и нестабильности изображения из-за неидеальности пьезосканера	8
1.1.1.2. Конструкция и устройство пьезосканера	10
1.1.2. Материалы пьезосканеров	13
1.1.2.1 Основные понятия и определения	14
1.1.2.2. Основные зависимости	19
1.2. Основные представления и понятия о проектировании пьезосканеров	26
1.2.1. Блочный-иерархический подход к проектированию пьезосканера	26
1.2.2. Этапы проектирования	29
1.2.3. Проектные процедуры	31
1.2.3.1. Основные понятия и определения	31
1.2.3.2. Подсистема синтеза	33
1.2.3.3. Подсистема анализа	36

1.2.3.4. Подсистема принятия решений	38
1.3. Обобщённый критерий оценки качества пьезосканеров	40
1.4. Математическое моделирование в автоматизированных системах проектирования	42
1.4.1. Структура модели сложных процессов в пьезосканере	42
1.4.2. Вероятностная оценка работоспособности и её общий запас в пьезосканере	47
1.5. Способы построения баз экспертных знаний	48
ГЛАВА 2. Особенности создания элементов автоматизированной системы проектирования пьезосканеров	55
2.1. Структура информационной технологии проектирования пьезосканеров на этапах предварительной разработки	55
2.1.1. Структура процесса проектирования пьезосканеров	57
2.2. Модель многокритериальной задачи принятия решений	65
2.3. Сравнение вариантов на основе порядковой шкалы оценок и на основе интегральной шкалы полезности оценки по показателям	71
2.3.1. Сравнение вариантов пьезосканеров на основе порядковой шкалы оценок по показателям	71
2.3.2. Сравнения вариантов пьезосканеров на основе интервальной шкалы оценок по показателям	77
2.4. Основы методики выбора предпочтительного варианта пьезосканера по совокупности показателей	88

2.5. Математическая модель пьезосканера на основе пьезоэлектрического элемента	92
2.6. Крип-эффект и методика борьбы с ним	98
ГЛАВА 3. Выбор оптимального по параметрам пьезосканера	105
3.1. Многоатрибутивный выбор и принятие решения при проектировании пьезосканеров	105
3.2. Оптимизация пьезосканеров по параметрам	107
3.2.1. Математическая постановка задач оптимизации. Виды ограничений	108
3.2.2. Критерии оптимальности	109
3.3. Основные методы, с помощью которых происходит выбор наилучших вариантов пьезосканеров по параметрам	113
3.3.1. Необходимые и достаточные условия оптимизации	114
3.3.2. Метод покоординатного спуска	115
3.3.3. Метода наискорейшего спуска	116
3.4. Оценка надёжности систем из многофункциональных модулей	117
ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования пьезосканеров на ЭВМ	126
4.1. Выбор основных параметров пьезосканера	126
4.2. Многокритериальный выбор пьезосканера	129
4.2.1. Определение представительного вектора критерия	131

4.2.2. Оценка компетентности экспертов (согласно методу Дельфи) по важным критериям	133
4.2.3. Определение весовых коэффициентов	136
4.2.4. Построение функции принадлежности	137
4.2.5. Выбор наилучшей альтернативы	139
4.3. Пьезосканер для нанотехнологии	140
4.3.1. Выбор материала пьезопреобразователей	141
4.3.2. Расчёт основных характеристик и параметров пьезосканера	143
4.3.2.1. Расчёт характеристик	144
4.3.2.2. Расчёт максимального усилия и перемещения конца пьезостолбца	145
4.3.2.3. Расчёт резонансной частоты пьезостолбца	147
4.3.2.4. Расчёт чувствительности пьезоэлементов	148
4.4. Выбор оптимального профиля пьезосканера	150
4.4.1. Цилиндрический стержень	151
4.4.2. Призматический стержень	152
4.4.3. Конус	157
4.4.4. Поверхности сложной формы. Поверхность вращения параболы	158
4.4.5. Определение первой резонансной частоты пьезосканера	158

ГЛАВА 5. Синтез алгоритмов поиска технических решений пьезосканера	162
5.1. Алгоритмы поиска технических решений пьезосканеров	162
5.2. Разнообразие пьезоэлементов	168
5.3. Морфологические характеристики пьезокерамических материалов	173
5.4. Разработка технических решений функциональных систем и устройств на основе пьезоприводов	177
5.4.1. Стереометрическое устройство для наноперемещений ..	177
5.4.2. Зондовое устройство для нанотехнологии	179
5.4.3. Пьезопривод для нанотехнологии	180
5.4.4. Нанотехнологическое устройство перемещения	181
5.4.5. Устройство для формирования нанодорожек	183
5.4.6. Устройство наноперемещений	185
5.4.7. Технологическое устройство метрологического обеспечения нанотехнологии	187
5.4.8. Система перемещения для нанотехнологии	188
ГЛАВА 6. Магнитострикционные системы перемещения в нанотехнологии	191
6.1. Магнитострикция. Основные сведения	192
6.1.1. Обменная магнитострикция	192
6.1.2. Спонтанная магнитострикция и инвар-эффект	195
6.1.3. Магнитострикция (магнитодипольная и одноионная) ...	197

6.1.4. Гигантская анизотропная магнитострикция	200
6.1.5. Материалы с гигантской магнитострикцией	204
6.1.6. Влияние спонтанной магнитострикции на тепловое расширение ферромагнетиков	205
6.1.7. Влияние всестороннего сжатия на температуру магнитного упорядочения	212
6.2. Информационное моделирование магнитострикционного эффекта	215
6.2.1. Описание магнитострикционного преобразователя	215
6.2.2. Информационный метод проектирования новых технических решений	215
6.2.3. Основные понятия информационного моделирования ...	217
6.2.4. Информационная модель магнитострикционного эффекта	218
6.3. Расчёт магнитного поля постоянного магнита для магнитострикционных систем перемещений	224
6.4. Устройства прецизионного перемещения на основе эффекта магнитострикции	228
6.4.1. Устройство перемещения для нанотехнологии	228
6.4.2. Привод для нанотехнологии	230
6.4.3. Устройство наноперемещения зонда	231
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	233
ЛИТЕРАТУРА	236
ОГЛАВЛЕНИЕ	247

