

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
--------------------------	----------

ГЛАВА 1

МАНИПУЛЯТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ ШАРНИРАХ ДЛЯ МИКРОНАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ	9
--	----------

(В.А. Глазунов, А.В. Орлов, А.К. Алешин, Н.А. Серков)

1.1. Введение.....	9
1.2. Гибкие шарниры	11
1.3. Еще один шаг вглубь. Понижающий редуктор шага.....	25
1.4. Выводы	34
Литература	34

ГЛАВА 2

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	37
---	-----------

(М.А. Шолохов, С.В. Хейло, А.В. Царьков)

2.1. Общая классификация сварных конструкций	38
2.2. Манипуляционные системы сварочных роботов.....	40
2.3. Вспомогательное оборудование (позиционеры).....	41
2.4. Вспомогательное оборудование для расширения рабочей зоны манипуляторов промышленных сварочных роботов.....	45
2.5. Позиционеры с шестью степенями свободы.....	48
2.6. Применение роботов в механизмах относительного манипулирования	50
Литература	51

ГЛАВА 3

МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ ВНЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ	53
--	-----------

(А.В. Антонов, В.А. Глазунов)

3.1. Решение обратной задачи о положении	57
3.2. Решение прямой задачи о положении	59
3.2.1. Геометрический способ	59

3.2.2. Использование кинематических уравнений связи	61
3.3. Решение задач о скорости	62
3.3.1. Решение обратной задачи о скорости	63
3.3.2. Решение прямой задачи о скорости	63
3.4. Исследование рабочих зон механизма	64
3.4.1. Построение рабочей зоны постоянной ориентации	65
3.4.2. Построение рабочей зоны постоянного положения	68
3.4.3. Экспериментальная оценка рабочих зон	71
Заключение	82
Литература	83

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

*(Г.С. Филиппов, А.К. Алешин, Г.В. Рахоян,
С.А. Скворцов, К.А. Шалюхин)*

4.1. Синтез механизмов параллельно-последовательной структуры	87
4.2. Анализ и экспериментальные исследования механизмов	93
Литература	108

ГЛАВА 5 АНАЛИТИКО-ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ АВИАЦИОННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(В.А. Нестеров)

5.1. Основные и дополнительные условия синтеза плоских рычажных механизмов	114
5.1.1. Цель кинематического синтеза рычажного механизма	114
5.1.2. Основные условия синтеза	115
5.1.3. Дополнительные условия синтеза	118
5.2. Постановка задачи синтеза рычажных механизмов установок ЛА	119
5.2.1. Структура конструкции установки	119
5.2.2. Основные условия синтеза	120
5.3. Аналитикооптимизационный метод синтеза рычажных механизмов установок ЛА	122
5.3.1. Условия синтеза в форме уравнений и неравенств	122
5.3.2. Вычисляемые и варьируемые параметры механизма	123
5.3.3. Целевая функция	124

5.3.4. Общая структура алгоритма	127
5.3.5. Особенности целевой функции	129
5.4. Синтез восьмизвенного механизма с качающимся цилиндром	130
5.4.1. Уточнение постановки задачи.....	130
5.4.2. Расчет вычисляемых параметров	133
5.4.3. Условия синтеза в форме неравенств.....	136
5.4.4. Построение целевой функции	136
5.4.5. Числовой пример.....	138
Заключение	139
Литература.....	139

ГЛАВА 6

КОНТРОЛЛЕР ХИРУРГА ДЛЯ АССИСТИРУЮЩЕГО ХИРУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	141
<i>(Р.С. Нахушев, Д.Ю. Пушкарь, С.А. Шептунов)</i>	

6.1. Контроллеры для роботохирургии, представленные на рынке	145
6.2. Контроллеры для роботохирургии. Идеи и патенты	151
6.3. Представляемый контроллер хирурга.....	159
6.4. Контроллер руки.....	161
6.5. Контроллер запястья	170
6.6. Контроллер кисти	178
6.7. Цифровой блок управления контроллера хирурга	189
Пример реализации контроллера хирурга	189

ГЛАВА 7

МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ.....	191
<i>(А.Г. Лесков, В.Н. Зимин)</i>	

7.1. Робототехника и орбитальные космические станции	193
7.2. КМР для сборки и обслуживания ОКС.....	197
7.3. Проект КМР «Робонавт»	204
7.4. Другие проекты.....	206
7.5. Задачи, решаемые КМР МКС.....	206
7.5.1. Оперативное использование SSRMS.....	206
7.5.2. Оперативное использование Dextre.....	208
7.5.2.1. Монтажные операции, выполненные Dextre на МКС.....	209
7.5.2.2. Операция дозаправки спутника, выполненная Dextre на МКС	211
7.5.2.3. Операция саморемонта Dextre на МКС.....	215

7.5.3. Оперативное использование ERA.....	216
7.5.4. Оперативное использование JEMRMS	216
7.6. Описание дизайна и параметров космических роботов МКС.....	216
7.6.1. SSRMS.....	216
7.6.2. ERA.....	217
7.6.3. SPDM (Dextre)	219
7.6.4. JEMRMS	220
7.6.5. Характеристики роботов МКС	221
Литература	222

ГЛАВА 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ

ЭКЗОСКЕЛЕТНЫХ СИСТЕМ 224

(С.Ф. Яцун, А.С. Яцун)

Введение	224
8.1. Основные понятия и структура БТШС	225
8.2. Описание процесса поднятия грузов человеком.....	226
8.3. Требования, предъявляемые к экзоскелетной человеко-машинной системе	227
8.4. Описание и структура ЧМИ.....	228
8.5. Математическая модель БТШС	230
8.5.1. Кинематическая модель БТШС.....	232
8.5.2. Динамическая модель БТШС	235
Заключение	240
Литература	241

ГЛАВА 9

СИНТЕЗ МНОГОСЕКЦИОННЫХ

РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ

СТРУКТУРЫ ТИПА «ХОБОТ» 243

(А.П. Карпенко, Ю.Т. Каганов)

Введение	243
9.1. Определение формы продольного сечения ММТХ.....	245
9.2. Определение длин секций ММТХ.....	247
9.3. Определение геометрических параметров секций ММТХ	250
9.4. Планирование целевой конфигурации ММТХ.....	253
9.5. Многоагентный подход к управлению ММТХ	258
Заключение	261
Литература	263

ГЛАВА 10	
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ	
МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ	
С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ.....	265
<i>(В.А. Борисов)</i>	
10.1. Синтез механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы.....	265
10.2. Разработка классификации манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями	275
10.3. Кинематический анализ манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями.....	280
10.3.1. Решение задачи о положениях	280
10.3.2. Решение задачи о положениях с учетом упруго-динамических свойств гибких звеньев	282
10.3.3. Решение задачи о скоростях.....	284
10.4. Динамический анализ манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями.....	285
10.4.1. Анализ сил и моментов.....	286
10.4.2. Определение сил, действующих на гибкие звенья	286
10.5. Примеры применения манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями в технических решениях	287
Литература.....	294

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная работа является продолжением первой монографии «Новые механизмы в современной робототехнике».

В новой монографии «Механизмы перспективных робототехнических систем» представлены научные подходы к проектированию и созданию новых механизмов и машин для аддитивных технологий, авиационных робототехнических систем, медицинской робототехники, объектов nanoиндустрии, экзоскелетов и других систем. Приведенные исследования позволяют обеспечить заданные функциональные свойства, сократить и автоматизировать процессы разработки и последующей эксплуатации робототехнических систем. Собранные в монографию знания отражают современное состояние дел и направления развития робототехники, что формирует актуальный научный фундамент для выполнения прикладных исследований и практических проектов.

Кроме того, ряд глав книги посвящен обзорным исследованиям, представляющим современный уровень применяемых механизмов в различных робототехнических системах, в частности в сварочном производстве, космической и медицинской робототехнике.

Круг авторов данной монографии расширен и представляет разные организации: ИМАШ РАН, ИКТИ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГУ им. А.Н. Косыгина, ЮЗГУ, МАИ, научно-производственную компанию «Шторм», компанию «Ассистирующие хирургические технологии».

Представленные результаты могут быть использованы при проектировании машин и робототехнических систем новых классов.

ГЛАВА I

МАНИПУЛЯТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ ШАРНИРАХ ДЛЯ МИКРО- НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ

В.А. Глазунов, А.В. Орлов, А.К. Алешин, Н.А. Серков

1.1. Введение

Стремительно вошедшие в деловой обиход несколько лет назад сложносоставные слова, начинающиеся с приставки «нано-», которую присоединяли к любым другим терминам, часто обозначавшим понятия, вовсе не поддающиеся измерению, мелькнув яркими звездами, стали потихоньку забываться, поскольку по законам моды поднадоели и уже не производили желаемого впечатления на госчиновников. Но в научном сообществе в последние три десятилетия, напротив, эта приставка прижилась и стала сопровождать исследования во все большем числе направлений. Это и бионанотехнологии, и нанометрология, изготовление полупроводниковых наноструктур, химические нанотехнологии, нанообработка, нанопроизводство, материаловедение, системы хранения данных сверхвысокой плотности и т.п.

Сканирующий туннельный микроскоп. Начало реальному проникновению исследователей в мир нанообъектов положило появление туннельных микроскопов, которые были созданы как одно из применений метода измерения сверхмалых сил. В отличие от традиционных «световых» и сканирующих электронных микроскопов, получающих изображение на основе отраженных электромагнитных волн, с помощью туннельных изучали поверхность, судя по величине тока, протекавшего через сверхтонкий зонд, двигавшийся над поверхностью образца. И если у обычных микроскопов разрешение ограничивается рефракцией электромагнитной волны, то у туннельных оно зависит в основном от точности позиционирования зонда. Естественное ограничение — возможность исследования таким методом только проводящих материалов — было преодо-

лено в 1986 г. с появлением так называемых атомно-силовых микроскопов (АСМ – atomic force microscope) [7] – гибрида туннельного микроскопа и профилометра. С их помощью получают трехмерное изображение поверхности путем ее непосредственного «ощупывания» микрозондом, закрепленным на гибкой пластине, деформация которой определяется по положению отраженного от нее лазерного луча. Вместо вольфрамового зонда стали использовать алмазное острие, атом на вершине которого, благодаря возникновению при сближении с атомом образца отталкивающих сил Ван-дер-Ваальса, огибал его, а система управления, сообразуясь с его передвижением, поддерживала оптимальное расстояние.

Центральным элементом АСМ является сканер, осуществляющий сверхточное взаимное перемещение зонда и образца по трем осям. В ранних коммерческих реализациях использовались три типа таких нанопозиционеров: «трипод», на пьезотрубках и конический.

«Трипод» осуществляет независимое перемещение по трем осям при помощи линейных двигателей. Основными его недостатками являются большие размеры и значительная зависимость от изменения температуры, вызванная несимметричностью конструкции.

Двигатели сканеров используют пьезотрубки, состоящие из изолированных друг от друга секторов радиально поляризованного пьезоматериала, изгибающихся под действием приложенного напряжения в трех плоскостях. Достоинствами таких аппаратов являются их простота, дешевизна, а также вполне достаточная рабочая зона при умеренной длине пьезодвигателя. Но в числе недостатков подобных конструкций – низкие резонансные частоты, на них сильно действуют эффекты гистерезиса и «дотягивания» (см. замечание о «дотягивании»), проявляющиеся в пьезоматериалах, а также значительное взаимовлияние между всеми тремя осями.

Разновидностью только что описанной конструкции является сканер, использующий коническую пьезотрубку. Это усовершенствование дает увеличение жесткости двигателя, повышение резонансных частот механизма и расширение рабочей зоны. Однако сложность изготовления и большая стоимость предопределили малую распространенность такого решения.

Замечание о «дотягивании». Здесь и далее по тексту вместо англоязычного термина «creep» – сползание, будем применять более точно описывающее суть явления, хотя и не вполне литературно правильное, слово «дотягивание». Дело в том, что при приложении высокого на-



пряжения к пьезоэлементу он быстро перемещается в прогнозируемое положение. Но далее на протяжении нескольких минут при неизменном напряжении продолжает медленно изменять свой размер, причем в заданном ранее направлении. Наибольшее перемещение можно наблюдать при снижении напряжения от максимума до нуля, когда оно составляет до 5% от наибольшего.

Усовершенствование туннельного микроскопа и превращение его в АСМ не только чрезвычайно расширили область применения, но и позволили наблюдать многие процессы, например в живой клетке, в реальном времени, что, в свою очередь, в последнее десятилетие сформировало новые требования к системам микронанопозиционирования. Их скоростные свойства теперь должны обеспечить частоту сменяемости кадров, сравнимую с видеосъемкой, и разрешение, сопоставимое с величиной атома, — менее одного нанометра.

1.2. Гибкие шарниры

В конструкции сканера типа «трипод», когда образец плоскопараллельно перемещается относительно зонда, для поддержания предметного столика были применены гибкие шарниры. Таким образом, их реальное использование для создания сверхточных механизмов имеет более чем тридцатилетнюю историю. Уже в работе [1] и ряде других были заложены основные принципы их построения. В 90-х годах XX века кроме микроскопии подобные механизмы нашли ограниченное практическое применение в микроэлектромеханических устройствах (MEMS), в первую очередь из-за отсутствия люфтов, шума, трения (а значит, и смазки) и их компактности. В последние десять лет общий прогресс в технологиях и понимании принципов работы гибких шарниров выявил и такое их преимущество, как возможность создания монолитных устройств, что значительно снижает затраты при сборке. Следствием также является уменьшение массы, а значит, улучшение частотных свойств. Износ устройства тоже замедляется. Кроме того, стал очевидным большой потенциал их дальнейшей миниатюризации и повышения точности. Выявились и недостатки, связанные с паразитными эффектами при перемещении, девиациями траекторий движения, малой рабочей зоной, а также сложностью разработки [4]. Но, несмотря на это, спектр применения гибких механизмов все расширяется, они используются в микробио-

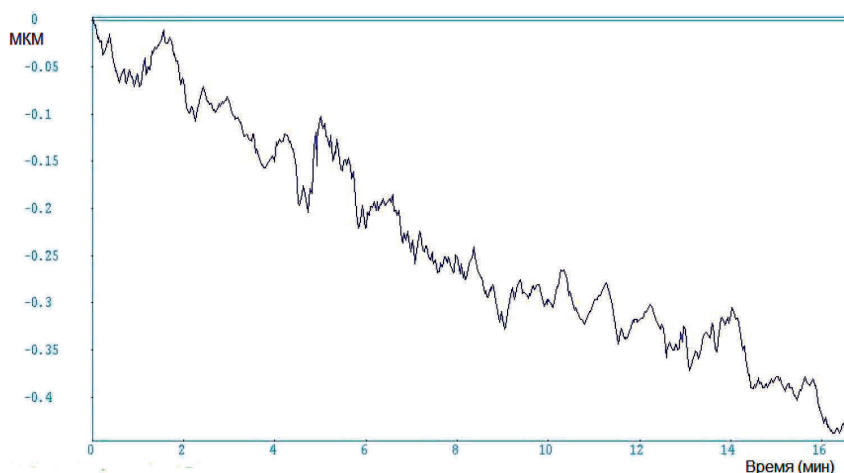


Рис. 1.1. Перемещение центра выходного звена нанопозиционера за 16 минут составило около 0,4 мкм

логии при операциях с клетками, в процессах сборки микролинз на кристалле, производстве полупроводниковых структур и др. [7].

Примерно в это же время стали все шире распространяться механизмы с параллельной структурой, обладающие, по сравнению с последовательными, меньшей инерцией, большими жесткостью и полезной нагрузкой, однако и меньшей рабочей зоной.

Влияние окружающей среды и быстродействие. Грозным вызовом при проектировании нанопозиционеров является влияние окружающей среды. Температурный дрейф, добавляясь к гистерезису и «дотягиванию» — явлениям, органически свойственным пьезоэлементам, может внести существенные искажения в результат. Если не принять специальных мер для защиты механизма от возмущающих воздействий, то на него, кроме вышеперечисленных факторов, будут действовать конвекционные потоки воздуха, вызывающие стохастические перемещения. Это хорошо видно на рис. 1.1, где представлен график зависимости положения центра рабочей зоны нанопозиционера от времени. Измерения проводились с помощью интерферометра Майкельсона.

Кроме того, можно заметить, что самые короткие периоды стохастических колебаний составляют около одной секунды. Это означает, что для снижения влияния этих колебаний на систему управления быстродействие манипулятора должно обеспечивать выполнение нужного цикла перемещений за существенно более короткие, чем одна секунда, отрезки времени.

Таким образом, не только скорость смены кадров при наблюдениях в реальном времени в атомно-силовых микроскопах требует повышения быстродействия самого манипулятора и его системы управления, но и минимизация воздействия окружающей среды, которая может быть достигнута аналогичными мерами. Впрочем, и высокоточное термостатирование, и вакуумирование рабочей зоны являются опробованными методами, хорошо зарекомендовавшими себя в туннельной микроскопии.

Пьезодвигатель и его предварительное нагружение. Несмотря на все упомянутые выше недостатки, двигатели на основе пьезоэлементов, благодаря большому развиваемому усилию и быстродействию, чаще других используются в системах микронанопозиционирования. Так, линейный пьезодвигатель, составленный из набора керамических пластин, может создавать давление порядка тысяч ньютонов на квадратный миллиметр, время изменения его длины до максимальной может составлять единицы микросекунд, а ускорение при этом может достигать до $10^4 g$.

Однако основным недостатком таких двигателей (а речь идет именно о линейных моторах, с которыми все же приходится мириться) является небольшой диапазон перемещения. Для одной и той же конструкции он в основном определяется физическими характеристиками применяемой пьезокерамики, количеством пластин, и в среднем составляет примерно 1 мкм на 1 мм длины набора. В реальности же бесконечно увеличивать число пластин толщина

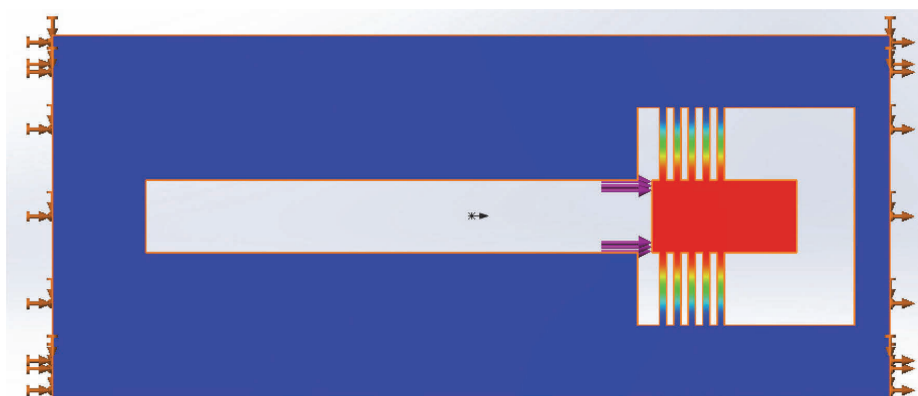


Рис. 1.2. Пьезодвигатель вкладывается в канал и зажимается между упором и предварительно смещенным гибким элементом (справа). Анализ перемещения методом конечных элементов здесь и ниже выполнен в программе SolidWorks

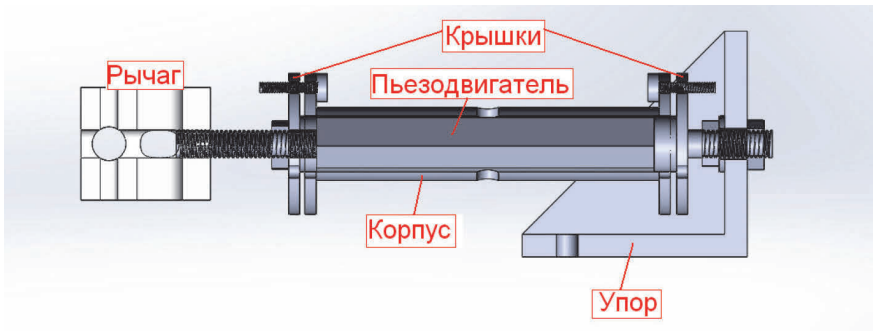


Рис. 1.3. Разрез конструкции пьезодвигателя в корпусе вместе с упором и рычагом. Гайки и шайбы на сжимающих винтах не показаны

которых составляет порядка 100 мкм, увы, невозможно из-за их коробления и потери плоскостности при сборке в пакет.

Для расширения диапазона можно либо включать ряд двигателей последовательно, увеличивая общую длину, что существенно удорожает конструкцию, либо применять специальные механизмы, которые мы рассмотрим ниже.

В целях предохранения пакета пьезопластин от разрушения растягивающими силами инерции механизма и самого двигателя, возникающими при переходных процессах, производители рекомендуют предварительно сжимать его с некоторым усилием. В случае монолитных конструкций это можно сделать при помощи гибких элементов, которые перед установкой пьезодвигателя смещаются [6]. Простейший вариант представлен на рис. 1.2. Роль пружины может выполнять и сам гибкий механизм.

В случае разработанного авторами механизма, описываемого во второй части, производитель рекомендовал предварительное сжатие с силой 350 Н. Для этого пьезодвигатель был помещен в латунный цилиндрический корпус (см. рис. 1.3). Давление прикладывалось торцевыми крышками, закрепленными винтами с подложенными под гайки шайбами, выполняющими роль упругих элементов.

Замечание о саморазогреве пьезоэлементов. Говоря о предварительном нагружении с помощью различных вариантов корпусов, уместно упомянуть, что интенсивное изменение размеров пьезопластин под действием приложенного напряжения приводит к повышению их температуры, что впоследствии может стать причиной их преждевременного разрушения или, при превышении температуры Кюри, даже изменения их поляризации. Поэтому при расположении двигателя внутри корпуса необходимо учитывать, что воздушная прослойка между ним

и внешней оболочкой может служить термоизолятором, что ухудшит его температурный режим. Напротив, хороший температурный контакт пьезопластин с соответствующим по теплоотдаче окружением может его существенно улучшить.

Выбор материала для гибких шарниров. Есть множество механических характеристик материалов, влияющих на свойства изготовленных из них гибких шарниров. Основными являются модуль упругости (E), удельная плотность (δ) и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Если изделие планируется изготавливать с помощью электроискровой обработки, то к этому списку стоит добавить величину удельной электропроводности.

Для изготовления высокоточных и стабильных устройств позиционирования, обладающих достаточным быстродействием, были опробованы различные материалы с высоким модулем упругости, как можно более низким температурным коэффициентом и плотностью. Технология изготовления также наложила отпечаток на выбор: известны удачные попытки изготовления механизмов на гибких элементах из различных пластмасс методом 3D-печати [6].

Из-за относительной дешевизны и легкости механической обработки в качестве материала для гибких элементов часто выбирают алюминиевые сплавы типа 7075 и 6061. Последний является полным аналогом отечественного материала АД-33, тогда как различные варианты 7075, в зависимости от технологии закалки и старения, по параметрам приближаются к Д16Т. Однако подобные сплавы на основе алюминия обладают высоким значением температурного коэффициента, что ограничивает область их применения системами, где все операции укладываются в секундный интервал или работающими в лабораторных условиях с хорошей термостабилизацией.

Титановые сплавы обладают почти таким же отношением модуля упругости к удельной плотности, но имеют существенно меньший температурный коэффициент, что позволяет применять их в микронанопозиционерах, долговременно работающих в условиях изменения температуры окружающей среды. Но при всех положительных свойствах этих материалов при сравнении со сплавами алюминия не стоит забывать о существенно большей их цене и трудности механической обработки.

Инвар, сплав никеля и стали, обладает еще более низким температурным коэффициентом и может применяться в особо ответствен-

ных механизмах, работающих в условиях температурной нестабильности. Он более дорог и труднее поддается механической обработке. И, кроме того, инвар проявляет высокие магнитные свойства, что не всегда удобно.

Термопластичные материалы, применяемые при трехмерной печати, благодаря низкой цене, относительной простоте и скорости изготовления привлекают внимание создателей устройств на гибких шарнирах. По отношению величины модуля упругости к плотности (19,8) они занимают почетное третье место вслед за сплавами титана, а по температурному коэффициенту им вообще нет равных (кроме суперинвара) – $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$! Поэтому, если в устройстве не создаются условия для превышения в гибких элементах предела прочности на растяжение (41,4 МПа), то, учитывая вышесказанное, пластмассы вполне могут найти в нем применение. Вышеприведенные данные относятся к наиболее доступному поликарбонату типа ABS, но существует еще целый ряд других материалов для объемной печати с более высокими механическими характеристиками.

Бериллиевые бронзы (сплавы меди с бериллием и другими присадками) являются общепризнанными лидерами среди пружинящих материалов. Примененная в описанном ниже нанопозиционере бронза марки БрБ2 обладает высоким значением модуля упругости, превосходящим алюминиевые и титановые сплавы (117,6 МПа) и лучшим, чем у алюминиевых, температурным коэффициентом. Она обрабатывается легче, чем титан, но проигрывает всем вышеперечисленным по плотности. Характеристики описанных выше ма-

Таблица 1.1.

Сравнение свойств материалов для изготовления гибких шарниров

Материал	Модуль упругости (E), ГПа	Удельная плотность (δ), г/см ³	ТКЛР, ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	E/δ
Алюминиевый сплав (7075)	72	2,8	23,6	26
Титановый сплав	106–114	4,42	8,8	24–26
Инвар 36	148	8,10	1,3	18,4
Сплав 32НКД (суперинвар)	148	8,10	0,3	18,4
Бериллиевая бронза БрБ2	117,6	8,25	16,6	14,25
Пластмасса ABS	20,7	1,03–1,06	0,8	19,8

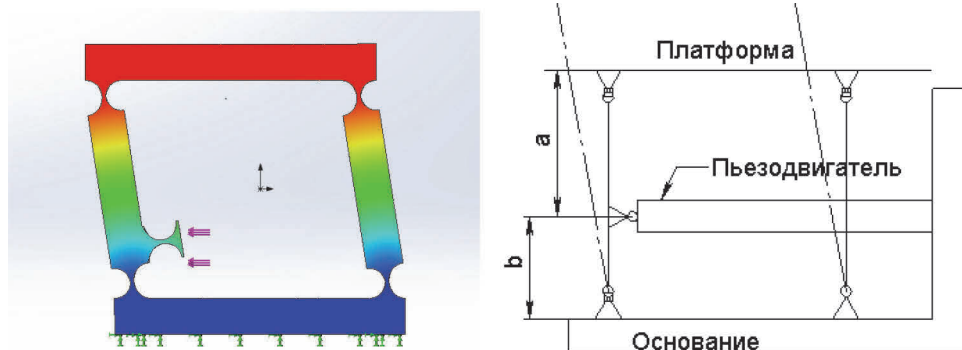


Рис. 1.4. Анализ перемещения параллелограммного механизма методом конечных элементов и его кинематическая схема

териалов сведены в таблицу 1.

Диапазон перемещения. Нетрудно предположить, что для большинства применений размер рабочей зоны устройства является критически важной величиной. Казалось бы, простое увеличение диапазона перемещения путем последовательного соединения нескольких линейных пьезодвигателей на самом деле оборачивается не только ростом габаритов и стоимости, но также и повышением требований к мощности блоков питания за счет кратного увеличения силы тока при работе на высоких частотах.

В ряде критических случаев при оценке рабочей зоны необходимо также учитывать и возможное ее сокращение из-за влияния жесткости гибких шарниров, стремясь к тому, чтобы последняя не превышала 10–20% от жесткости самого линейного двигателя.

Для расширения диапазона перемещения используют различные дополнительные устройства. Так, широко применяются параллелограммы на гибких шарнирах, коэффициент трансформации которых определяется отношением общей длины рычага к расстоянию от нижнего по рисунку шарнира до линейного двигателя: $K_{mp} = (a + b) / b$.

При реализации нанопозиционера в виде монолитной конструкции часто используют так называемые мостовые механизмы, в которых пьезодвигатель, расположенный внутри ромба из гибких элементов, исходно находится в расширенном состоянии, а для совершения нужного движения сокращается. Его коэффициент трансформации определяется как

$$K_{mp} = ((l^2 \cdot \sin^2 \alpha + d_i \cdot (2 \cdot l \cdot \cos \alpha - d_i))^{1/2} - l \cdot \sin \alpha) / d_i.$$

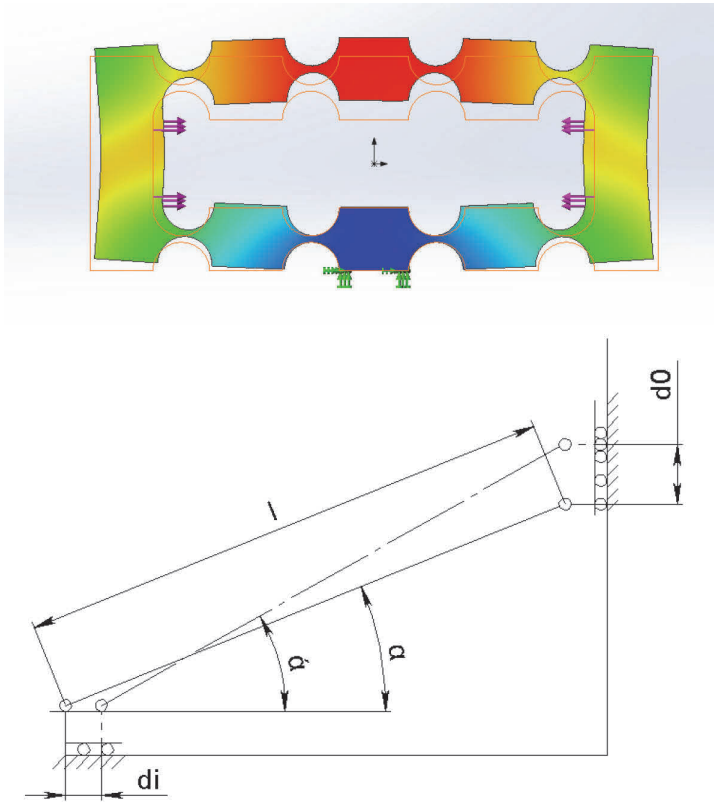


Рис. 1.5. Движение мостового механизма при сокращении размеров пьезодвигателя, вставленного внутрь

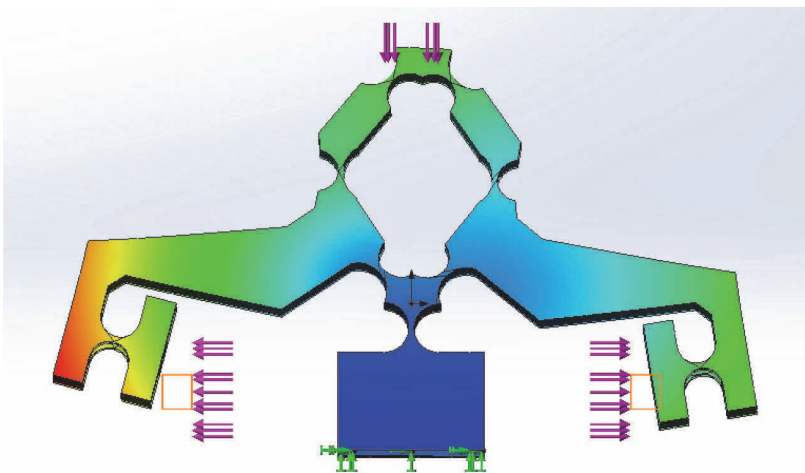


Рис. 1.6. Перемещение варианта мостового механизма, расширяющегося при увеличении размеров пьезодвигателя

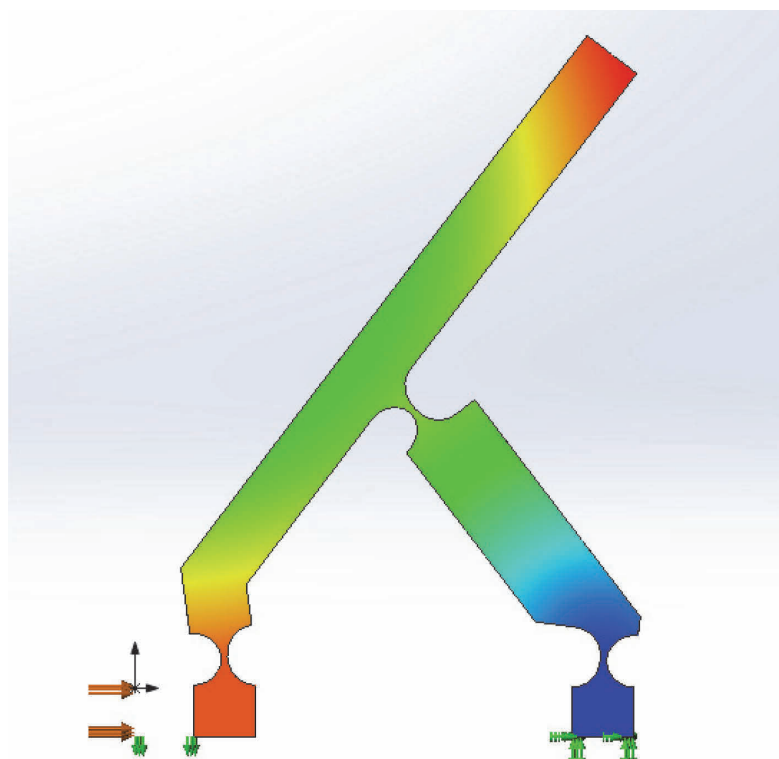


Рис. 1.7. Анализ перемещения механизма Скотта – Рассела, реализованного на гибких шарнирах

Одним из самых известных устройств для расширения диапазона является классический механизм Скотта – Рассела (Scott-Russell), замечательный тем, что его выходное звено движется по прямой, строго перпендикулярной оси линейного двигателя.

Замечание о частотных свойствах. При проектировании рычажных устройств, изменяющих величину рабочей зоны в ту или иную сторону, не следует забывать о том, что при добавлении их масс к общей массе механизма понижаются его резонансные частоты. Для улучшения частотных свойств устройства трансформации диапазона должны быть как можно более компактными и жесткими.

Последовательная или параллельная кинематика? Механизмы на гибких шарнирах строятся с применением как последовательной, так и параллельной кинематики. И каждая из них, в зависимости от требований ТЗ, имеет свои достоинства и недостатки.

Последовательная кинематика в гибких механизмах строится либо путем соединения друг за другом нескольких пьезодвигателей

в целях увеличения диапазона перемещения, либо путем расположения одного нанопозиционера внутри другого. Последняя схема дает относительно хорошие частотные свойства при высокоскоростном сканировании. Известны реализации подобных конструкций, обеспечивающие скорость сканирования до 70 кадров в секунду при размере поля 10×10 мкм [7]. Однако широкую полосу пропускания можно обеспечить только по одной из осей. Это происходит в основном потому, что пьезодвигателю, соединенному с основанием, приходится перемещать довольно значительную массу механизма другой оси. Кроме того, очень трудно обеспечить измерение и коррекцию ее паразитных перемещений, возникающих из-за влияния других осей. Среди плюсов – возможность сэкономить за счет того, что мощный и высокочастотный усилитель нужно ставить только на одном направлении перемещения!

Параллельные структуры обеспечивают высокую точность движения, жесткость конструкции, следствием чего являются высокие частотные свойства. Этому способствует и то обстоятельство, что все двигатели закрепляются на основании, что уменьшает инерционную массу рабочей платформы. А то, что параллельные кинематики обычно имеют симметричную структуру, в нанопозиционировании дает еще один дополнительный плюс в виде меньшей чувствительности к температурным изменениям. Поэтому параллельная кинематика предпочтительнее для быстрого и точного сканирования. Сложность подобных решений – в трудности минимизации взаимовлияния осей x и y . Но известны конструкции, где действие этих осей друг на друга уменьшено до -70 дБ [8].

Реализация нанопозиционеров в виде микроэлектромеханических устройств (MEMS). Как уже упоминалось выше, разработка микроэлектромеханических устройств началась около 30 лет назад, превратившись ныне в мощную индустрию с многомиллиардными оборотами. В последнее десятилетие были предприняты попытки реализации нанопозиционеров в виде монолитных микроминиатюрных конструкций, выполненных по технологии изготовления электронных интегральных схем. Одно из основных применений – создание миниатюрных устройств постоянного хранения данных со сверхвысокой плотностью на основе принципов действия микроскопа на атомных силах с одной лишь разницей: для увеличения скорости считывания вместо одного микрозонда применяются большие их массивы. Областью применения

подобных приборов может быть архивирование или мобильные устройства.

Каждый из тысяч микрозондов для записи и считывания информации представляет собой иглу с острием, имеющим размер порядка одного нанометра. С их помощью записываются и считываются данные, закодированные крошечными углублениями в носителе из тонкой полимерной пленки.

Перемещение к нужному участку происходит посредством двумерного сканера, который позиционирует носитель относительно массива зондов. Такой метод позволяет достичь плотности записи порядка нескольких терабит на квадратный дюйм [9].

Двигатели для MEMS-нанопозиционеров. Электромагнитные. Для перемещения носителя относительно массива зондов разработано несколько конструкций, в большинстве из которых используются электромагнитные линейные двигатели. Они состоят из небольшого постоянного магнита и катушки. Достоинством такого рода устройств является то, что величина перемещения линейно зависит от тока, что значительно упрощает управление и дает возможность использовать низковольтные источники питания, характерные для мобильных применений. Очевидным существенным недостатком является то, что сборка электромагнитных двигателей производится отдельно от остального механизма, который удается изготовить в ходе группового процесса обработки, а это существенно увеличивает трудоемкость и сложность сборки. Потребление энергии такими соленоидами также относительно велико.

Электростатические. Этот тип двигателей наиболее органично подходит для использования в MEMS-приборах и хорошо изучен [10]. Их изготовление происходит в одном пакетном производственном процессе со всеми остальными деталями нанопозиционера. Существует ряд конструкций электростатических двигателей, но наиболее распространенными являются так называемые расчески, представляющие со-

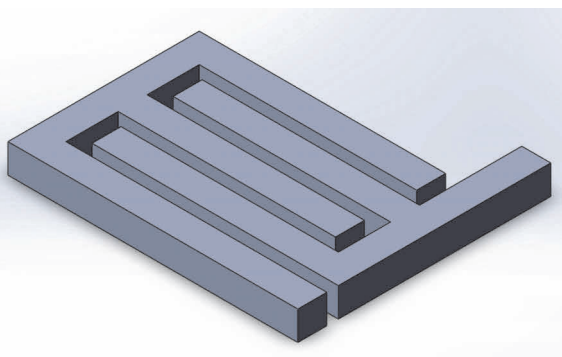


Рис. 1.8. Электростатический двигатель, выполненный из кремния, располагается на поликремниевой подложке

бой два вложенных друг в друга с небольшим зазором ряда плоских стержней (зубьев). При сообщении им противоположных потенциалов они притягиваются друг к другу с некоторой небольшой силой, которую увеличивают путем наращивания их числа.

К достоинствам таких двигателей, кроме уже упомянутой простоты изготовления, можно отнести малое энергопотребление. Недостатком же является высокое напряжение, необходимое для их работы, составляющее 100 и более вольт, что в мобильных применениях требует установки дополнительных преобразователей.

Диапазон перемещения устройств с такими двигателями сравним с двигателями на пьезоэлементах и может составлять 50 и более микрометров [11].

Электротермические. Наиболее часто используемым в микроисполнении термическим двигателем является устройство типа «шеvron». Оно представляет собой массив из пар одинаковых плоских стержней, соединенных друг с другом под небольшим углом. Противоположные их концы упираются в общее основание. При пропускании через них тока они расширяются и вся конструкция выгибается в направлении угла, образованного при соединении стержней.

Электротермические микродвигатели по сравнению с электростатическими способны развивать большее усилие при меньшей разности приложенных потенциалов, однако при значительно больших затратах энергии. Причем она расходуется даже тогда, когда движения нет, а нужно только сохранять занятое положение.

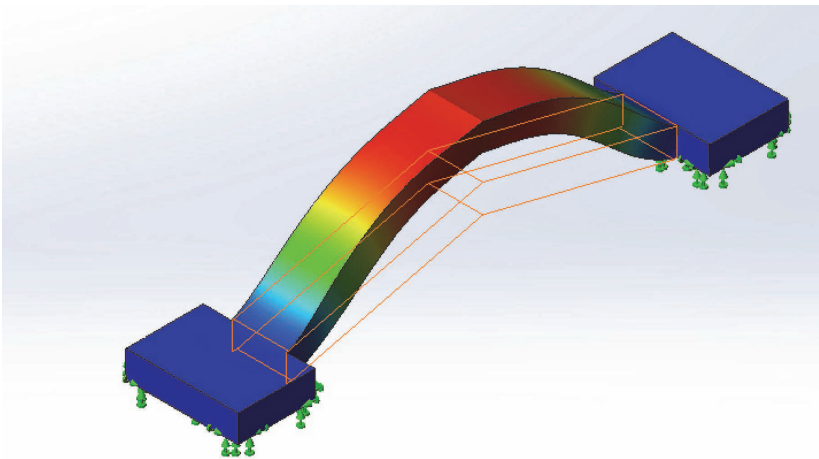


Рис. 1.9. Перемещение одной из пар стержней электротермического двигателя типа «шеvron»

В ряде применений решающим доводом в пользу электротермических двигателей может стать их высокая вибрационная стойкость.

Реализация нанопозиционеров в микроисполнении. Исследователями из разных стран был предпринят ряд попыток создать туннельный микроскоп в виде MEMS-устройства, первая из которых восходит к 1992 г. Нанопозиционер в той конструкции должен был перемещать зонд относительно образца, а не наоборот, как это было принято в «макрореализациях» туннельных микроскопов. Диапазон такого движения составлял всего 200 нм, что существенно сужало область применения микроскопа.

В 2012 году был создан АСМ, сканер которого был выполнен в виде MEMS-устройства [10]. Он представлял конструкцию из кремния, расположенную на изолирующем основании. В ее центре находилась рабочая платформа размером 3×3 мм, которая приводилась в движение двумя электростатическими двигателями типа «расческа». Они соединялись с ней посредством пружинящих стержней, ориентированных вдоль направления перемещения. Такой конструкцией удалось минимизировать взаимовлияние осей. Для максимизации усилия двигателей «зубья расчески» были расположены на минимально возможном по технологическим ограничениям расстоянии в 2 мкм. Рабочая зона устройства оказалась равной 15 мкм во всех направлениях, что вполне сравнимо с аналогичными параметрами нанопозиционеров в «макроисполнении».

Все основные устройства микроскопа на атомных силах, включая платформу, двигатели и пружинящие стержни, были выполнены из легированного кремния толщиной 25 мкм.

Факторы, влияющие на работу нанопозиционеров

На характеристики устройств позиционирования субнанометрового диапазона значительное влияние оказывают вибрации, индуцированные самим механизмом, гистерезис и «дотягивание» пьезодвигателей, взаимовлияние осей, окружающая среда, а также температурный дрейф. В частности, внутренняя вибрация ограничивает частотную полосу механизма из-за возбуждения гибких элементов в результате колебаний, наблюдающихся в системе в момент окончания короткого фронта или спада управляющих сигналов, приходящих на пьезодвигатели. Обычно частота сканирования составляет лишь от 1/10 до 1/100 от основной резонансной частоты механизма.

Повышения рабочей частоты можно добиться, используя более жесткие пьезодвигатели с высокой резонансной частотой. Снизить

влияние гистерезиса подобных двигателей можно, ограничивая диапазон его перемещения до 10% от максимального, что входит в очевидное противоречие с желательностью расширения рабочей зоны при сохранении высокого разрешения.

При медленном же позиционировании начинают сказываться эффекты «дотягивания» в пьезоэлементах и дрейфа. Для того чтобы уменьшить их влияние, позиционирование должно происходить достаточно быстро (при сканировании частота смены строк должна быть более 1 Гц).

Если в созданном механизме не удастся добиться полной симметрии или избавиться от инерционных масс, которые приведут к дисбалансу, то это увеличит взаимовлияние осей, что в конечном итоге снизит точность позиционирования и быстродействие.

Однако в реалиях современного развития отечественной науки и техники приходится учитывать, что кроме механики свои существенные ограничения на величину разрешения может накладывать и электронная система управления механизмом. Являясь в большинстве случаев цифровой, она вынуждена управлять пьезодвигателями аналоговым сигналом посредством цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Одной из основных характеристик, определяющих точность преобразования, является разрядность ЦАП, определяющая минимальный интервал между двумя значениями выходного сигнала, а значит, и наименьшее расстояние между соседними положениями пьезодвигателя, которым преобразователь управляет посредством усилителя. И даже при использовании появившихся на российском рынке относительно недавно микросхем 16-разрядных ЦАП минимальный шаг не может быть менее чем в 2^{16} раз меньше, чем весь диапазон перемещения. Если величина последнего – 50 мкм, то минимальный шаг составит около 1,5 нм, что несколько великовато по сравнению с размером атома – пределом, к которому стремится поиск методов получения так называемых двумерных материалов – одноатомных слоев типа графена.

Судя по сообщениям от фирм – разработчиков интегральных схем, выпускаются и 20-разрядные ЦАП, но они труднодоступны на отечественном рынке. О существовании еще более прецизионных преобразователей можно только догадываться хотя бы потому, что этот вопрос никогда не рассматривается зарубежными исследователями, работающими в области нанопозиционирования.

Одним из путей преодоления искусственно созданной «электронной» проблемы минимального шага, описанной выше, является создание механического каскада – редуктора, который обеспечил бы его (шага) деление до нужной величины. Он мог бы стать частью двухкаскадных систем с обратными связями, где в первом каскаде перемещение пьезодвигателей будет умножаться, увеличивая рабочую зону, а во втором – делиться, обеспечивая требуемое разрешение. Такое решение позволит использовать 10–12-разрядные ЦАП серийных микроконтроллеров, выпускаемых во многих странах мира, а значит, значительно снизить стоимость электронной системы управления нанопозиционеров.

Описанию разработки каскада, обеспечивающего предельно малый шаг передвижения выходного звена, посвящена следующая часть этой статьи.

1.3. Еще один шаг вглубь. Понижающий редуктор шага

Первый вариант привода для микронанопозиционирования был предложен в работе [12]. В нем, как и в установках зарубежных исследователей, описанных в [3–5], в качестве электромеханических преобразователей используются линейные пьезодвигатели, представляющие собой композицию из некоторого (обычно большого – до тысячи и более) количества пьезокерамических пластин толщиной порядка 100 мкм. В нашем случае была использована продукция фирмы «ЭЛПА» с максимальным перемещением около 60 мкм при

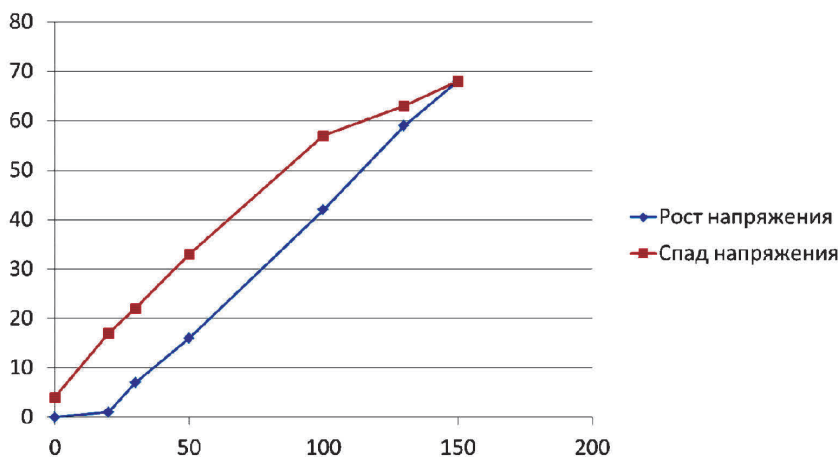


Рис. 1.10. Пьезодвигатель в корпусе. Зависимость перемещения (мкм) от напряжения (В)

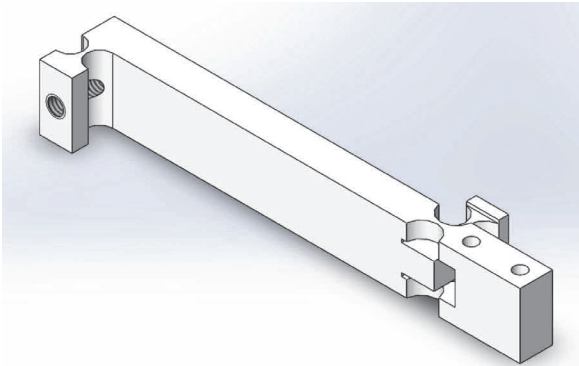


Рис. 1.11. Модель рычага с гибкими шарнирами с соотношением плеч 1:100

пъезодвигатель был помещен в латунный цилиндрический корпус. Его чертеж приведен на рис. 1.3.

Эксперимент показал, что характеристики пъезодвигателя «напряжение – перемещение» с корпусом и без него практически идентичны (см. рис. 1.10).

Для достижения субнанометровой повторяемости позиционирования в предложенном параллельном механизме с тремя степенями свободы использованы рычажные редукторы перемещения, обеспечивающие требуемое дробление шага линейного двигателя.

Модель такого рычага представлена на рис. 1.11.

Пъезодвигатель (на рисунке не показан) посредством законченного стального винта, упирающегося в торец набора пластин, через гибкий шарнир классической формы типа сектора окружно-

изменении управляющего напряжения от 0 до 150 В.

В целях предохранения пакета пьезопластин от разрушения напряжением обратной полярности, которое может возникнуть при переходных процессах, производитель рекомендовал предварительно сжимать его с усилием 350 Н. Для этого

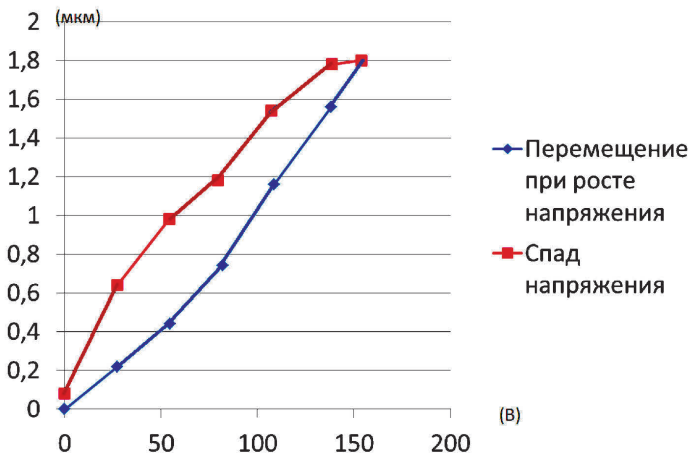
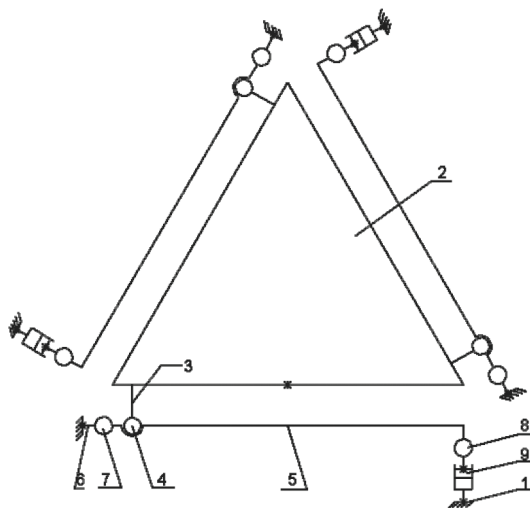


Рис. 1.12. Перемещение выходного звена рычага в зависимости от напряжения на пъезодвигателе

сти 1 жестко соединяется с входным звеном рычага. Выходное звено рычага через аналогичный шарнир 2 воздействует на рабочую платформу. Минимальное расстояние между полуцилиндрическими поверхностями шарниров составляет 1 мм. Хвостовик рычага 3 жестко закреплен в заделке, а та соединена с основанием.



Кинематическая схема первого варианта устройства микронанопозиционирования приведена на рис. 1.13.

Рис. 1.13. Кинематическая схема параллельного механизма с тремя степенями свободы

Первый вариант

Перемещение выходного звена 2 выполняется посредством управления тремя линейными пьезодвигателями. Линейный двигатель 9, жестко закрепленный одним концом с основанием 1, через кинематическую пару 8 воздействует на рычаг 5, опора которого консольно соединена с основанием 1 посредством заделки 6 и гибкого шарнира 7, который может поворачиваться относительно своей оси в зависимости от перемещения линейного двигателя 9. При повороте рычага 5 усилие передается через кинематическую пару 4 платформе (выходному звену) 2. Учитывая разность плеча приложения усилий от двигателя 9 к рычагу 5 и плеча передачи усилия от рычага 5 в сторону платформы 2, представляется возможным обеспечение передачи субмикронных перемещений выходному звену, на котором размещается объект. Аналогично действуют два других рычага. Задаваемое сложное перемещение платформы 2 относительно основания 1 достигается совместным действием всех линейных двигателей.

Реализация механизма. Гибкие шарниры, составляющие основу описанной выше кинематической схемы, были выполнены из бериллиевой бронзы БрБ2. Для экономии материала основная длина

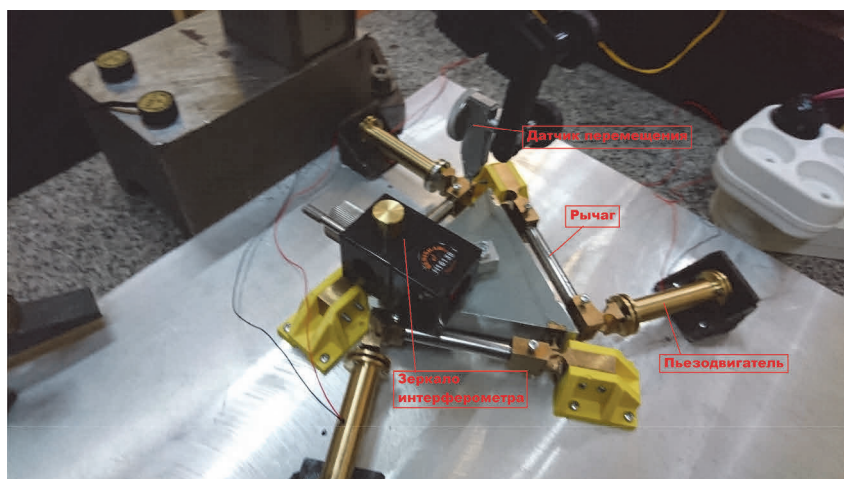


Рис. 1.14. Общий вид первого варианта механизма для микронанопозиционирования с установленным механическим датчиком перемещения и зеркалом интерферометра

рычагов, не участвующая в изгибных процессах, сделана из стальных стержней, жестко соединенных с собственно шарнирами. Заделки рычагов, связывающие их с основанием, были напечатаны на 3D-принтере из пластика типа ABS. Впоследствии они были заменены на выполненные из Ст 3, что не привело к изменению характеристик. Противоположные концы рычагов поддерживают треугольную платформу, выполненную из 20-мм листа алюминиевого сплава. В качестве основания использована дюралевая плита, закрепленная, в свою очередь, для проведения измерений на массивном гранитном постаменте.

Как упоминалось ранее, линейные пьезодвигатели в круглых латунных корпусах посредством винтов консольно соединены с одной стороны с входными звеньями (шарнирами) рычагов, с другой — с основанием через упор из конструкционной стали.

На рис. 1.14 показан вид сверху на описанный механизм в момент проведения измерений. На рабочей платформе установлено зеркало интерферометра, а к входному звену одного из рычагов поставлен датчик перемещений (первоначально — механический, заменен впоследствии на индуктивный).

Контакт гайки на винте, который связывает линейный двигатель с упором, оказывает существенное влияние на характеристики и требует шлифовки поверхности, и полировки шайбы.

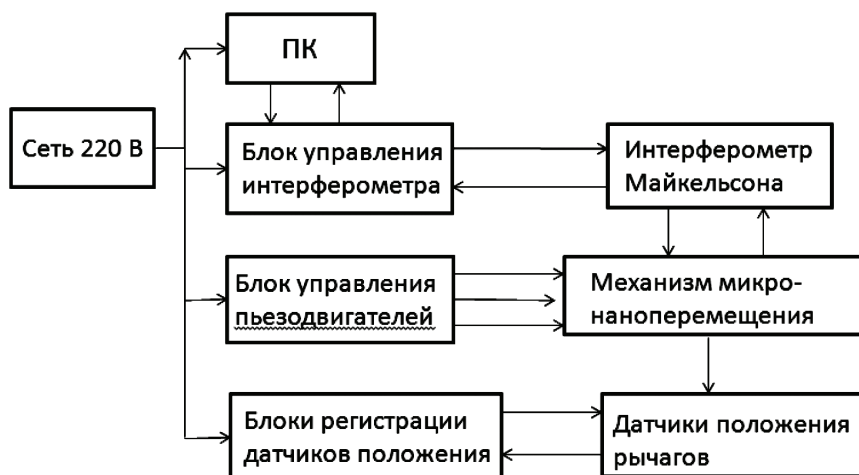


Рис. 1.15. Блок-схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка. Для исследования перемещения рабочей платформы был применен интерферометр Майкельсона фирмы Renshaw. Как и основание описываемого механизма, его блок, содержащий лазер, был размещен на гранитной плите. Непрозрачное зеркало интерферометра, в зависимости от плана эксперимента, закреплялось в различных точках платформы, а его датчики, корректирующие показания в зависимости от температуры, давления и влажности были размещены в непосредственной близости. Полупрозрачное зеркало фиксировалось на гранитной плите.

Движение выходных звеньев рычагов регистрировалось индуктивными датчиками перемещения с минимальным разрешением до 0,01 мкм. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.15.

В процессе экспериментов с помощью интерферометра проводились измерения передвижения двух точек на рабочем столе: центра на пересечении медиан и точки прикрепления выходного звена рычага на пересечении оси симметрии шарнира с краем треугольной поверхности. Регистрировалось смещение в направлении, параллельном оси активного пьезодвигателя. Два других при этом принимали участие в процессе пассивно, оставаясь под нулевым напряжением.

Одновременно с помощью двух индуктивных датчиков фиксировались перемещения на входных звеньях активного и одного из пассивных рычагов, что позволяло оценить их взаимовлияние.

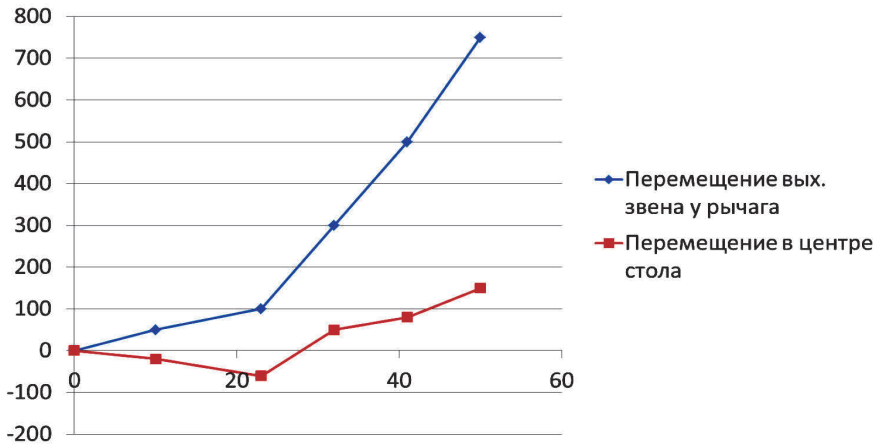


Рис. 1.16. Перемещение выходного звена (нм) от входного (мкВ) при росте напряжения на пьезодвигателе. Первый вариант механизма

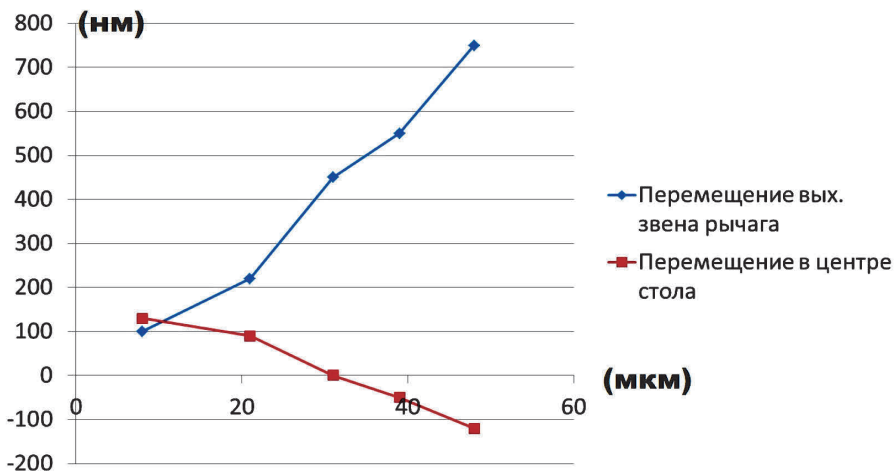


Рис. 1.17. Перемещение выходного звена (нм) от входного (мкВ) при спаде напряжения на пьезодвигателе. Первый вариант механизма

Блок управления пьезодвигателями спроектирован как с возможностью ручного задания посредством трех потенциометров, так и путем подачи постоянного управляющего напряжения 0–5 В от внешних устройств. Увеличение амплитуды сигнала осуществляется с помощью трех мощных операционных усилителей, питающихся от высоковольтных стабилизаторов напряжения.

Усредненные результаты измерения зависимости перемещения центра рабочей платформы и точки присоединения к ней выходно-

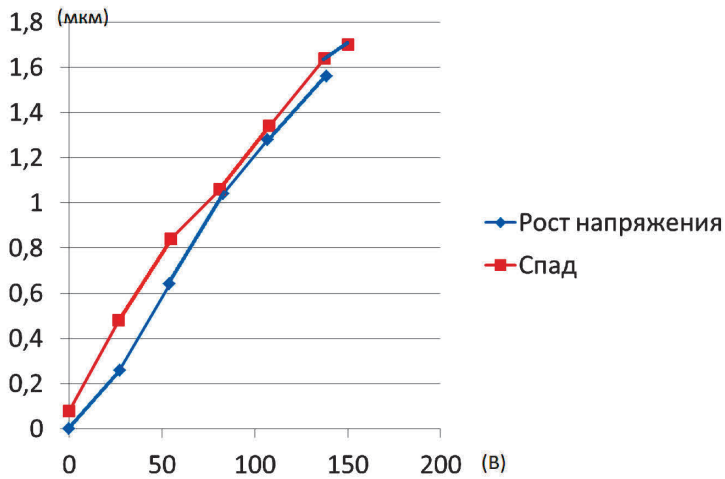


Рис. 1.20. Перемещение центра стола от напряжения на пьезодвигателе. Второй вариант механизма

Все элементы, обозначенные на схеме, сохранили свое функциональное назначение, упомянутое при описании первого варианта устройства. Исключением являются дополнительные шарниры 10, компенсирующие продольные перемещения в рычагах. Их конструкция аналогична примененным в первом варианте. Выполнены они из того же материала — бериллиевой бронзы. Существенно изменившиеся зависимости перемещения двух точек рабочего стола от движения пьезодвигателя, особенно заметные при спаде напряжения на нем, приведены на рис. 1.19 и 1.20.

Экспериментальное исследование динамики микронаноманипулятора. Для подачи на пьезодвигатель ступенчатого напряжения близкой к идеальной формы была собрана специальная управляющая схема на микроконтроллере, подающая сигнал на усилитель напряжения в заданный момент времени, а затем снимающая его. Таким образом, исключалась проблема дребезга контактов в механических переключателях. Перемещение центра стола во времени фиксировалось интерферометром на описанной ранее экспериментальной установке.

Однако абсолютно чистого эксперимента провести не удалось из-за органически присущей всем операционным усилителям склонности к самовозбуждению при работе исключительно на емкостную нагрузку. А именно таковой является пьезодвигатель! Для устранения этого явления приходится последовательно с ним добавлять активный компонент, что, естественно, сказывается на длительности

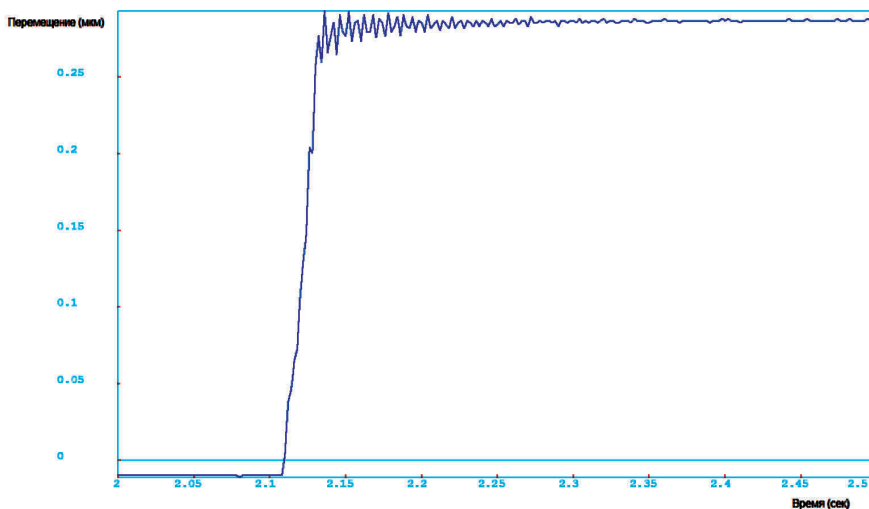


Рис. 1.21. Перемещение центра стола при подаче ступенчатого напряжения, перемещающего пьезодвигатель на 50 мкм. Длительность фронта составила 0,2 мс

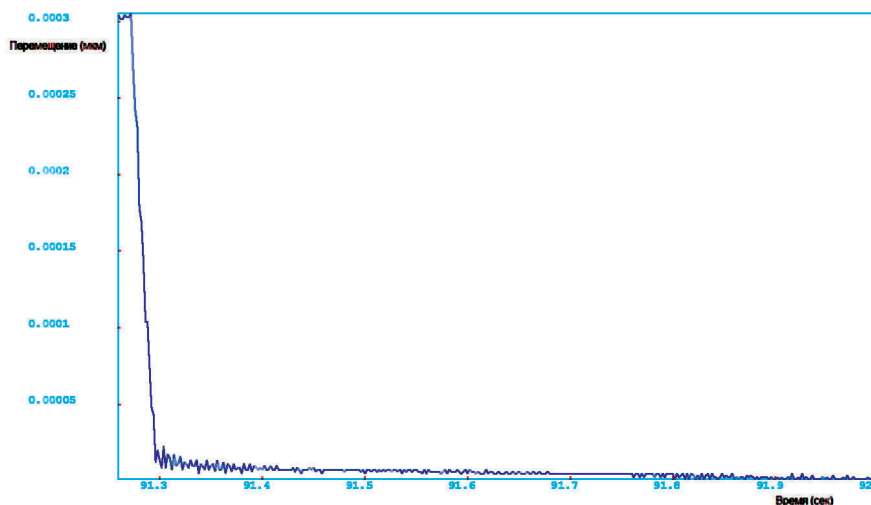


Рис. 1.22. Перемещение центра стола при скачке напряжения от максимума до нуля. Длительность спада составила 0,22 мс

переходного процесса. Таким образом, экспериментально был подобран включенный последовательно резистор минимально возможного номинала, не позволявший электронной части системы перейти в режим автоколебаний. Эксперименты показали, что влияние дополнительной нагрузки на длительность переходного процесса относительно невелико и не превышает 5%. На рис. 1.21 и 1.22

хорошо видны колебательные процессы в момент завершения фронта или спада управляющего сигнала.

1.4. Выводы

Практически продемонстрирована работоспособность механизма и возможность его применения в двухкаскадных устройствах, обладающих как большой рабочей зоной, так и предельно малым разрешением.

Предложенный принцип построения манипуляторов для микронаноперемещения позволяет широко варьировать коэффициент дробления минимального шага двигателя, доводя его в пределе до величин, сравнимых с размерами атомов.

Исследованный механизм после перемещения стабильно возвращается в исходное положение (с учетом наличия у пьезодвигателя петли гистерезиса).

Взаимного влияния входных звеньев рычагов в процессе перемещения не зафиксировано.

Литература

1. А.Ф. Крайнев, В.А. Глазунов, В.И. Нагорных. Разработка механизмов параллельной структуры для малых перемещений с упругими изгибными кинематическими парами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992, № 4, с. 79–86.
2. J. Yao S. Arney, N. C. MacDonald. Fabrication of High Frequency Two-Dimensional Nanoactuators for Scanned Probe Devices. J. of Microelectromechanical Systems vol. 1, no. 1, pp. 14–22, March 1992.
3. Fazenda, N., Lubrano, E., Rossopoulos, S., Clavel, R. Calibration of the 6 DOF high-precision flexure parallel robot «Sigma 6» // 5th Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, pp. 379–398, Chemnitz (2006).
4. D. Schoenen, I. Prause, S. Palacios, B. Corves. Overview and Classification of Flexure Hinge Based Micromanipulators // Microactuators and Micromechanisms, Mechanisms and Machine Science 30, Springer International Publishing Switzerland 2015, pp. 51–59.
5. Yuan Yun, Yangmin Li. Design and analysis of a novel 6-DOF redundant actuated parallel robot with compliant hinges for high precision positioning // Nonlinear Dyn. (2010) 61, pp. 829–845.
6. Mohammadali Ghafarian, Bijan Shirinzadeh, Tilok Kumar Das, Ammar Al-Jodah, Weichen Wei. Design of a novel parallel monolithic 6-DOF compliant micromanipulation mechanism // Proceedings of the 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 997–1002, Auckland, New Zealand, July 9–12, 2018.

7. G. Binnig, C.F. Quate, C. Gerber. Atomic force microscope // *Physical review letters*, Volume 56, № 9, pp. 930–934, 1986.
8. Y.K. Yong, S. O.R. Moheimani. Collocated Z-axis Control of a High-Speed Nanopositioner for Video-rate Atomic Force Microscopy // *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 14 (2), pp. 338–345, 2015.
9. A. Pantazi, A. Sebastian, T.A. Antonakopoulos, P. Bächtold, A.R. Bonaccio, ... Probe-based ultrahigh-density storage technology // *IBM Journal of Research and Development* 52 (4.5), 493–511, 2008.
10. A. G. Fowler, A. N. Laskovski, A. C. Hammond, S. O. R. Moheimani. A 2-DOF Electrostatically Actuated MEMS Nanopositioner for On-Chip AFM // *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 21, № 4, August 2012, pp. 771–773.
11. J.F. Alfaro and G. Fedder. Actuation for Probe-Based Mass Data Storage // *Technical Proceedings of the Fifth International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems (MSM '02)*, pp. 202–205, April 22–25, 2002, San Juan, Puerto Rico.
12. А.К. Алешин, Л.В. Гаврилина, А.С. Галигерова, В.А. Глазунов, А.В. Орлов. Прецизионный привод микроперемещений объектов на основе механизмов параллельной структуры // *Сборник трудов 4-го Московского международного симпозиума «Приводная техника и компоненты машин»*, Москва, 2018 г.