

**На правах рукописи**

**ХЕЙЛО СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ  
МАНИПУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ  
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Специальность 05.02.13  
Машины, агрегаты и процессы (лёгкая промышленность)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Москва – 2014**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии» на кафедре прикладной механики

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
кафедры прикладной механики  
ФГБОУ ВПО «МГУДТ»  
**Глазунов Виктор Аркадьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
директор текстильного института  
ФГБОУ ВПО «ИГТУ»  
**Чистобородов Григорий Ильич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
прикладной механики и механотроники,  
ФГБОУ ВПО «ЮЗГУ»  
**Яцун Сергей Федорович**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой машиноведения  
ФГБОУ ВПО «СПГУТД»  
**Марковец Алексей Владимирович**

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Костромской государственный технологический университет»**

Защита диссертации состоится «24» декабря 2014 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.144.03 при Московском государственном университете дизайна и технологии по адресу: 117997, г. Москва, ул. Садовническая, д. 33, ауд. 156.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии», [www.mgudt.ru](http://www.mgudt.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.144.03  
доктор технических наук, профессор

Феоктистов Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Решение проблемы конкурентоспособности отечественной текстильной и легкой промышленности в настоящее время зависит от модернизации её ведущих предприятий, проведение которой тесно связано с внедрением современных робототехнических систем для комплексной автоматизации производства.

Качественное изменение технологических процессов и продукции предприятий текстильной и легкой промышленности, востребованной рынком, обеспечивается внедрением новых средств автоматизации технологических и вспомогательных операций, транспортно-складских систем. Автоматизация транспортных операций, должна охватывать связи не только между оборудованием, но и между технологическими комплексами и переходами. При этом необходимо учитывать, чтобы уровень автоматизации основных технологических процессов соответствовал уровню автоматизации вспомогательных и транспортных операций.

При создании роботизированных систем и комплексов в текстильной и легкой промышленности необходимо учитывать максимальную гибкость производства, необходимую для быстрых переходов на выпуск различных видов продукции на одном и том же оборудовании.

В настоящее время в состав большинства робототехнических комплексов на предприятиях текстильной и легкой промышленности входят промышленные роботы последовательной структуры с различным числом степеней свободы.

Одной из основных мировых тенденций современной робототехники является создание пространственных манипуляционных механизмов параллельной структуры. Об этом свидетельствуют большое количество научных публикаций и выступлений на международных и всероссийских конференциях.

Данный класс манипуляционных механизмов широко применяется в различных отраслях промышленности в измерительных, технологических, обрабатывающих, ориентирующих устройствах. Эти механизмы имеют особые свойства, отличающиеся от механизмов последовательной структуры. В манипуляционных механизмах параллельной структуры выходное звено соединено с основанием несколькими кинематическими цепями. Многоподвижная замкнутая кинематическая цепь механизма обеспечивает большую жесткость его конструкции, грузоподъемность и точность, что приводит к уменьшению размеров и масс подвижных звеньев. Кроме того, в таких механизмах приводы располагаются на внешней поверхности по отношению к выходному звену и кинематическим цепям, что позволяет использовать их в экстремальных средах.

Несмотря на широкое использование манипуляционных механизмов параллельной структуры в ведущих отраслях мировой и отечественной промышленности, они практически не применяются на предприятиях текстильной и легкой промышленности.

В связи с этим можно утверждать, что тема диссертации, посвящённой разработке комплексного подхода к созданию механизмов параллельной структуры различных классов для использования на предприятиях текстильной и легкой промышленности, является актуальной.

**Целью диссертации является** разработка научных и методологических основ конструирования манипуляционных механизмов параллельной структуры для плоских, вращательных, поступательных движений на основе комплексного решения проблем структурно-параметрического синтеза, кинематического и динамического анализа, разработки алгоритмов управления и анализа точности.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Анализ возможного применения механизмов параллельной структуры в робототехнических системах и комплексах предприятий текстильной и легкой промышленности с учетом особенностей их производственных процессов и на основе исследования операций.

2. Формирование принципов структурно-параметрического синтеза плоских, поступательно-направляющих и сферических механизмов параллельной структуры с тремя степенями свободы, предназначенных для использования в текстильной и легкой промышленности и разработка их классификации.

3. Разработка методологии комплексного решения задачи кинематики с учетом сингулярностей и точности.

4. Исследование динамических свойств механизмов с учетом взаимного влияния между степенями свободы на основе анализа нелинейных колебаний

5. Разработка критериев особых положений и определение собственных частот вблизи вырожденных конфигураций.

6. Разработка алгоритма управления механизмом на основе динамических свойств, в том числе при переходе через области особых положений.

7. Разработка конструкций манипуляторов, изготовление их физических моделей и проведение экспериментальное исследование с целью подтверждения работоспособности данных механизмов.

**Научную новизну работы составляют:**

1. Научные и методологические основы проектирования механизмов параллельной структуры, базирующиеся на структурно-геометрическом синтезе и анализе связей, налагаемых кинематическими цепями.

2. Ряды механизмов, разработанные на основе кинематического анализа манипуляционных механизмов параллельной структуры, с использованием дифференциальных уравнений связей и аппарата винтового исчисления.

3. Теоретические и экспериментальные исследования параметров механизмов параллельной структуры на основе критериев особых положений. Сопоставление результатов определения особых положений, полученные на основе динамического и кинематического критериев.

4. Методологические основы формирования количественной и качественной характеристик парка механизмов параллельной структуры в зависимости от функционального назначения на основе разработанной методологии анализа кинематической и динамической точности движения по заданному закону.

5. Научные основы повышения производительности механизмов параллельной структуры на базе сформированных алгоритмов управления манипулятором параллельной структуры, основанных на минимизации ошибок по положению,

скорости и ускорению, а также анализа устойчивости и точности движения по заданному закону.

6. Исследования процессов динамики манипуляционных механизмов параллельной структуры, связанные с взаимным влиянием между степенями свободы, применительно к нелинейным колебаниям.

7. Конструкции действующих моделей механизмов параллельной структуры и проведено экспериментальное исследование их характеристик.

**Теоретическая значимость** определена тем, что в работе создан комплексный подход к созданию манипуляционных механизмов параллельной структуры для плоских, вращательных, поступательно-направляющих механизмов.

**Практическая значимость** обусловлена тем, что:

- синтезированы механизмы для конкретных технических задач, выполняемых в текстильной и легкой промышленности, а также в других отраслях;
- разработан комплекс алгоритмов и программ для решения задач кинематики и динамики параллельных манипуляторов, на основании которых получены алгоритмы и программы управления этими манипуляционными механизмами;
- проведен анализ функциональных возможностей с учетом особых положений, точности данных механизмов;
- разработаны конструкции, изготовлены физические модели механизмов параллельной структуры различных классов и проведены экспериментальные исследования, подтвердившие их работоспособность;
- приведены рекомендации по проектированию механизмов.

Полученные результаты расширяют области применения данных механизмов и предназначены для их использования в текстильной легкой промышленности, а также в медицинской, космической, транспортной, обучающей, металлообрабатывающей робототехнике.

**Методология и методы исследования.**

При решении поставленных задач были использованы методы теории машин, механизмов и роботов, теоретической механики, дифференциального исчисления, матричного исчисления, аналитической и численной геометрии, методы классификации, теории автоматического управления, теории колебаний, аппарата винтового исчисления, теории точности, математического и компьютерного моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

- классификация механизмов параллельной структуры для плоских, поступательных и вращательных движений с тремя степенями свободы на основе структурно-геометрического синтеза;
- создание рядов механизмов различных классов – плоских, поступательно-направляющих, сферических;
- методика и результаты расчетов кинематических характеристик механизмов различных классов, включающие решение задач о положении, скоростях, ускорениях, точности, определение сингулярностей.
- результаты анализа динамических свойств механизмов, в том числе параметры нелинейных колебаний механизмов параллельной структуры;
- динамический критерий особых положений;

- алгоритмы управления механизмами параллельной структуры, в том числе в области особых положений;

- параметры экспериментальных моделей механизмов, их конструкций и свойств.

**Достоверность** результатов диссертации обусловлена использованием общепринятых допущений, корректностью математических выкладок и доказательств, частичной проверкой аналитических результатов путем численного и натурного экспериментов.

#### **Апробация результатов.**

Основные положения доложены и обсуждены на конференциях:

- международная научно-техническая конференция «ТЕКСТИЛЬ–2010», (2010, Москва, МГТУ им А.Н. Косыгина),

- международная научно-техническая конференция «ТЕКСТИЛЬ–2011» (2011, Москва, МГТУ им А.Н. Косыгина),

- международная научно-техническая конференция «ТЕКСТИЛЬ–2012» (2012, Москва, МГТУ им А.Н. Косыгина),

- XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и аспирантов (МИКМУС-2010) (Москва, ИМАШ РАН, 2010),

- XVII международный семинар «Технологические проблемы прочности» (2010, Подольск, МГОУ),

- XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и аспирантов (МИКМУС-2011) (Москва, ИМАШ РАН, 2011),

- Международная научно-практическая конференция «Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности» Прогресс-2013 (Иваново, ИГТА, 2013),

- X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Н. Новгород, НГУ им Н.И. Лобачевского, 2011),

- XVII симпозиум «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» (Клин, 2012),

- IX Всероссийской конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Н. Новгород, НГУ им Н.И. Лобачевского, 2012),

- 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, (Guanajuato, Mexico, 2011)

- EUCOMES 2012 – 4th European conference on mechanism science (Santander, Spain, 2012)

- 3th IFTOMM International Symposium on Robotics and Mechatronics. (Singapore, 2013),

- ROMANSY 2014 – XX CISM-IFTOMM Symposium on theory and practice of robots and manipulators. (Russia, Moscow, 2014)

Практическая значимость работы подтверждена актами апробации на текстильном предприятии ООО «Тексфо», обувной фабрики ЗАО «Парижская коммуна». Результаты в области проектирования, синтеза и разработанные алгоритмы решения задач кинематики, динамики и управления манипуляционными механизмами параллельной структуры использованы в проектах ФГБУН ФИАН им. П.Н.Лебедева РАН.

### **Публикации.**

По результатам выполненных исследований опубликовано 42 работы, в том числе 17 научных статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК, 6 научных статей в зарубежных журналах, 1 монография, 6 патентов РФ на изобретение и полезную модель.

### **Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 244 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов. Объем диссертации составляет 292 страницы, включая 141 рисунок и 8 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель исследования и определены задачи, подлежащие решению, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** посвящена робототехническим системам, используемым в настоящее время на предприятиях текстильной и легкой промышленности. Проведен анализ технологического оборудования и рассмотрены возможности применения пространственных механизмов параллельной структуры, а также методы их исследования.

Обзор и анализ научно-технической и справочной литературы показал, что автоматизация и роботизация производств текстильной и легкой промышленности осуществляется в основном с применением манипуляционных механизмов традиционной последовательной структуры. Наиболее востребованными являются механизмы, совершающие плоские, поступательно-направляющие и вращательные движения. Для выполнения большинства различных операций с полуфабрикатами и изделиями в текстильной и легкой промышленности достаточно манипуляторов с тремя степенями свободы. В случае, если необходимы дополнительные движения, то можно добавить одну степень свободы, не меняя общую конструкцию манипулятора.

Создание пространственных манипуляционных механизмов параллельной структуры является одной из тенденции развития современной робототехники. Манипуляционные механизмы параллельной структуры компактнее, проще по конструкции и дешевле аналогичных механизмов по сравнению с механизмами последовательной структуры. Они находят широкое применение в различных отраслях.

Основными задачами при исследовании пространственных механизмов параллельной структуры являются: структурный синтез, решение задачи о положениях, определение рабочего пространства манипулятора, определение скоростей, ускорений и особых положений механизма, анализ динамических свойств, задачи управления.

Исследования пространственных механизмов параллельной структуры строятся на общих методах теории механизмов и машин. Значительный вклад в теорию разработки и практику применения манипуляционных механизмов параллельной

структуры внесли отечественные и зарубежные ученые Ф.М. Диментберг, В.А. Глазунов, А.Ф. Крайнев, Ж.П. Мерле, Д. Анджелес, К. Госслен, Х. Конг, Ж.Эрве, Д. Гогу, Л. Цай, Л. Бонев, В. Аракелян и другие.

Вопросы синтеза механизмов параллельной структуры рассмотрены в трудах В.А.Глазунова, Д. Анджелеса, М. Черрикато, В. Паренти-Кастелли, Г. Гогу, К. Госслена, С. Худа, Ю. Такеда, К. Конг.

Исследования механизмов связаны с вопросами робототехники и управления, рассмотренные в работах Р.Пола, К Ханта, Д. Анджелеса, М. Чекарелли, А.А. и А.Е. Кобринских, М.З. Коловского, А.В. Слоуща, А.И. Корендясева, Б.Л. Саламандры, Л.И. Тывеса, В.С. Медведева, А.Г. Лескова, А.С. Ющенко, Е.П. Попова, А.Ф. Верещагина, С.Л. Зенкевича и ряда других авторов.

Одним из наиболее эффективных методов исследования пространственных механизмов является аппарат винтового исчисления. Теория винтов была разработана в трудах А.П. Котельникова, Д.Н. Зейлигера, П.О. Сомова, Ф.М. Диментберга, Е.И. Воробьева, А.Ф. Крайнева, В.А. Глазунова.

Важным этапом исследования механизмов параллельной структуры является классификация, развитая в трудах К. Ханта, А.Ш. Колискора, А.Ф.Крайнева, В.А.Глазунова.

На основе анализа операций выполняемых применяемыми робототехническими комплексами на предприятиях текстильной и легкой промышленности была предложена классификация механизмов параллельной структуры для плоских, поступательных и вращательных движений с различным числом кинематических пар и цепей (классификация механизмов с тремя степенями свободы приведена в таблице 1). Она проводилась с использованием разных групп винтов.

Таблица 1.

Классификация механизмов параллельной структуры, соответствующих трехчленным группам

$W$	Число соединительных цепей $k$						
3	3						
	$\underline{333}$ (111)	$\underline{663}$ (111) (210)	$\underline{563}$ (111) (210) (120) (030)	$\underline{563}$ (111) (210) (300)	$\underline{555}$ (111) (210) (300)	$\underline{633}$ (111) (210) (300)	$\underline{533}$ (111) (210) (300)
3	2						
	$\underline{33}$ (21)	$\underline{63}$ (21) (30) (12)	$\underline{53}$ (21) (12) (30)				

Предложенная классификация механизмов позволяет синтезировать манипуляционные механизмы параллельной структуры с тремя и меньшим числом степеней свободы для совершения плоских, вращательных и поступательных движений

**Вторая глава** посвящена структурному синтезу и кинематическому анализу плоских механизмов параллельной структуры.

В данном классе плоские механизмы содержат три кинематические цепи и могут совершать два поступательных движения и одно вращательное.

Методика синтеза и анализа плоского механизма параллельной структуры с тремя степенями свободы представлена на основе связей налагаемых кинематическими цепями. Рассмотрены два подхода к синтезу механизмов данного класса. В первом случае все кинематические цепи налагают одинаковые связи на движение выходного звена, связи являются повторяющимися. Другой подход заключается в том, что каждая кинематическая цепь налагает по одной связи, отбирая соответственно либо одно вращение, либо одно поступательное движение. Таким образом, эти кинематические цепи налагают три связи: два момента  $M_x$ ,  $M_y$  и силу  $R_z$ . В целом такие механизмы получаются имеющими три связи.

Структурные формулы выбираются на основе винтового исчисления и их необходимо применять для каждого конкретного случая.

Кинематический анализ рассмотрен на примере плоского механизма 3RRR, содержащим привод в каждой цепи (рис. 1).

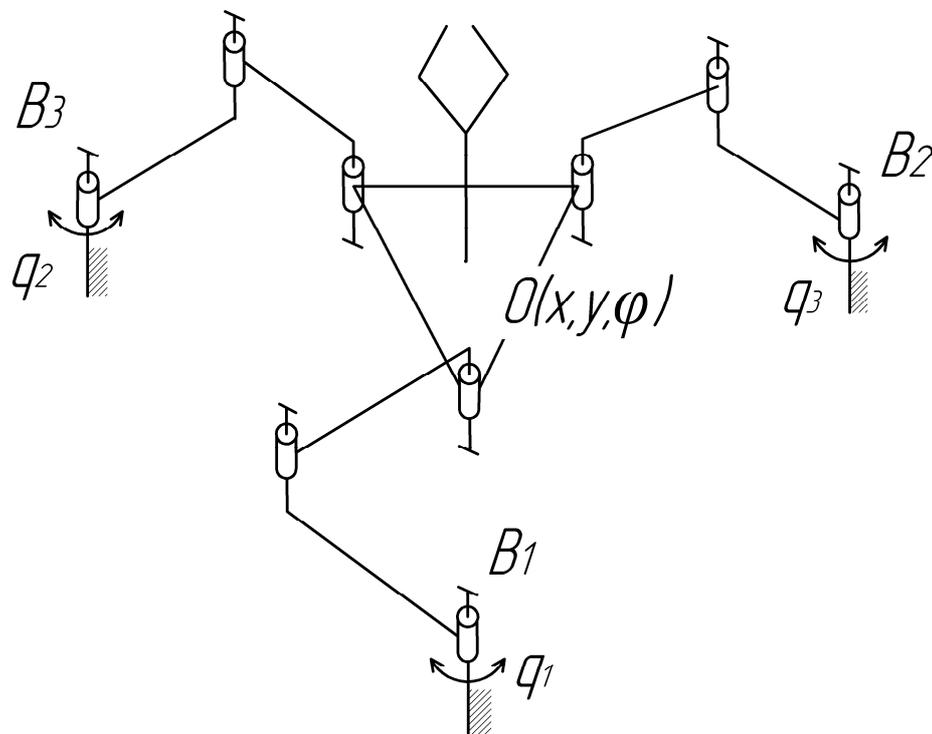


Рис. 1. Плоский механизм с тремя степенями свободы 3RRR

Для рассматриваемого механизма решена задача о положении, показывающая зависимость между координатами выходного звена т.О ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi$ ) и углами поворота входных звеньев  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ :

$$F_1 = (x + \sin\varphi - x_{B1} - l_1 \cdot \cos q_1)^2 + (y + \cos\varphi - y_{B1} - l_1 \cdot \sin q_1)^2 = 0$$

$$F_2 = \left(x - \frac{\sin\varphi}{2} + \frac{\sqrt{3}\cos\varphi}{2} - x_{B2} - l_2 \cdot \cos q_2\right)^2 + \left(y + \frac{\cos\varphi}{2} + \frac{\sqrt{3}\sin\varphi}{2} - y_{B2} - l_2 \cdot \sin q_2\right)^2 = 0$$

$$F_3 = \left(x - \frac{\sin\varphi}{2} - \frac{\sqrt{3}\cos\varphi}{2} - x_{B3} - l_3 \cdot \cos q_3\right)^2 + \left(y + \frac{\cos\varphi}{2} - \frac{\sqrt{3}\sin\varphi}{2} - y_{B3} - l_3 \cdot \sin q_3\right)^2 = 0$$

На основе полученных уравнений связи решены прямая и обратная задача о скоростях. Уравнения скоростей (метод Анжелеса-Госслена) представлены в общем виде:

$$\mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = -\mathbf{B} \cdot \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix}$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица частных производных  $F_i(x, y, \varphi, q_1, q_2, q_3)$  по  $x, y, \varphi$ ;  $\mathbf{B}$  – матрица частных производных по обобщенным координатам  $q_i$ ,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y} & \frac{\partial F_1}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y} & \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y} & \frac{\partial F_3}{\partial \varphi} \\ x & y & \varphi \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F_2}{\partial q_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_3}{\partial q_3} \end{pmatrix}.$$

Также задача о скоростях решена с использованием аппарата винтового исчисления. Винтовое уравнение для механизма в целом имеет вид:

$$\begin{aligned} e_{1x} V_x + e_{1y} V_y + e_{1z}^0 \omega_z &= e_{1x} V_{11x} + e_{1y} V_{11y} + e_{1z}^0 \omega_{11z}; \\ e_{2x} V_x + e_{2y} V_y + e_{2z}^0 \omega_z &= e_{2x} V_{21x} + e_{2y} V_{21y} + e_{2z}^0 \omega_{21z}; \\ e_{3x} V_x + e_{3y} V_y + e_{3z}^0 \omega_z &= e_{3x} V_{31x} + e_{3y} V_{31y} + e_{3z}^0 \omega_{31z} \end{aligned}$$

Где  $e_{1x}, e_{1y}, e_{2x}, e_{2y}, e_{3x}, e_{3z}$  – плюккеровы координаты единичных векторов силовых винтов.

Винтовое уравнение может быть составлено и для каждой цепи:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{11} + \omega_{12} + \omega_{13}; \\ V_x &= \rho_{11y} \omega_{11} + \rho_{12y} \omega_{12} + \rho_{13y} \omega_{13}; \\ V_y &= -\rho_{11x} \omega_{11} - \rho_{12x} \omega_{12} - \rho_{13x} \omega_{13} \end{aligned}$$

где  $\rho_{ijx}, \rho_{ijy}$  – координаты единичных векторов кинематических винтов

Решения прямой и обратной задачи о скоростях двумя подходами дают одинаковые результаты.

Полученные результаты можно использовать для анализа особых положений, в которых либо теряется подвижность в приводах и наблюдается неуправляемое движение выходного звена, либо уменьшается число степеней свободы.

Эти особые положения двух типов определены с применением аппарата винтового исчисления. Особые положения 1-го типа определяются

вырожденностью матрицы, составленной из координат кинематических винтов  $i$  – кинематической цепи механизма:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \rho_{11y} & \rho_{12y} & \rho_{13y} \\ \rho_{11x} & \rho_{12x} & \rho_{13x} \end{pmatrix}$$

Особые положения 2-го типа определяются по потере ранга матрицы, составленной из координат силовых винтов, взаимных кинематическим винтам пассивных пар каждой кинематической цепи:

$$\begin{pmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z}^0 \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{pmatrix}.$$

При исследовании свойств матриц Якоби **A** и **B** вырожденность матрицы **B** (определитель равен нулю) указывает на наличие особого положения 1-го типа (потеря степени свободы выходным звеном), вырожденность матрицы **A** – особого положения 2-го типа (неуправляемое движение выходного звена).

Приведенные подходы показали идентичность результатов определения особых положений.

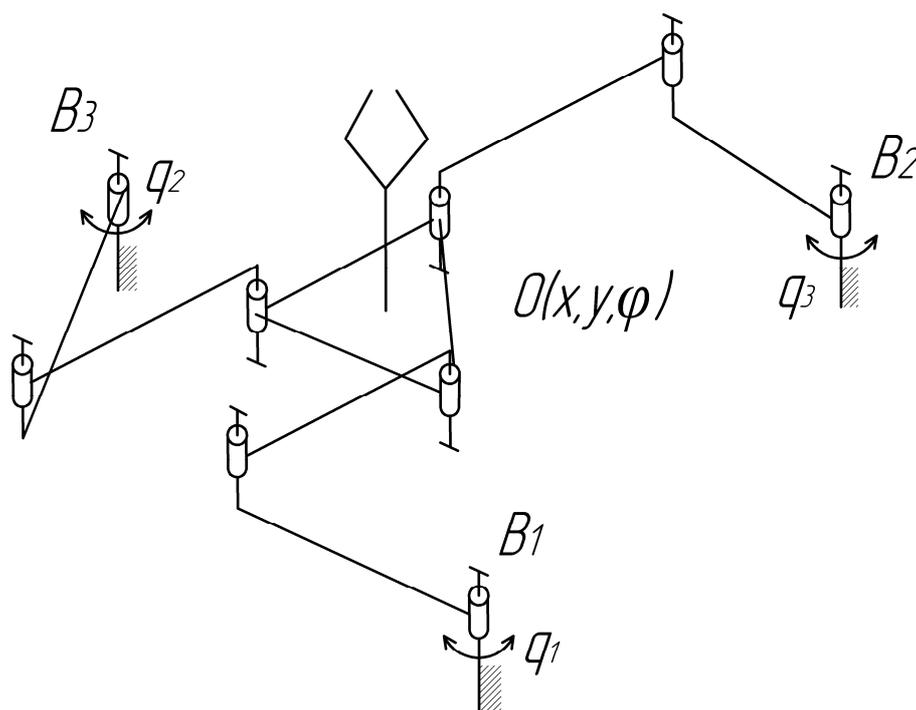


Рис. 2. Особое положение механизма

Используя решение обратной задачи о положении определены формы и размеры рабочего пространства. Показано, что размеры рабочего пространства зависят от длин всех промежуточных звеньев каждой кинематической цепи. Размеры рабочей зоны представлены на рис.3.

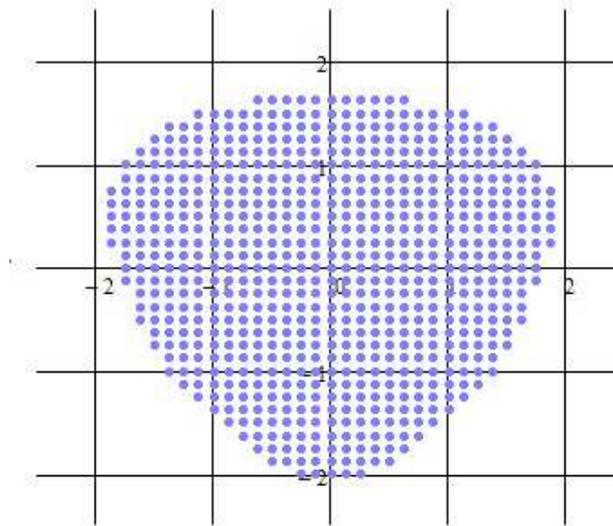


Рис. 3. Рабочая зона механизма

**В третьей главе** рассмотрен структурный синтез, принципы построения и кинематический анализ поступательно-направляющих механизмов с тремя степенями свободы.

Показано, что в основе построения таких манипуляторов положены два подхода синтеза поступательно-направляющих механизмов либо каждая кинематическая цепь налагает одинаковые связи либо каждая цепь налагает по одной связи – момент.

Кинематическая цепь в поступательно-направляющем механизме может содержать вращательные пары, поступательные или поступательные и вращательные. Поступательная пара может быть выполнена в виде шарнирного параллелограмма. Кинематическая цепь может содержать:

- три кинематические пары PPP, PaPP;
- четыре кинематические пары PaPaRR, RPPR, RRRP;
- пять кинематических пар RPRRR, RRRRR, UPU.

Кинематический анализ проведен на механизме 3PPaPa, содержащем по три поступательные пары в каждой цепи, причем две поступательные пары выполнены в виде шарнирного параллелограмма (рис.4).

Решение задачи о положении представлено в виде:

$$\begin{cases} F_1 = q_1 - x_0 - l_3 - l_2 \cos\left(-\arcsin \frac{y_0}{l_2}\right) - l_1 \cos\left(\arcsin \frac{z_0}{l_1}\right) = 0; \\ F_2 = q_2 - y_0 - l_3 - l_2 \cos\left(-\arcsin \frac{z_0}{l_2}\right) - l_1 \cos\left(\arcsin \frac{x_0}{l_1}\right) = 0; \\ F_3 = q_3 - z_0 - l_3 - l_2 \cos\left(-\arcsin \frac{x_0}{l_2}\right) - l_1 \cos\left(\arcsin \frac{y_0}{l_1}\right) = 0. \end{cases}$$

где  $q_1, q_2, q_3$  - обобщенные координаты,  $x_0, y_0, z_0$  - абсолютные координаты,  $l_i$  - длины звеньев

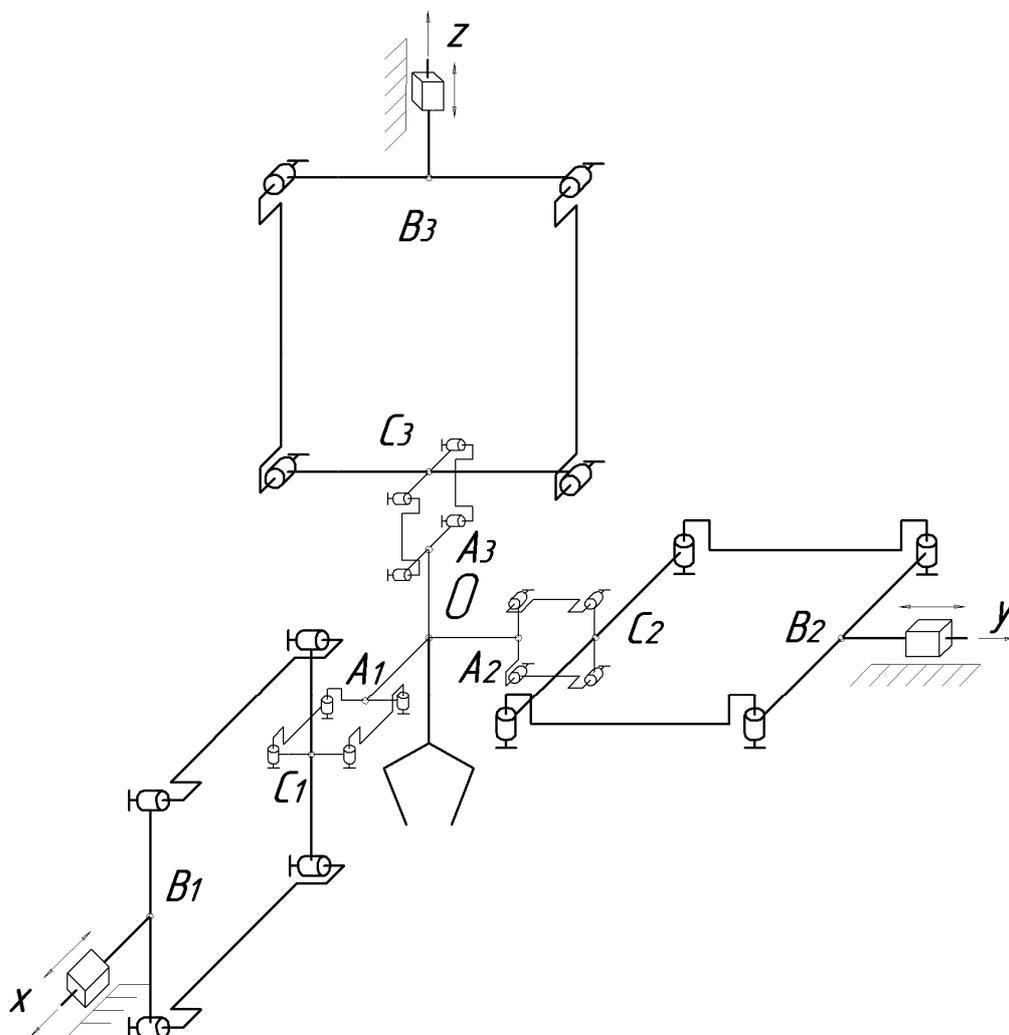


Рис. 4. Поступательно-направляющий механизм ЗРРар

Задача о скоростях решена двумя методами: дифференцированием уравнений связей и использованием аппарата винтового исчисления. В первом подходе уравнения скоростей, связывающем скорости выходного звена  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , и скорости входных звеньев  $V_{11}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{31}$  имеют вид:

$$\mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = -\mathbf{B} \cdot \begin{pmatrix} V_{11} \\ V_{21} \\ V_{31} \end{pmatrix}$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица частных производных функции  $F_i$  по  $x_0, y_0, z_0$ ;  $\mathbf{B}$  – матрица частных производных функции  $F_i$  по обобщенным координатам  $q_1, q_2, q_3$ .

При винтовом исчислении система уравнений относительных моментов для трех кинематических цепей будет иметь вид:

$$V_x \cdot r_{1x} + V_y \cdot r_{1y} + V_z \cdot r_{1z} = V_{11} \cdot (r_{1x} + r_{1y} + r_{1z});$$

$$V_x \cdot r_{2x} + V_y \cdot r_{2y} + V_z \cdot r_{2z} = V_{21} \cdot (r_{2x} + r_{2y} + r_{2z});$$

$$V_x \cdot r_{3x} + V_y \cdot r_{3y} + V_z \cdot r_{3z} = V_{31} \cdot (r_{3x} + r_{3y} + r_{3z}).$$

где  $r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}$  – плюккеровы координаты силового винта.

Решение уравнений позволяет решить прямую и обратную задачи о скоростях.

Винтовой подход позволяет определить скорости во всех шарнирах каждой цепи:

$$\begin{aligned} V_x &= e_{i1x} \cdot V_{Bi} + e_{i2x} \cdot V_{Ci} + e_{i3x} \cdot V_{Ai}; \\ V_y &= e_{i1y} \cdot V_{Bi} + e_{i2y} \cdot V_{Ci} + e_{i3y} \cdot V_{Ai}; \\ V_z &= e_{i1z} \cdot V_{Bi} + e_{i2z} \cdot V_{Ci} + e_{i3z} \cdot V_{Ai} \end{aligned}$$

где  $e_{i1x}$ ,  $e_{i1y}$ ,  $e_{i1z}$  – координаты единичных векторов кинематических винтов первой цепи.

Особые положения механизма исследованы на основе уравнений силовых и кинематических винтов. Исследование свойств матрицы, составленной из координат силовых винтов позволяет определить особые положения механизма 2-го типа, а матрицы, составленной из координат кинематических винтов – особые положения 1-го типа. Особые положения при исследовании свойств матриц А и В не выявляются.

Расчетное обоснование точности – одна из основных задач при создании механизмов. При этом задача о положении задается функцией в неявном виде:

$$F_i = (l_i, x, y, z, q_i), \quad i=1, \dots, 3$$

где  $l_i$  – длины входных звеньев

Решая эти уравнения и учитывая, что приращения в приводах равны нулю, можно определить приращения  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ . Отклонения выходных координат, обусловленные геометрическими погрешностями изготовления, определены с применением линейной теории точности и определяются по следующим зависимостям:

$$\delta x = - \frac{A \frac{\partial F_2}{\partial y} \frac{\partial F_3}{\partial z} - B \frac{\partial F_1}{\partial y} \frac{\partial F_3}{\partial z} + C \frac{\partial F_1}{\partial y} \frac{\partial F_2}{\partial z} - C \frac{\partial F_1}{\partial z} \frac{\partial F_2}{\partial y} - A \frac{\partial F_2}{\partial z} \frac{\partial F_3}{\partial y} + B \frac{\partial F_1}{\partial z} \frac{\partial F_3}{\partial y}}{\frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial F_2}{\partial x} \frac{\partial F_3}{\partial x} - \frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial F_2}{\partial y} \frac{\partial F_3}{\partial y} - \frac{\partial F_2}{\partial y} \frac{\partial F_2}{\partial z} \frac{\partial F_3}{\partial x} + \frac{\partial F_1}{\partial y} \frac{\partial F_2}{\partial y} \frac{\partial F_3}{\partial z} - \frac{\partial F_1}{\partial z} \frac{\partial F_2}{\partial x} \frac{\partial F_3}{\partial z} + \frac{\partial F_1}{\partial z} \frac{\partial F_2}{\partial z} \frac{\partial F_3}{\partial y}}$$

где  $A, B, C$  – коэффициенты.

Аналогично рассчитываются отклонения  $\delta y$ ,  $\delta z$ .

Результаты сопоставлены с расчетами, полученными с применением нелинейной точности. Ошибка положения выходного звена, полученная с использованием линейной теории точности, совпадает с результатами, полученными с расчетами, основанными на нелинейной теории точности.

**В четвертой главе** рассмотрен синтез, кинематический анализ сферических механизмов с тремя степенями свободы.

Структурно-параметрический синтез сферических механизмов проводился на основе структурных формул. Показано, что сферические механизмы строятся по принципам, когда каждая кинематическая цепь налагает одинаковые связи, либо каждая цепь налагает по одной связи – силе.

Кинематическая цепь может содержать:

- три вращательные пары, налагающие по три связи: RRR, RU;
- четыре вращательных пары: UPU;
- пять вращательных пар, налагающих по одной связи: RRRRR, RRRU, URU.

Кинематические свойства сферических механизмов исследованы на примере механизма 3RRRRR и эквивалентного ему механизма 3RRR.

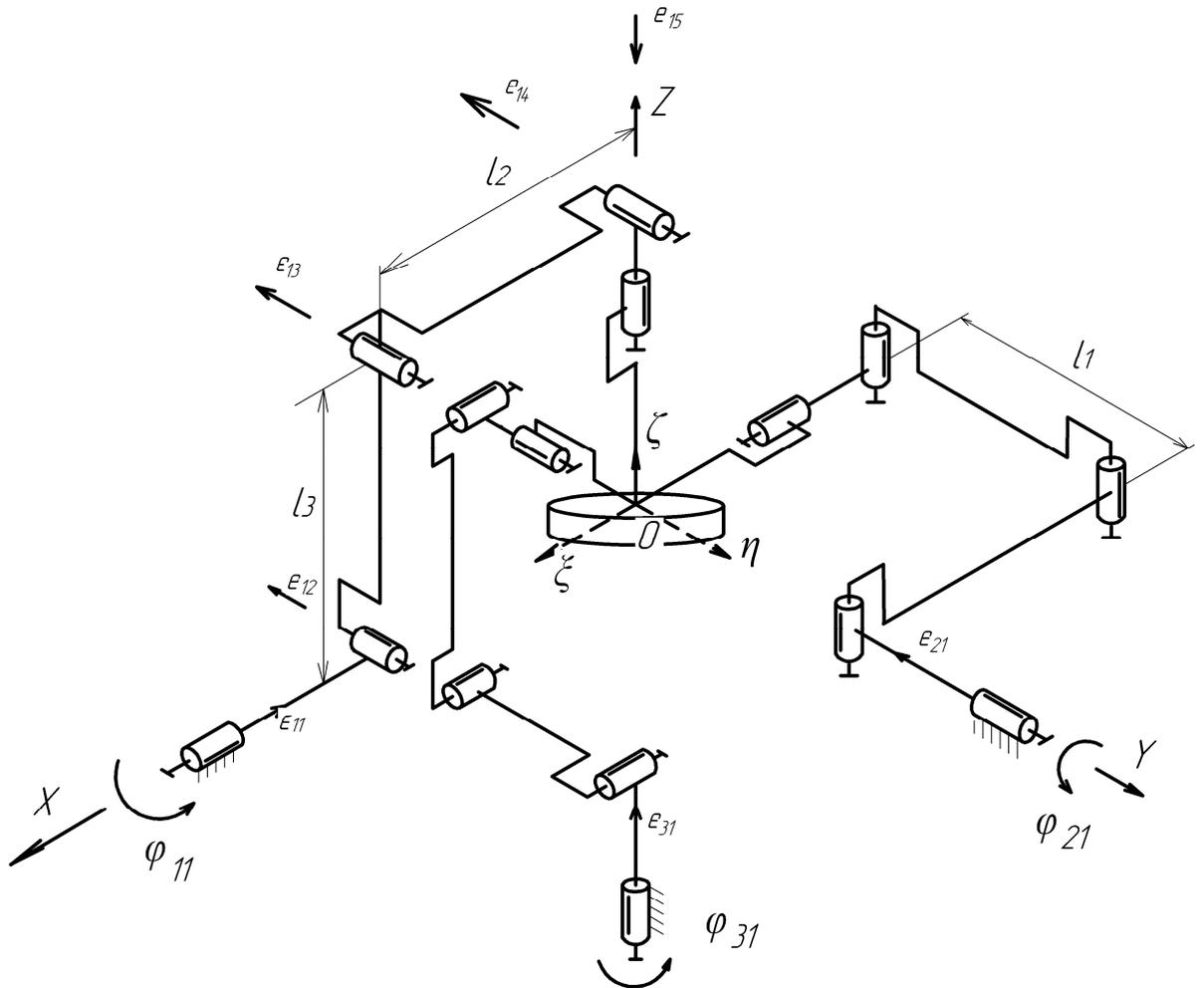


Рис. 5. Сферический механизм с пятью вращательными парами 3RRRRR.

Задача о положении, связывающая входные координаты  $\varphi_{11}$ ,  $\varphi_{21}$ ,  $\varphi_{31}$  и выходные  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  имеет вид:

$$\begin{cases} F_1 = \operatorname{tg}\varphi_{11} - \frac{\cos\gamma \cdot \sin\gamma \cdot \sin\beta + \cos\gamma \cdot \sin\alpha}{\cos\alpha \cdot \cos\beta} = 0; \\ F_2 = \frac{\sin\beta}{\cos\gamma \cdot \cos\beta} - \operatorname{tg}\varphi_{21} = 0; \\ F_3 = \frac{\cos\gamma \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha - \cos\alpha \cdot \sin\gamma}{\cos\alpha \cdot \cos\gamma + \sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma} + \operatorname{tg}\varphi_{31} = 0. \end{cases}$$

Показано, что сферический механизм с пятью кинематическими парами в каждой кинематической цепи может быть заменен эквивалентным с тремя кинематическими парами в каждой цепи.

Показана применимость двух подходов решения задачи о скоростях и особых положениях. Уравнения скоростей, связывающие входные скорости  $\omega_{11}$ ,  $\omega_{21}$ ,  $\omega_{31}$  и выходные  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  (метод дифференцирования уравнений связей) имеет вид:

$$\mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = -\mathbf{B} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \end{pmatrix}$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица частных производных функции  $F_i$  по  $\alpha, \beta, \gamma$ ;  $\mathbf{B}$  – матрица частных производных функции  $F_i$  по обобщенным координатам  $\varphi_{11}, \varphi_{21}, \varphi_{31}$ .

При использовании аппарата винтового исчисления, уравнения скоростей представлены в виде:

$$\begin{aligned} \omega_x r_{1x}^0 + \omega_y r_{1y}^0 + \omega_z r_{1z}^0 &= \omega_{11} (x_{11} r_{1x}^0 + y_{11} r_{1y}^0 + z_{11} r_{1z}^0); \\ \omega_x r_{2x}^0 + \omega_y r_{2y}^0 + \omega_z r_{2z}^0 &= \omega_{21} (x_{21} r_{2x}^0 + y_{21} r_{2y}^0 + z_{21} r_{2z}^0); \\ \omega_x r_{3x}^0 + \omega_y r_{3y}^0 + \omega_z r_{3z}^0 &= \omega_{31} (x_{31} r_{3x}^0 + y_{31} r_{3y}^0 + z_{31} r_{3z}^0), \end{aligned}$$

где -  $r_{ix}^0, r_{iy}^0, r_{iz}^0$  - координаты моментной части силового винта  $\mathbf{r}_i$

Также винтовым методом можно определить скорости в отдельной цепи и решить обратную задачу. Так например, для  $i$ -й кинематической цепи уравнения скоростей имеют вид:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \omega_{ij} \cdot x_{ij} + \omega_{ij} \cdot x_{ij} + \omega_{ij} \cdot x_{ij} \\ \omega_y &= \omega_{ij} \cdot y_{ij} + \omega_{ij} \cdot y_{ij} + \omega_{ij} \cdot y_{ij} \\ \omega_z &= \omega_{ij} \cdot z_{ij} + \omega_{ij} \cdot z_{ij} + \omega_{ij} \cdot z_{ij} \end{aligned}$$

где  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$  – координаты единичного вектора кинематического винта,  $j=1, \dots, 3$   
 Особые положения 2-го типа выявлены винтовым исчислением исследованием матрицы, составленной из координат силового винта, а положения 1-го типа выявляются матрицей, составленной их координат кинематического винта (рис.6).

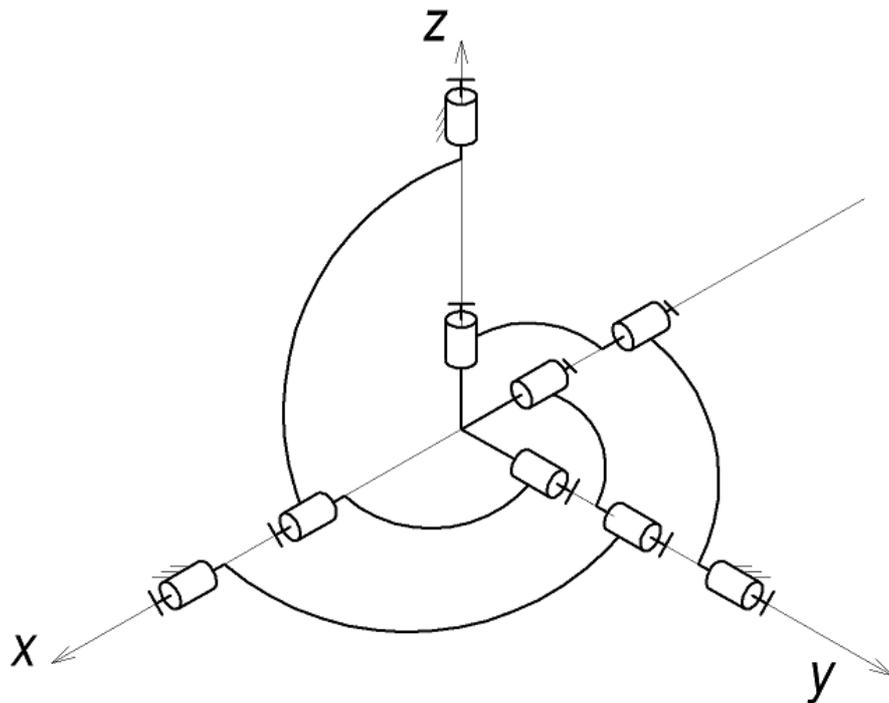


Рис. 6. Особые положения механизмов

При определении геометрической точности механизма в задаче о положении вводится дополнительная переменная. При этом уравнения связей описываются в виде:

$$F_i(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_{11}, \varphi_{21}, \varphi_{31}, \theta_{i1}, \theta_{i2})$$

где  $\theta_{i1}, \theta_{i2}$  – угол между осями кинематических пар (в рассмотренных задачах кинематики и динамики эти углы принимались равными  $90^\circ$ ).

Отклонения выходного звена по углу  $\alpha$  описывается уравнением:

$$\delta\alpha = \frac{\frac{\partial F_1}{\partial \beta} \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} W_3 - \frac{\partial F_1}{\partial \beta} \frac{\partial F_3}{\partial \gamma} W_2 - \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \frac{\partial F_2}{\partial \beta} W_3 + \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \frac{\partial F_3}{\partial \beta} W_2 + \frac{\partial F_2}{\partial \beta} \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} W_1 - \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} \frac{\partial F_3}{\partial \beta} W_1}{\frac{\partial F_1}{\partial \alpha} \frac{\partial F_2}{\partial \beta} \frac{\partial F_3}{\partial \gamma} - \frac{\partial F_1}{\partial \beta} \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} \frac{\partial F_3}{\partial \beta} - \frac{\partial F_1}{\partial \beta} \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} \frac{\partial F_3}{\partial \gamma} + \frac{\partial F_1}{\partial \beta} \frac{\partial F_3}{\partial \alpha} \frac{\partial F_2}{\partial \gamma} + \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \frac{\partial F_3}{\partial \beta} - \frac{\partial F_1}{\partial \gamma} \frac{\partial F_2}{\partial \beta} \frac{\partial F_3}{\partial \alpha}};$$

где  $W_1, W_2, W_3$  – коэффициенты.

Аналогично рассчитываются отклонения  $\delta\beta, \delta\gamma$ .

В **пятой** главе рассмотрены вопросы динамического анализа плоского, поступательно-направляющего и сферического манипуляционных механизмов параллельной структуры.

Обеспечение устойчивости равновесия манипуляторов параллельной структуры является одной из важнейших задач, решаемых при проектировании грузоподъемных механизмов данного класса.

Уравнения движения манипулятора с тремя степенями свободы будет описываться системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}, i=1, \dots, 3.$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $\Pi$  – потенциальная энергия системы.

Используя полученные уравнения связей и скоростей, предложен аналитический метод и алгоритм определения собственных частот колебаний манипуляционных механизмов параллельной структуры.

Частные решения дифференциального уравнения определяется в виде:

$$q_i = A_i \cdot \sin \omega t.$$

Это частное решение после подстановки в дифференциальное уравнение движения позволяет получить частотное уравнение в виде:

$$\begin{vmatrix} c_1 - a_1 \cdot \omega^2 & m_1 \cdot \omega^2 & m_2 \cdot \omega^2 \\ m_1 \cdot \omega^2 & c_2 - a_2 \cdot \omega^2 & m_3 \cdot \omega^2 \\ m_2 \cdot \omega^2 & m_3 \cdot \omega^2 & c_3 - a_3 \cdot \omega^2 \end{vmatrix} = 0$$

где  $c_i$  – жесткость цепи,  $a_i, m_i$  – коэффициенты

Решением частотного уравнения являются значения собственных частот колебаний.

Кроме того, в результате численного решения определены частота и амплитуда свободных колебаний механизма на основе уравнений Даламбера-Лагранжа, приведенные на рис.7.

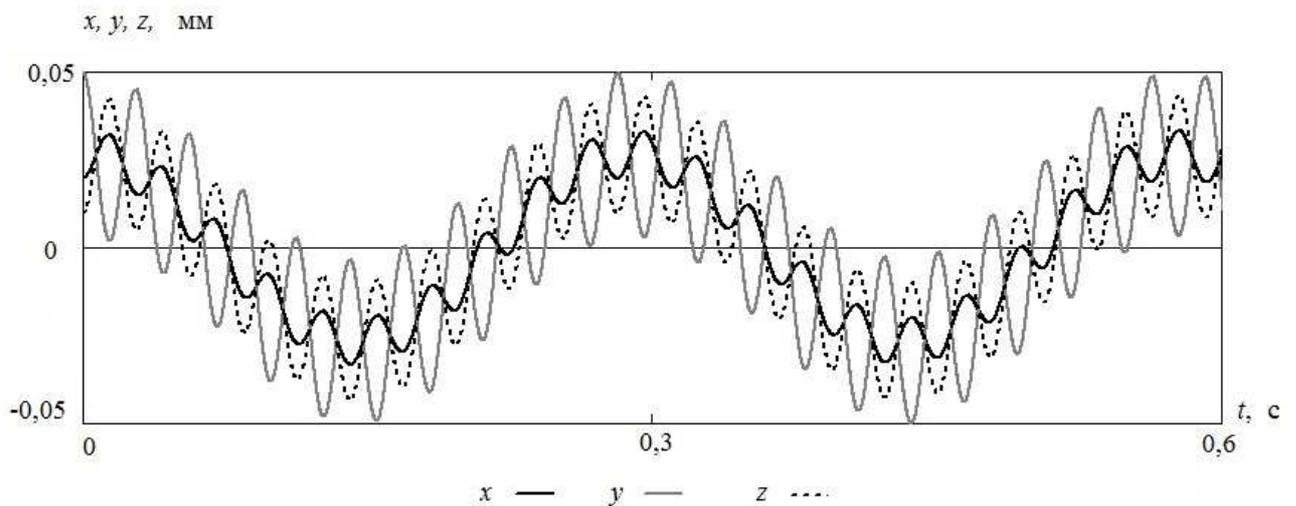


Рис. 7. График изменения координат выходного звена,  $x, y, z$

Задача определения собственных частот была решена для того, чтобы сформировать еще один критерий особых положений – динамический. В некоторых случаях кинематического критерия может быть не достаточно. Так при приближении к особым положениям могут возникнуть нежелательные эффекты (распределение масс, распределение жесткостей). Предложенный частотный критерий, показывает, что при приближении к особым положениям частота начинает уменьшаться в десятки и сотни, что связано с уменьшением жесткости.

Нелинейность механической системы обусловлена ее геометрией и взаимосвязанностью приводов. Влияние между степенями свободы и приводов приводит к появлению нелинейных явлений в динамике механизмов. Получены законы изменения координат выходного звена для нелинейных колебаний, что может быть учтено при управлении устройством.

Возбуждение колебаний по одной по одной из координат приводит к появлению колебаний по другим координатам, что связано с взаимным влиянием степеней свободы. Собственные колебания нелинейной системы описываются процессами типа биения, это связано с тем, что энергия переходит от одной координаты к другой. На примере поступательно-направляющего механизма приведены графики изменения координат выходного звена (рис. 8).

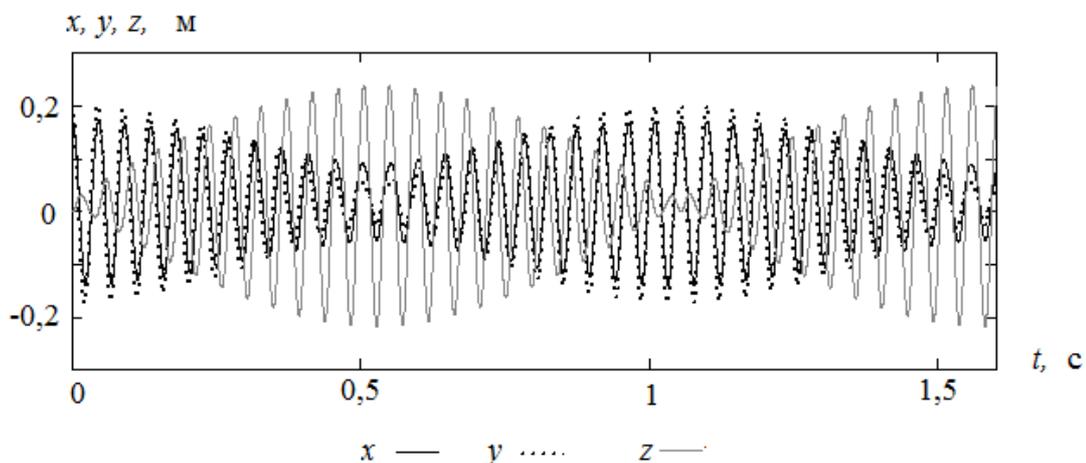


Рис. 8. Графики изменения координат выходного звена  $x, y, z$

В **шестой главе** рассмотрены алгоритмы управления механизмами параллельной структуры. Предложенные алгоритмы реализованы на плоском, поступательно-направляющем и сферических механизмах.

Алгоритм управления механизмами параллельной структуры основан на минимизации ошибки по положению, скорости, ускорению. Приводом являлся двигатель постоянного тока. При заданном законе движения  $x_T(t)$ ,  $y_T(t)$ ,  $z_T(t)$  в должна обеспечиваться минимизация ошибки по координате:  $\Delta_i(t)$ , по скорости  $\dot{\Delta}_i(t)$ , по ускорению  $\ddot{\Delta}_i(t)$ , определяемые как разность между желаемым фактическим значениями. Закон изменения ошибки соответствует колебательному звену:

$$\tau_i^2 \ddot{\Delta}_i + 2\zeta_i \tau_i \cdot \dot{\Delta}_i + \Delta_i = 0$$

При этом обеспечивается устойчивость и минимизация ошибки по положению, скорости и ускорения. Закон изменения ускорения имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{x}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{x}_T - \dot{x}) + \gamma_0 \cdot (x_T - x) \\ \ddot{y} &= \ddot{y}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + \gamma_0 \cdot (y_T - y) \\ \ddot{z} &= \ddot{z}_T + \gamma_1 \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + \gamma_0 \cdot (z_T - z) \end{aligned}$$

Требуемые усилия в приводах могут быть найдены подстановкой ускорений в уравнения движения:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{A}(\mathbf{q}) \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \cdot \dot{\mathbf{q}}_i, i=1, \dots, n$$

Уравнения движения поступательно-направляющим механизмом с тремя степенями свободы, используя принцип возможных перемещений, имеет вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_1} \delta q_1 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_1} \delta q_1 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_1} \delta q_1 + mg \frac{\partial z}{\partial q_1} \delta q_1 + m_1 \ddot{q}_1 + P_1 \delta q_1 &= 0 \\ m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_2} \delta q_2 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_2} \delta q_2 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_2} \delta q_2 + mg \frac{\partial z}{\partial q_2} \delta q_2 + m_2 \ddot{q}_2 + P_2 \delta q_2 &= 0; \\ m\ddot{x} \frac{\partial x}{\partial q_3} \delta q_3 + m\ddot{y} \frac{\partial y}{\partial q_3} \delta q_3 + m\ddot{z} \frac{\partial z}{\partial q_3} \delta q_3 + mg \frac{\partial z}{\partial q_3} \delta q_3 + m_3 \ddot{q}_3 + P_3 \delta q_3 &= 0 \end{aligned}$$

где  $m_1, m_2, m_3$  – масса входных звеньев соответствующих цепей,  $m$  – масса выходного звена,  $P_1, P_2, P_3$  – силы в приводах,  $\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3$  – ускорения в приводах.

Без учета обратных связей происходит нарастание ошибки по положению. Поэтому необходимо построение управления движением механизма с введением обратных связей по положению и скорости. Отклонения значений обобщенных координат, зависят от начальных возмущений.

Так, при заданном законе движения и времени переходного процесса:

$$x_T(t) = 0,1 \cdot \sin(\omega t), y_T(t) = 0,12 \cdot \sin(\omega t), z_T(t) = 0,15 \cdot \sin(\omega t), t=0,06 \text{ с.}$$

определены значения ошибки положения выходного звена и усилия в приводах (рис 9).

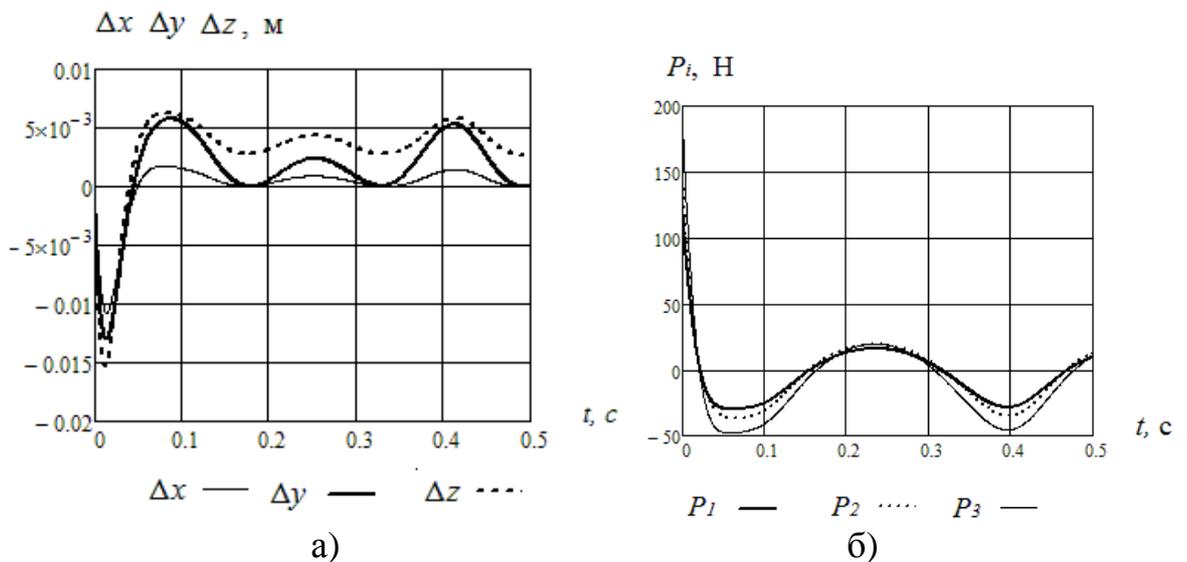


Рис. 9. График изменения  
 а – ошибки координаты. б – моментов в приводах

Важным вопросом является динамическая точность, в частности, как влияет отклонение реального механизма от модели.

Рассмотрено влияние отклонения массы входных звеньев механизма от массы модели. Показано, что массой входных звеньев можно пренебречь.

Работоспособность алгоритма управления проверялась в случае, когда масса выходного звена механизма не совпадает с массой модели.

Ошибка положения в случаях несовпадения массы входных и выходных звеньев составляет не более 3%. График изменения ошибки положения показан на рис.10, 11.

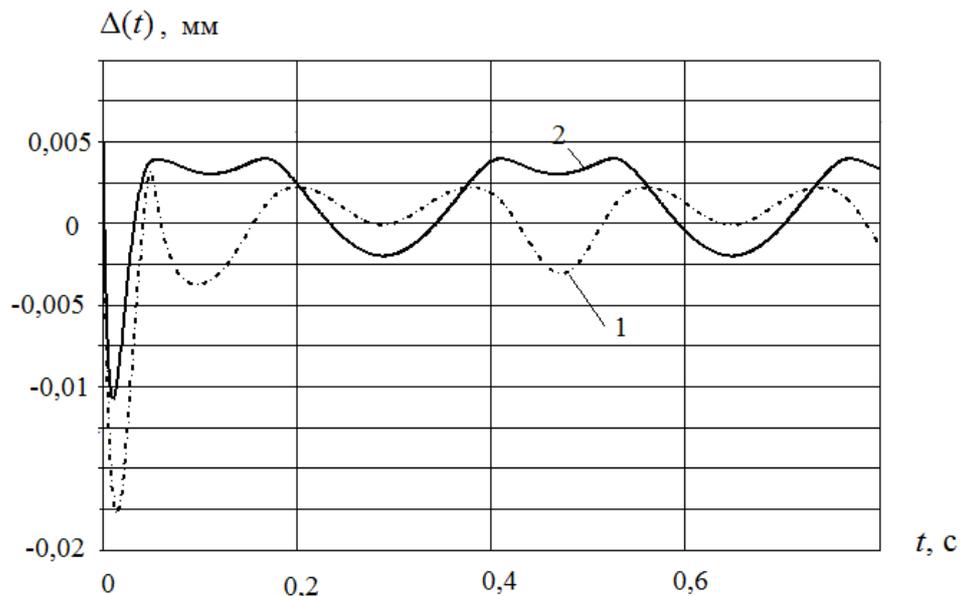


Рис. 10. Ошибка позиционирования:  
 1 – массы входных звеньев модели и механизма различны,  
 2 – массы входных звеньев модели и механизма равны

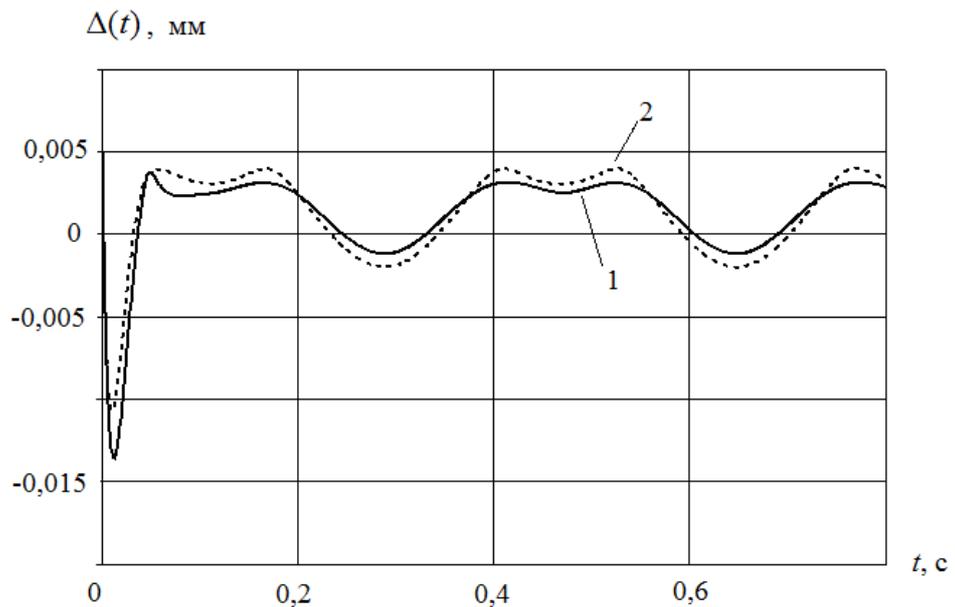


Рис. 11. Ошибки позиционирования:

- 1 - массы выходных звеньев модели и механизма равны,
- 2 - массы выходных звеньев модели и механизма различны

Также было рассмотрено влияние отклонения геометрических параметров механизма (на примере длины входных звеньев) на точность позиционирования. Ошибка составляет не более 3% (рис.12).

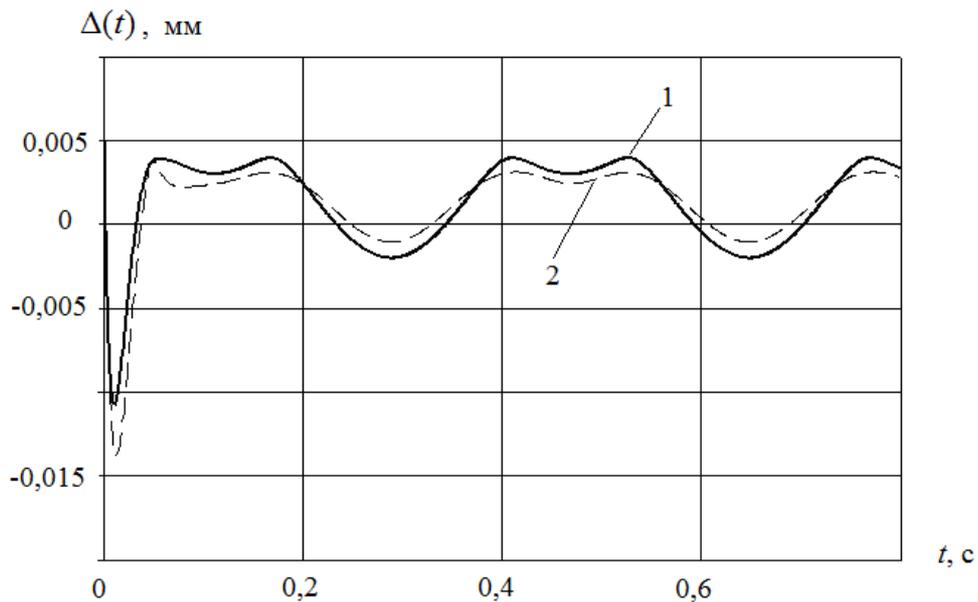
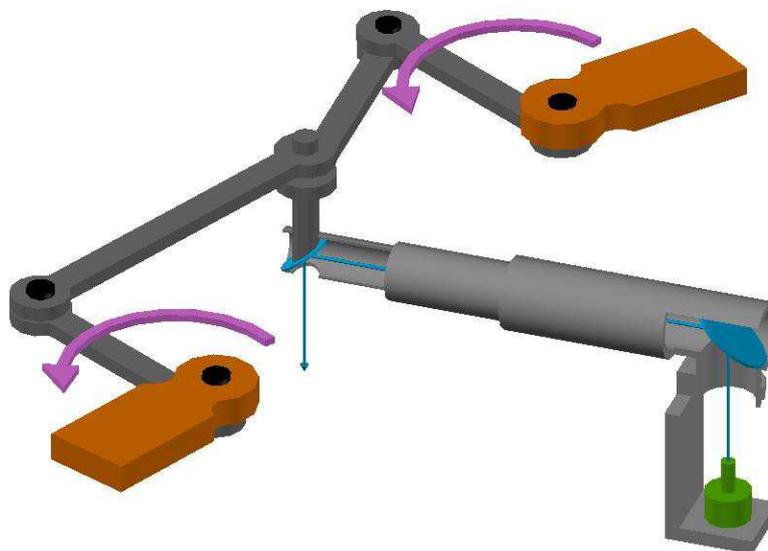


Рис. 12. Ошибка позиционирования при несовпадении длины звена  $L$ :

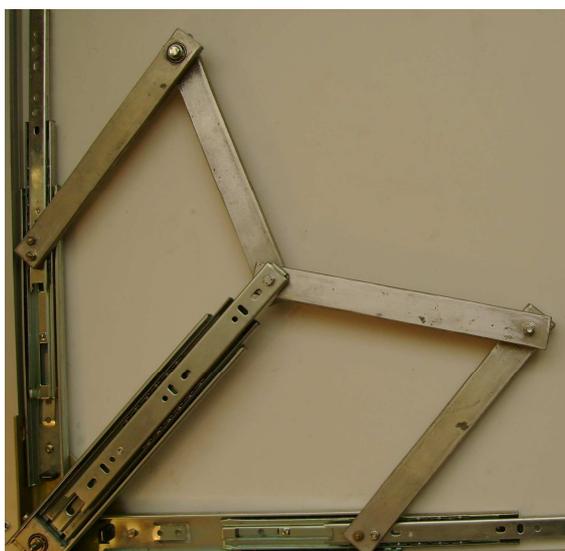
- 1 – длины звеньев модели и механизма равны,
- 2 - длины звеньев модели и механизма различны

На основе численного моделирования движения механизма параллельной структуры по заданной траектории проверена эффективность разработанного алгоритма оптимального управления для механизмов различных классов.

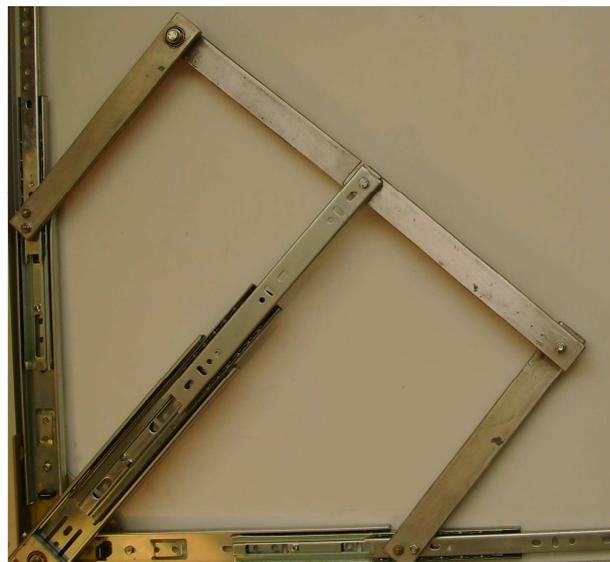
Этот алгоритм апробирован также на механизме параллельной структуры при пересечении особых положений. Данная задача решалась на примере плоского механизма с двумя степенями свободы с двумя кинематическими цепями в каждой цепи (рис. 13).



а)



б)



в)

Рис. 13. Плоский механизм с двумя степенями свободы:  
а - схема механизма, б - конструкция механизма, в - особое положение механизма

Показано, что при приближении к особому положению механизма, сопровождающемуся резким увеличением момента в приводе (рис.14), должно происходить отключение двух основных приводов и включение двух дополнительных. После выхода из особого положения происходит выключение дополнительных приводов и включение основных. Таким образом, дополнительные приводы позволяют избежать перегрузок двигателей и избежать потерю управляемости.

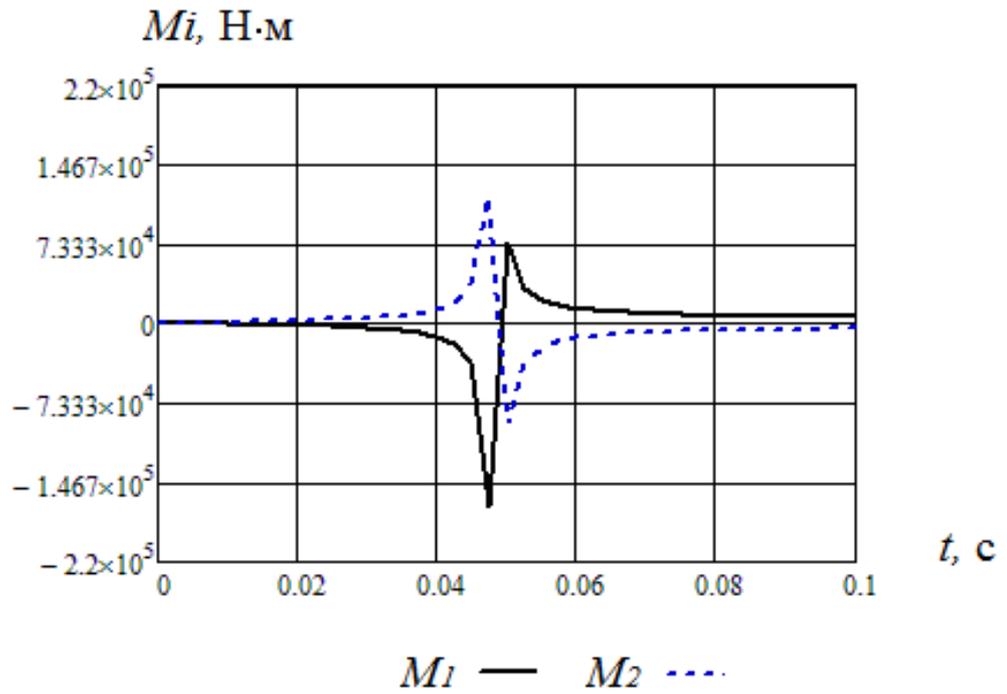
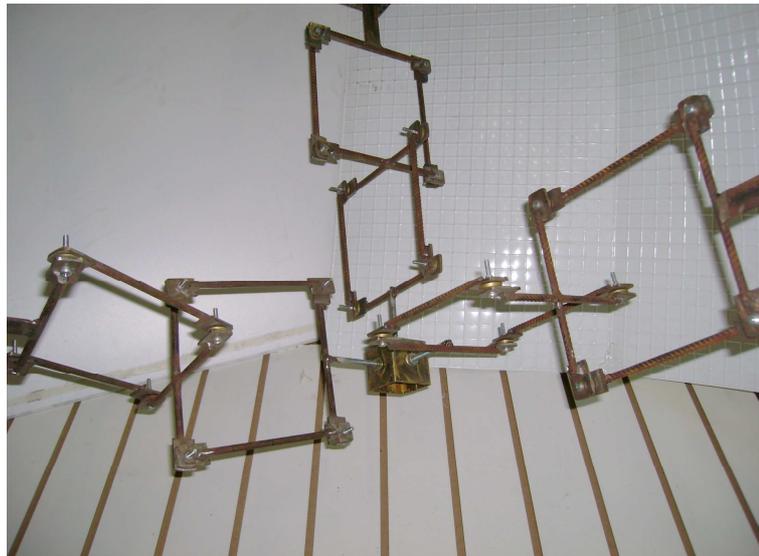


Рис. 14. Усилия в основных приводах

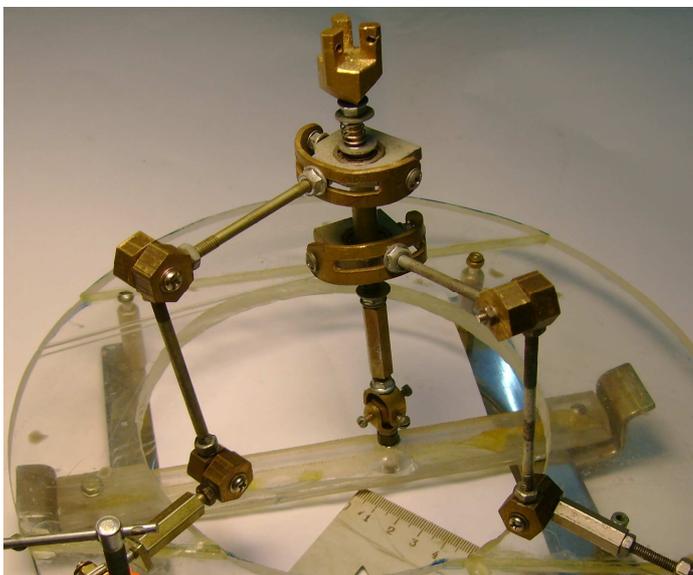
В **седьмой** главе представлены экспериментальные модели механизмов различных классов (рис.15).



a)



б)



в)

Рис. 15. Модели механизмов

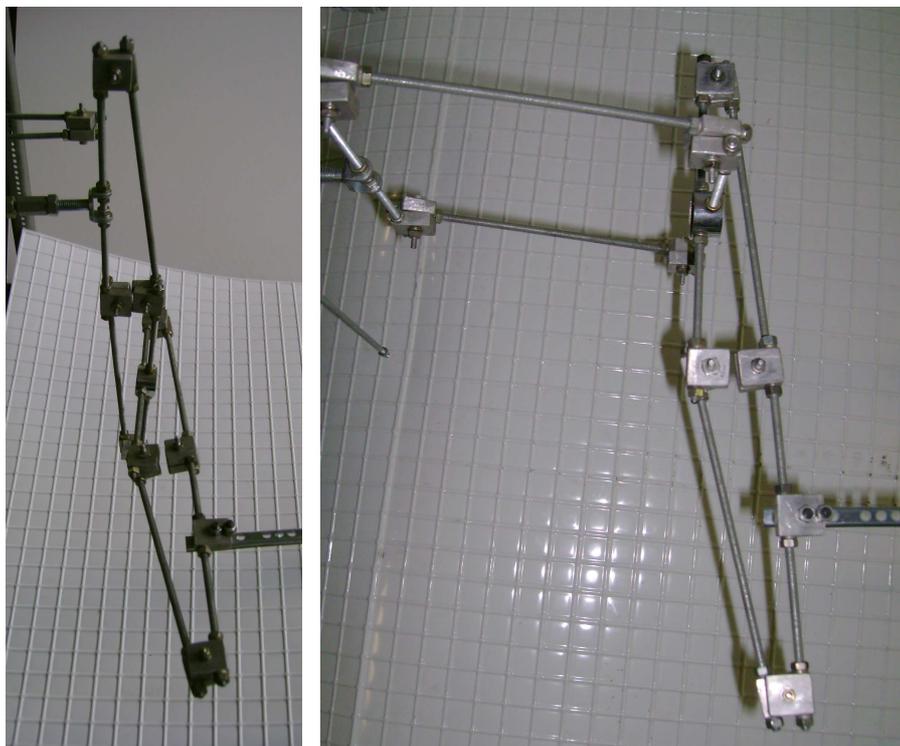
а – плоский, б – поступательно-направляющий, в – сферический

При исследовании механизмов были определены некоторые свойства механизмов. Так, для плоского механизма были определены рабочая зона, углы поворота платформы, особые положения, повторяемость, точность (рис.16 а). Установлено, что размеры рабочих зон с учетом конструктивных ограничений в целом соответствуют теоретическим результатам. Конструктивные ограничения существенно влияют на достижимость особых положений (сингулярностей).

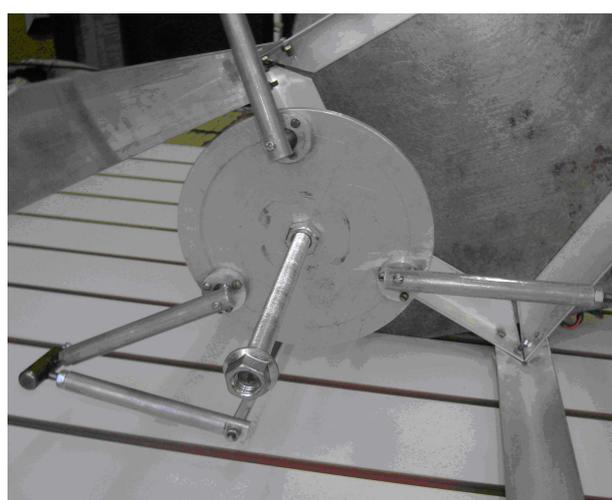
Для поступательно-направляющего механизма ЗРРарА были определены размеры рабочей зоны и исследованы особые положения (рис. 16 б). Экспериментальные исследования физической модели показали, что выходное звено совершает поступательные движения. При определении границ рабочего пространства модели манипулятора максимальные значения перемещений центра её грузовой платформы вдоль осей координат совпали с расчетными значениями.

Результаты экспериментальных исследований физических моделей манипуляторов в целом подтвердили работоспособность предложенных конструкций и позволяют разработать рекомендации по проектированию механизмов.

Разработанные механизмы различных классов, совершающие плоские, вращательные и поступательные движения, могут применяться на предприятиях текстильной и легкой промышленности. Показаны возможные применения механизмов.



а)



б)

Рис. 16. Особые положения  
а – поступательно-направляющего механизма,  
б – плоского механизма

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

### Основные результаты:

1. Проведен анализ технологических и транспортных операций, которые могут быть выполнены манипуляторами параллельной структуры и предложена классификация указанных механизмов на основе числа степеней свободы и количества числа кинематических цепей.

2. Разработаны научные и методологические основы проектирования механизмов параллельной структуры, базирующиеся на структурно-геометрическом синтезе и анализе связей, налагаемых кинематическими цепями. Синтезированы новые схемы манипуляторов параллельной структуры

3. Разработаны ряды механизмов на основе кинематического анализа манипуляционных механизмов параллельной структуры. Сопоставлены результаты, полученные на основе дифференцирования уравнений связей и анализа кинематических и силовых винтов. Показано соответствие этих подходов. Определены размеры рабочих зон

4. Исследованы динамические свойства манипуляционных механизмов параллельной структуры, связанные с взаимным влиянием их степеней свободы. Эти динамические свойства проанализированы применительно к нелинейным колебаниям.

5. Предложен динамический критерий, основанный на анализе собственных частот.

6. Разработан алгоритм управления манипулятором параллельной структуры, основанные на минимизации ошибок по положению, скорости и ускорению. Этот алгоритм проанализирован с точки зрения устойчивости и точности движения по заданному закону

7. Проанализированы факторы, влияющие на точность манипуляторов параллельной структуры, учитывающие неточность изготовления звеньев, а также неточность динамической модели, влияющую на динамическую ошибку движения по траектории.

8. Разработаны конструкции и изготовлены физические модели плоских, поступательных, сферических механизмов параллельной структуры, проведены их экспериментальные исследования, подтвердившие их работоспособность.

### Общие выводы:

1. В результате анализа парка роботов, применяемых в текстильной и легкой промышленности и выполняемых ими операций, установлено, что наиболее востребованными являются устройства, выполняющие плоские, поступательные и вращательные движения.

2. На основе принципов структурно-параметрического синтеза предложены схемы механизмов различных классов: плоских, поступательно-направляющих и сферических. Установлено, что механизмы параллельной структуры могут быть получены либо путем присоединения кинематических цепей, налагающих повторяющиеся связи, либо путем присоединения кинематических цепей, налагающих различные связи и отбирающие по одной степени свободы.

3. Разработана методика комплексного решения задачи кинематики с учетом сингулярностей и точности. Установлено, что методика линейной теории точности позволяет определить ошибки положения выходного звена механизмов параллельной структуры с учетом неточностей изготовления звеньев. Данный вывод был проверен на основе нелинейной теории точности.

4. Установлено, что при проведении кинематического и динамического анализа плоские, поступательно-направляющие и сферические механизмы с пятью кинематическими парами в каждой кинематической цепи могут быть заменены эквивалентными с тремя кинематическими парами в каждой цепи.

5. Предложен новый динамический критерий близости к особым положениям механизмов через частотные характеристики. При приближении к особым положениям первая собственная частота уменьшается в десятки и сотни раз, что связано с уменьшением жесткости по одной степени свободы.

6. Разработан алгоритм управления механизмами параллельной структуры, обеспечивающий минимизацию ошибки по координате, скорости и ускорению, а также устойчивое движение по заданному закону. При управлении механизмом в области особых положений предложено использовать дополнительные приводы. При приближении к особым положениям основные приводы отключаются и включаются дополнительные. После выхода из особого положения происходит выключение дополнительных приводов и включение основных. Таким образом, дополнительные приводы позволяют избежать перегрузок основных приводов и исключить потерю управляемости.

7. Показано, что в механизмах параллельной структуры существует динамическое взаимовлияние между степенями свободы. Усилие в каждом приводе зависит от положения, скорости и ускорения движения по другим координатам. Этот эффект был проверен на примере нелинейных колебаний.

8. Показано, что конструкция механизмов параллельной структуры обладает простотой и возможностями унификации. Это повышает надежность эксплуатации данных технических систем и обеспечивает их ремонтпригодность.

**Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

***В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. Хейло С.В. Решение задачи о скоростях манипулятора с тремя степенями свободы с применением теории винтов /С.В. Хейло // Проблемы машиностроения и автоматизации. –2011. –№ 1. –С. 77–81.

2. Хейло С.В. Частотный критерий особых положений манипулятора параллельной структуры /С.В. Хейло // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. –№ 1. –С. 65–72.

3. Хейло С.В. Синтез сферических манипуляторов параллельной структуры /С.В. Хейло // Справочник. Инженерный журнал. –2012. –№ 6. – С. 23–28.

4. Хейло С.В. Структурно-геометрический анализ сферического манипулятора параллельной структуры /С.В. Хейло // Справочник. Инженерный журнал. –2012. –№ 12. – С. 9–14.
5. Хейло С.В. Колебания манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы /С.В. Хейло// Сб. IX всероссийская научная конференция им. Ю.И. Неймарка «Нелинейные колебания механических систем», Н. Новгород, –2012– С. 957–961.
6. Хейло С.В. Решение задачи кинематики сферического манипулятора параллельной структуры /С.В. Хейло // Машиностроение и инженерное образование. – 2010. –№ 4. – С. 18–22.
7. Хейло С.В. Решение задачи об управлении поступательно-направляющим механизмом параллельной структуры /С.В. Хейло, В.А. Глазунов// Справочник. Инженерный журнал. –2013. –№ 10. – С. 17–24.
8. Хейло С.В. Решение задачи кинематики поступательно-направляющего манипулятора /С.В. Хейло, В.А. Глазунов, Р.Ю. Сухоруков// Машиностроение и инженерное образование. –2011. –№ 4. – С. 11–17.
9. Хейло С.В. Решение задачи о скоростях и особых положениях сферического манипулятора параллельной структуры /С.В. Хейло, В.А. Глазунов, Во Динь Тунг// Машиностроение и инженерное образование. – 2011. –№ 1. – С. 2–9.
10. Хейло С.В. Анализ ускорений и нелинейных колебаний механизма параллельной структуры /С.В. Хейло, В.А. Глазунов, Ю.В. Кулемкин, В.Л. Эфрос // Проблемы машиностроения и надежности машин. –2013. – №3 – С. 9–17.
11. Хейло С.В. Возможные применения механизмов параллельной структуры /С.В. Хейло, В.А. Глазунов, М.А. Ширинкин, А.В. Календарев// Проблемы машиностроения и надежности машин. –2013. – №5 – С. 19–24.
12. Хейло С.В., Ларюшкин П.А. Определение рабочей зоны манипуляторов параллельной структуры /С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин // Справочник. Инженерный журнал. –2013. – №2. – С. 27-31.
13. Хейло С.В. Определение собственных частот колебаний манипулятора параллельной структуры /С.В. Хейло, М.А. Ширинкин, В.А. Глазунов// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. –2011г. – №4–С.120–124
14. Глазунов В.А. Манипулятор параллельной структуры с четырьмя степенями свободы / В.А. Глазунов, С.В. Хейло, М.А. Ширинкин, П.А. Ларюшкин, А.В. Ковальчук // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, Часть 2, №4. 2011. – с. 92-94.
15. Ларюшкин П.А. Решение задачи о положениях параллельного манипулятора с тремя степенями свободы / П.А. Ларюшкин, В.А. Глазунов. С.В. Хейло // Справочник. Инженерный журнал с приложением, №2. 2012. – с. 16-20.
16. Ширинкин М.А. Решение задачи о скоростях и особых положениях манипулятора параллельной структуры / М.А. Ширинкин, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. –2011г. –№3–С.95–101.
17. Глазунов В.А. Решение задачи управления сферическим механизмом параллельной структуры / В.А. Глазунов, С.В. Хейло // Проблемы машиностроения и

### *Монография*

18. Хейло С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ: монография /С.В. Хейло, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин– М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153с.

### *В других изданиях*

19. Glazunov V. 3-DOF Translational and Rotational Parallel Manipulators / V. Glazunov, P. Laryushkin, S. Kheylo // *New Trends in Mechanism and Machine Science: Theory and Applications in Engineering*. 2013. – P. 199-207.

20. Nguyen Minh Thanh. On Translational and Spherical Parallel Manipulators with Three Degrees of Freedom / Nguyen Minh Thanh, V. Glazunov, P. Laryushkin, S. Kheylo // *Problems of Mechanics*, №1. 2013 – P. 50-54.

21. Nguyen Minh Thanh Control of 3-dof planar parallel robot / Nguyen Minh Thanh, V. Glazunov, S. Kheylo // *Problems of Mechanics*. –2013. – №3. – P. 60–64.

22. Глазунов В.А. Применение манипуляторов параллельной структуры в измерительном оборудовании для объектов наноиндустрии / В.А. Глазунов, С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин // Тезисы докладов II-й научно-практической конференции и каталог выставки "Нанотехнологии в текстильной и легкой промышленности". М.: ГОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2011. – с. 25-26.

24. Хейло С.В. Моделирование оптимальной траектории рабочего органа манипулятора / С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин, О.В. Ключкова // Тезисы докладов Международной научно-технической конферен

ции "Современные технологии и оборудование текстильной промышленности" (ТЕКСТИЛЬ-2011). М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2011. – с. 213.

25. Хейло С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры для робототехнических комплексов предприятий текстильной промышленности /С.В. Хейло, В.А. Глазунов// Вестник Московского государственного текстильного университета: Тематический сборник научных трудов «Инновационные технологии и материалы». –2012. –С. 73–76.

26. Хейло С.В. Задача об ускорении поступательно-направляющего механизма параллельной структуры /С.В. Хейло, М.Г. Лукашова// *Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности* (Прогресс 2013): сборник материалов международной научно-практической конференции . Часть 2. –Иваново:ИГТА, 2013.–С.175–176.

27. Хейло С.В. Повышение технической и эксплуатационной эффективности устройств манипулирования /С.В. Хейло, А.Е. Лысогорский // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Современные технологии и оборудование текстильной промышленности" (ТЕКСТИЛЬ-2012): тезисы докладов. Часть 2. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2012. – С. 24.

28. Ширинкин М.А. Исследование подвижностей в механизмах параллельной структуры /М.А. Ширинкин, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло// XXII Международная Иновационно-ориентированная конференция молодых ученых и

- студентов (МИКМУС-2010) «Будущее машиностроения России»: сборник материалов конференции с элементами научной школы для молодежи (Москва, 26-29 ноября 2010 г.). – М: Цифровичок, 2010 г. – 221 с.
29. Glazunov V. On 4-DOF Particularly Decoupled Parallel Mechanisms / V. Glazunov, S. Palochkin, S. Kheilo, M. Shirinkin, Nguyen Minh // Proceedings of the 13th World Congress in Mechanism and Machine Science. June 19 -23, Guanajuato, Mexico Universidad de Guanajuato (UCEA), Mexico. –2011. – 8 P.
30. Глазунов В.А. Решение задачи о скоростях манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы. / В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, М.А. Ширинкин, С.В. Хейло // Технологические проблемы прочности: Сб. Материалы XVII международного семинара. – Подольск. –2010. – С.87–94.
31. Глазунов В.А. Роботы параллельной структуры – альтернатива антропоморфным роботам / В.А. Глазунов, С.В. Хейло // Естественный и искусственный интеллект: методологические и социальные проблемы. Под ред. Д.И. Дубровского и В.А. Лекторского – М. «Канон +» РООИ «Реабилитация», 2011. – С. 201 –210.
32. Глазунов В.А. Частотный критерий особых положений сферического манипулятора параллельной структуры / В.А.Глазунов, С.В. Хейло // Сб. трудов XVII Симпозиум «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» DYVIS.– 2012. –С.53–56.
33. Глазунов В.А. Определение особых положений манипулятора с параллельной структурой / В.А. Глазунов, С.В. Хейло, М.А. Ширинкин // Сб. Тезисы докладов Международной научно – технической конференции "Современные технологии и оборудование текстильной промышленности" (ТЕКСТИЛЬ-2010) – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина. –2010. –С.178–179.
34. Хейло С.В. Колебания манипулятора параллельной структуры с тремя степенями свободы /С.В. Хейло// Сб. IX всероссийская научная конференция им. Ю.И. Неймарка «Нелинейные колебания механических систем», Н. Новгород, –2012– С. 957–961.
35. Kheylo S. Kinematic, dynamics, Control and accuracy of spherical parallel robot /S. Kheylo, V. Glazunov// Pr. of Romansy 20 – XX CISM-IFTOMM Symposium on theory and practice of robots and manipulators. Moscow. –2014. – P. 133–141.
36. Kheylo S. Accelerations and nonlinear oscillations of parallel spherical mechanism / S. Kheylo, Nguyen Minh Thanh, V.Glazunov // The 3-rd IFFTom international symposium on robotics and mechatronics, Singapore. –2013. – P.504–512.
37. Патент РФ на полезную модель №110326. /В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, А.В. Ковальчук. Пространственный сферический механизм с тремя степенями свободы. № 2011112576/02, 04.04.2011. – 2 с.
38. Патент РФ на изобретение № 2466013 / В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин. Пространственный механизм с тремя поступательными степенями свободы. № 2011120038/02, 19.05.2011. – 2 с.
39. Патент РФ на изобретение № 2466014 / В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин, М.А. Ширинкин, Ю.Н. Артеменко, Ю.Т. Каганов. Пространственный механизм с пятью степенями свободы. № 2011120039/02, 19.05.2011. – 2 с.

40. Патент РФ на полезную модель № 113193 / В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, П.А. Ларюшкин, М.А. Ширинкин, Ю.Н. Артеменко, Ю.Т. Каганов. Пространственный механизм с шестью степенями свободы. № 2011120036/02, 19.05.2011. – 2 с.
41. Патент РФ на полезную модель № 135283 /Н.Ю. Носова, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло. Пространственный механизм с пятью степенями свободы. № 2013132023/02, 11.07.2013. – 2 с.
42. Патент РФ на полезную модель № 113193 / А.В. Календарев, В.А. Глазунов, А.Е. Лысогорский, С.В. Палочкин, С.В. Хейло, Л.В. Комиссарук. Пространственный механизм с четырьмя степенями свободы. № 2012127591/02, 03.07.2012. – 2 с.