

РОБОТОТЕХНИКИ И МЕХАТРОНИКИ

Механизмы
перспективных
робототехнических
систем

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
В.А. ГЛАЗУНОВА, С.В. ХЕЙЛО



ТЕХНОСФЕРА

УДК 681.5+007.52

ББК 32.816

M55

Рецензенты:

Н.П. Алёшин – академик РАН, д.т.н. (МГТУ им Н.Э. Баумана)

А.С. Дорохов – член-корреспондент РАН, д.т.н.

(Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ»)

M55 Механизмы перспективных робототехнических систем

Под редакцией В.А. Глазунова, С.В. Хейло

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 296 стр. ISBN 978-5-94836-604-3

Данная монография является продолжением предыдущей работы «Новые механизмы в современной робототехнике». Представлены вопросы структурного синтеза, кинематики и динамики новых механизмов робототехнических устройств, а также задачи управления. Кроме того, приведен обзор современных робототехнических систем для различных технических применений.

Представленные исследования проведены авторами различных организаций: ИМАШ РАН, ИКТИ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГУ им. А.Н. Косыгина, ЮЗГУ, МАИ, научно-производственной компанией «Шторм», компанией «Ассистирующие хирургические технологии».

Книга предназначена для научных работников, инженеров, аспирантов, студентов, занимающихся вопросами робототехники, теории механизмов и машин.

УДК 681.5+007.52

ББК 32.816

© Алёшин А.К., Антонов А.В., Борисов В.А., Глазунов В.А., Зимин В.Н., Каганов Ю.Т., Карпенко А.П., Лесков А.Г., Нахушев Р.С., Нестеров В.А., Орлов А.В., Пушкарь Д.Ю., Рашоян Г.В., Серков Н.А., Скворцов С.А., Филиппов Г.С., Хейло С.В., Царьков А.В., Шалюхин К.А., Шептунов С.А., Шолохов М.А., Яцун А.С., Яцун С.Ф., 2020
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2020

ISBN 978-5-94836-604-3

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--------------------------|----------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 8 |
|--------------------------|----------|

ГЛАВА 1

| | |
|--|----------|
| МАНИПУЛЯТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ ШАРНИРАХ ДЛЯ МИКРОНАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ | 9 |
| <i>(В.А. Глазунов, А.В. Орлов, А.К. Алешин, Н.А. Серков)</i> | |

| | |
|---|----|
| 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 |
| <i>(М.А. Шолохов, С.В. Хейло, А.В. Царьков)</i> | |

| | |
|---|----|
| 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 |
| <i>(А.В. Антонов, В.А. Глазунов)</i> | |

| | |
|--|----|
| 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. Ращоян,
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-

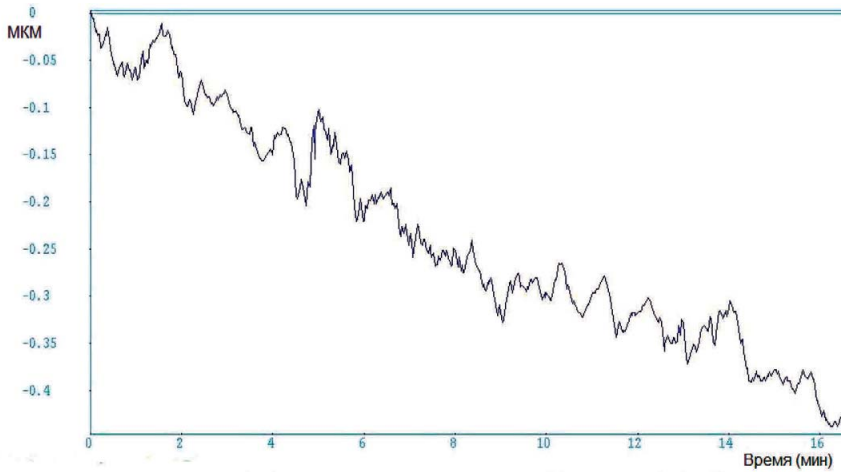


Рис. 1.1. Перемещение центра выходного звена нанопозиционера за 16 минут составило около 0,4 мкм

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

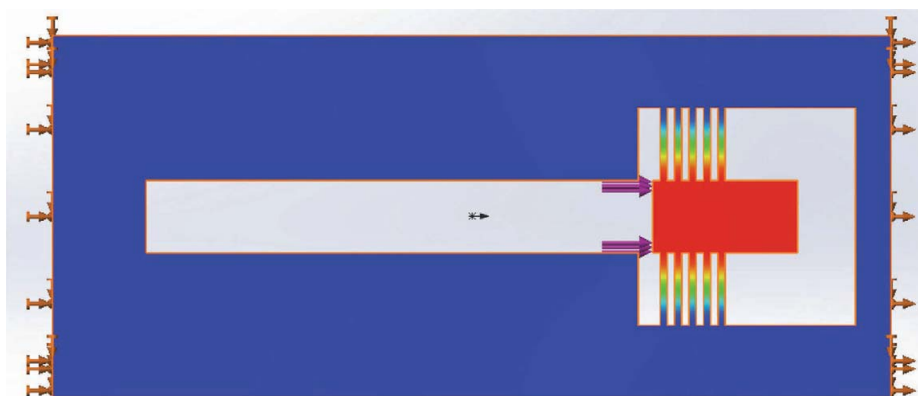


Рис. 1.2. Пьезодвигатель вкладывается в канал и зажимается между упором и предварительно смещенным гибким элементом (справа). Анализ перемещения методом конечных элементов здесь и ниже выполнен в программе SolidWorks

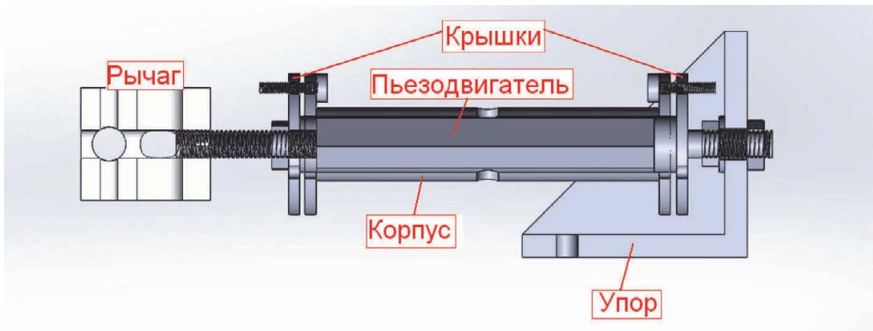


Рис. 1.3. Разрез конструкции пьезодвигателя в корпусе вместе с упором и рычагом. Гайки и шайбы на сжимающих винтах не показаны

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 |

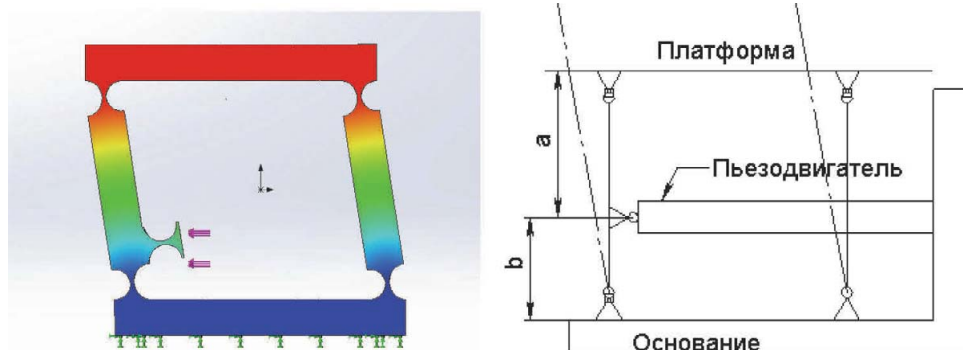


Рис. 1.4. Анализ перемещения параллелограммного механизма методом конечных элементов и его кинематическая схема

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

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

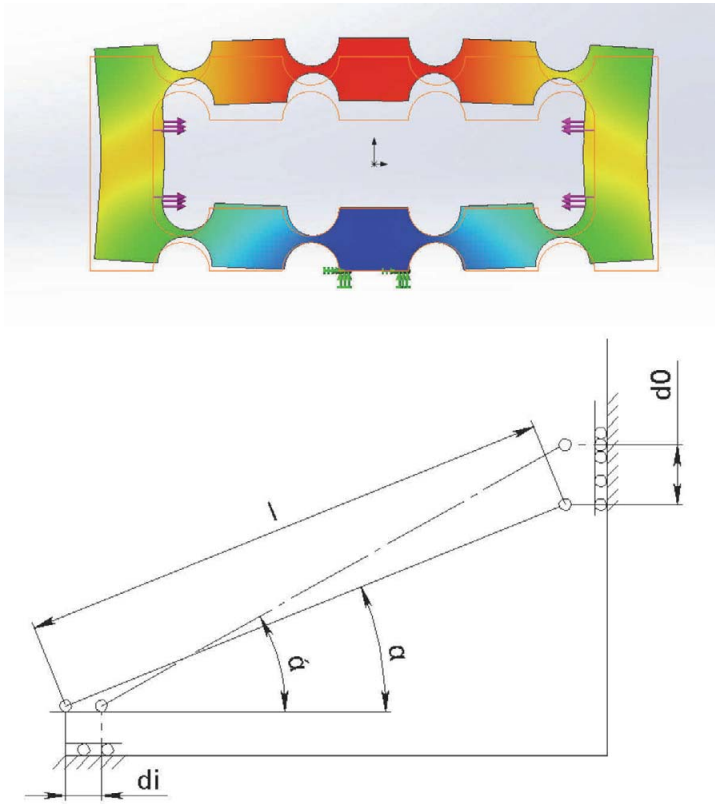


Рис. 1.5. Движение мостового механизма при сокращении размеров пьезодвигателя, вставленного внутрь

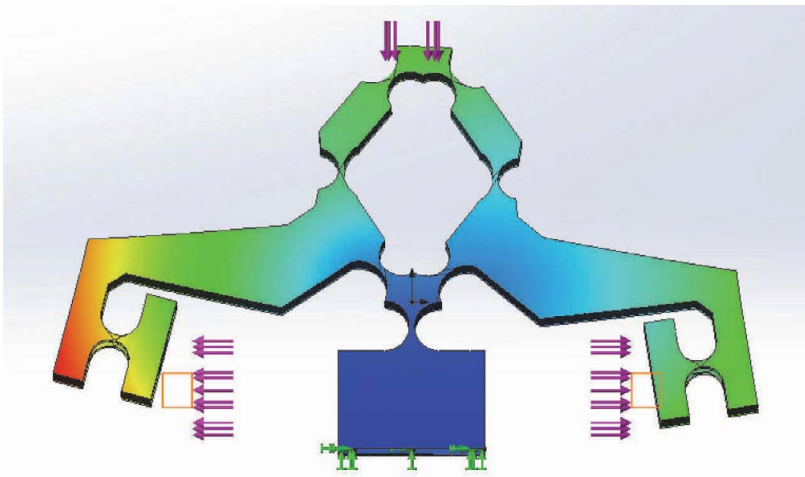


Рис. 1.6. Перемещение варианта мостового механизма, расширяющегося при увеличении размеров пьезодвигателя

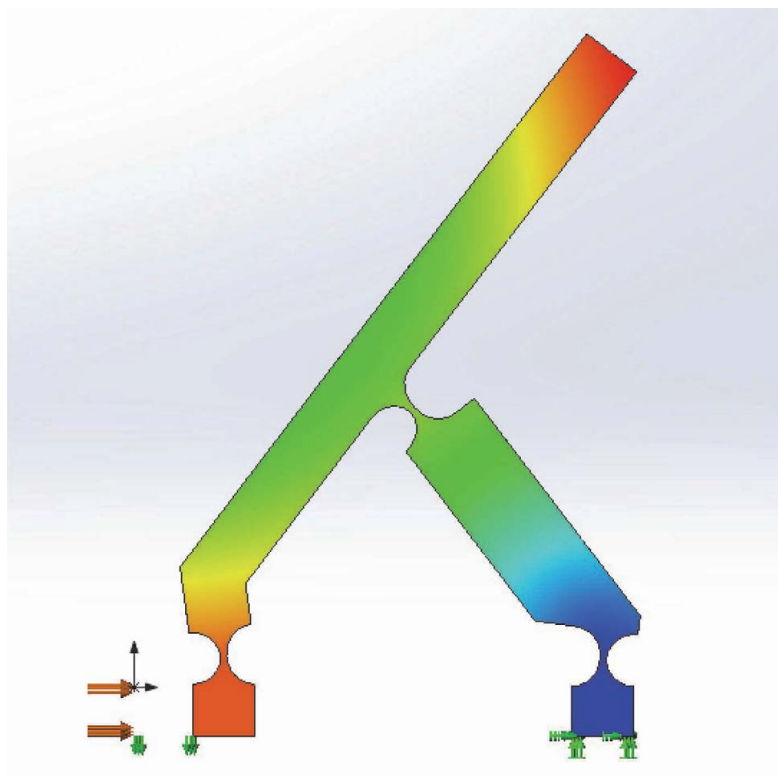


Рис. 1.7. Анализ перемещения механизма Скотта – Рассела, реализованного на гибких шарнирах

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-

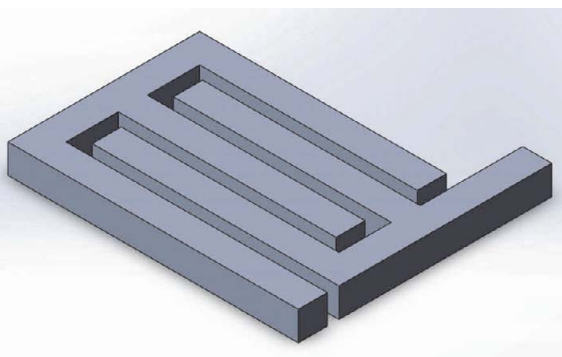


Рис. 1.8. Электростатический двигатель, выполненный из кремния, располагается на поликремниевой подложке

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.

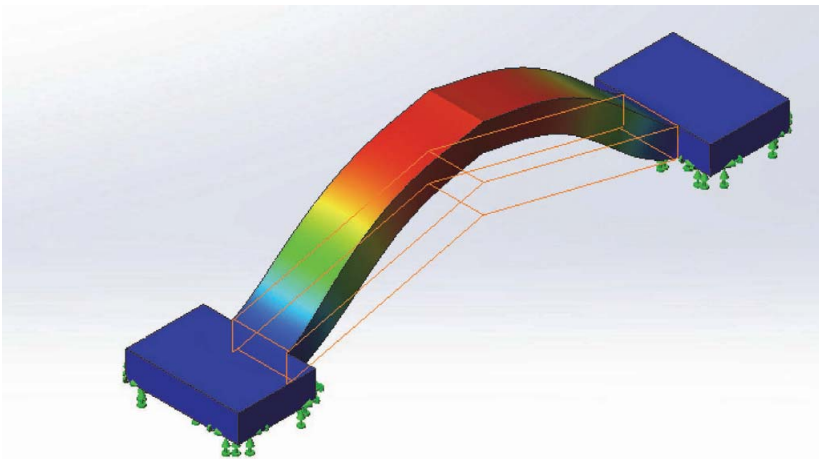


Рис. 1.9. Перемещение одной из пар стержней электротермического двигателя типа «шеvron»