

На правах рукописи



РАШОЯН ГАГИК ВОЛОДЯЕВИЧ

**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВЫХ  
1 – КООРДИНАТНЫХ МЕХАНИЗМОВ И ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.02.18 -  
Теория механизмов и машин

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

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

**Научный консультант:** Глазунов Виктор Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, директор ИМАШ РАН

**Официальные оппоненты:** Подураев Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой робототехники и мехатроники Московского государственного технологического университета «Станкин».

Скворцов Аркадий Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, проректор по исследованиям и разработкам Московского политехнического университета.

Несмиянов Иван Алексеевич, доктор технических наук, доцент, проректор по учебной работе Волгоградского государственного аграрного университета.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва.

Защита диссертации состоится «05» октября 2021 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 002.059.05 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМАШ РАН по адресу: г. Москва, ул. Бардина, д. 4, тел. (499)135-55-16; и на сайте <http://www.imash.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим направлять по адресу ИМАШ РАН: 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.059.05.

Автореферат разослан «20» июля 2021 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Филиппов Глеб Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы работы.** Для решения задач, поставленных перед современным машиностроением Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации<sup>1</sup>, необходимо синтезировать механизмы, наиболее полно соответствующие той или иной технической задаче. В этой связи следует отметить особую роль механизмов параллельной структуры, обладающих уникальными свойствами: точность, грузоподъемность, и т. д.

Среди этих механизмов особую роль играют  $l$  – координатные механизмы, в которых все приводы выполнены в виде линейных двигателей, размещенных между основанием и выходным звеном. Исторически первым механизмом параллельной структуры является платформа Гауфа, в которой основание и выходное звено соединены шестью кинематическими цепями, каждая из которых содержит линейный двигатель и две сферические кинематические пары. Данное устройство – это  $l$  – координатный механизм, предназначенный для испытаний элементов автомобиля. В дальнейшем область применения подобного рода механизмов значительно расширилась – это и тренажеры, и металлообрабатывающие станки, и измерительные системы.

В Институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) под руководством А.Ш. Колискова был проведен цикл работ по исследованию и классификации подобного рода механизмов. Основой классификации являлось количество точек крепления приводов (центров сферических шарниров) на основании и выходном звене. Был предложен широкий спектр применений данного вида устройств.

Однако, с течением времени выяснилось, что класс  $l$  – координатных механизмов может и должен быть существенно расширен. В частности, речь идет о тех устройствах, в которых точки крепления приводов могут располагаться не на основании либо на выходном звене, а на каких-либо промежуточных звеньях. Следует отметить, что таким образом построена платформа Стюарта, содержащая три кинематические цепи и предназначенная для авиационных тренажеров.

Кроме того, можно принять во внимание такие  $l$  – координатные механизмы, в которых приводы расположены вне рабочей зоны. Именно по такому принципу построены механизмы, разработанные в ИМАШ РАН под руководством А.Ф. Крайнева и предназначенные для испытаний моделей аэрокосмических систем в аэродинамической трубе.

Однако указанные устройства, расширяющие класс  $l$  – координатных механизмов, не были систематизированы, хотя область их возможных применений весьма широка. Они могут быть применены не только в технологических, испытательных, обучающих системах, но и в медицине, в частности, в хирургии, или при реабилитации больных, перенесших операции на конечностях.

Исходя из изложенного, тема данной работы, связанная с расширением класса  $l$  – координатных механизмов, выявлением их общих свойств, определением их области технических приложений, представляется весьма актуальной.

**Целью исследования** является существенное расширение класса  $l$  – координатных механизмов для эффективного решения технических задач, связанных с манипуляционными, измерительными, тестирующими операциями.

---

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642

### **Задачи исследования:**

- провести синтез и классификацию структурных и кинематических схем механизмов параллельной структуры, существенно расширяющих класс  $l$  – координатных механизмов. Разработать метод структурного синтеза новых механизмов, основой которого будет являться перенесение точек крепления приводов на промежуточные звенья.

- получить теоретические закономерности проектирования структурных схем  $l$  – координатных механизмов, для которых имеет место аналитическое решение задач о положениях.

- разработать новый метод кинематического анализа и решения задач о положениях для расширенного класса  $l$  – координатных механизмов, основанный на винтовом исчислении.

- получить теоретические закономерности выбора параметров новых  $l$  – координатных механизмов, исключающие возможность наличия особых положений.

- разработать методы расчета точностных параметров для  $l$  – координатных измерительных систем вблизи особых положений с учетом конструктивных особенностей механизма вождения троса.

- разработать метод кинематического анализа для вывода  $l$  – координатных механизмов из особых положений и движения внутри зоны особых положений.

- получить базовые закономерности анализа особых положений с учетом углов давления для  $l$  – координатных механизмов, определить рабочие зоны экспериментальных образцов  $l$  – координатных механизмов и информационно-измерительных систем.

**Теоретическая значимость** обусловлена тем, что в работе расширен класс  $l$  – координатных механизмов и разработана методология, позволяющая определить основные функциональные возможности данных устройств, а именно: близость к особым положениям, виды зон сингулярности, точность, формы рабочих зон.

### **Научная новизна заключается в следующем:**

- доказана эффективность применения новой методики, позволяющей существенно расширить класс  $l$  – координатных механизмов, путем изменения положения точек крепления приводов, а также расположения точек крепления приводов вне рабочей зоны.

- применительно к проблематике диссертации, связанной с синтезом и изучением  $l$  – координатных механизмов, эффективно использован метод винтового исчисления.

- изложены условия наличия аналитического решения задач о положениях применительно к традиционным  $l$  – координатным механизмам, а также к модифицированным механизмам, полученным перенесением точек крепления приводов.

- раскрыты новые проблемы, связанные с синтезом модифицированных  $l$  – координатных механизмов и обусловленные необходимостью пересечения в одной точке осей приводов.

- изучены взаимосвязи между свойствами обычных  $l$  – координатных механизмов и модифицированных механизмов, полученных путем перенесения точек крепления приводов и расположения приводов вне рабочей зоны.

- проведена модернизация существующих математических моделей, алгоритмов и численных методов, использовавшихся для синтеза и анализа

$l$  – координатных механизмов, применительно к решению задач о положениях и задач вывода из особых положений для расширенного класса данных механизмов.

- решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение – получен расширенный класс  $l$  – координатных механизмов, эффективно решающий новые технические задачи в технологических, измерительных, манипулирующих системах.

**На защиту выносятся положения:**

- разработана научная концепция существенного расширения класса  $l$  – координатных механизмов, основанная на перенесении точек крепления приводов к основанию и выходному звену.

- предложен новый подход к параметрическому синтезу  $l$  – координатных механизмов, обеспечивающий отсутствие особых положений.

- доказана возможность повышения точности  $l$  – координатных измерительных систем при приближении к особым положениям с использованием понятия взаимного кинематического винта.

- введены изменения трактовки известного понятия  $l$  – координатных механизмов, основанные на перенесении точек крепления приводов, а также на расположении приводов вне рабочей зоны.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что в работе синтезированы многие структурные схемы  $l$  – координатных механизмов и измерительных систем, эти устройства будут эффективно использоваться в различных областях техники, в частности, в технологических, медицинских, обучающих системах. Кроме того, методики анализа рассмотренных механизмов могут быть применены и для других устройств.

**Методы исследования:** в работе применялись методы теории механизмов и машин, теоретической механики, методы оптимизации, аналитической геометрии, методы компьютерного моделирования, а также элементы винтового исчисления.

**Достоверность результатов диссертации** подтверждается использованием общепринятых допущений, апробированных методик структурных и кинематических исследований, а также частичной проверкой результатов на основе численных и натуральных экспериментов.

**Личный вклад автора** заключается в разработке расширенной классификации  $l$  – координатных механизмов, выявлении схем, соответствующих аналитическому решению прямой задачи о положениях, разработке методик определения углов давления и форм рабочих зон.

**Апробация работы.**

Результаты данной работы были представлены на следующих конференциях:

- XII Международный симпозиум «Динамика виброударных сильно нелинейных систем». Москва – Звенигород, 1998;
- Десятый всемирный конгресс по ТММ, Оулу, Финляндия, 1999 (Tenth World Congress on TMM. Oulu, Finland, 1999);
- XIII Международный симпозиум «Динамика виброударных сильно нелинейных систем». Москва – Звенигород, 2001;
- Международная конференция по теории механизмов и механике машин. Краснодар, 2006;
- Научная конференция «Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий». Сочи, 2008;

- Всероссийский междисциплинарный семинар «Философско-методологические проблемы искусственного интеллекта». Пермь, 2008;
- V международная конференция «Проблемы механики современных машин». Улан-Уде, 2012;
- Международная конференция по методам аэрофизических исследований. Казань, 2012 (International Conference on the Methods of Aero-physical Research. Kazan, 2012);
- XVIII Международный Симпозиум «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» - DYVIS-2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского. Москва, 2015;
- Всероссийская конференция с приглашением международных участников «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии». Нальчик, 2016 (IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). Nalchik, 2016);
- Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники. Цифровые технологии в машиностроении». Алматы, 2018;
- VI Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва, 2019;
- Международная конференция по искусственному интеллекту, медицинской инженерии, образованию. Москва, 2019 (International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education. Moscow, 2019);
- XII мультikonференция по проблемам управления. Геленджик, 2019;
- Четырнадцатая международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения». Курск, 2019 (14th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings». Kursk, Russia, 2019);
- XV всемирный конгресс по теории механизмов и машин. Краков. Польша. 2019. (15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. Krakow. Poland. 2019);
- Четвертая Международная конференция по искусственному интеллекту, медицинской инженерии, образованию «Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education». Москва, 2020.

**Публикации.** По теме работы опубликовано 72 научных работы, из них 26 в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 10 в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Получены 15 патентов РФ на полезные модели и изобретения.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объем диссертации 255 страниц, в тексте имеется 11 таблиц и 101 рисунок. Список литературы из 201 наименования представлен на 24 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, отмечена научная новизна и положения, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации, теоретической и практической значимости работы.

**В первой главе** выполнен анализ применения  $l$  – координатных механизмов

в промышленности, сельском хозяйстве, непроизводственных отраслях, а также анализ и классификация особых положений пространственных механизмов. Выделен класс  $l$  – координатных механизмов и показана необходимость развития теории структурного синтеза и оптимизации параметров таких механизмов.

Понятие  $l$  – координат было введено А.Ш. Колискором. Отличительной чертой  $l$  – координатных механизмов является наличие шести подцепей SPS ( $S$  – сферическая пара,  $P$  – поступательная пара), которыми выходное звено механизма соединяется с основанием, при этом поступательная пара является приводной. Структурный синтез  $l$  – координатных механизмов проведен в работе К.С. Арзуманяна и А.Ш. Колискоора.

Методы, применяемые при анализе и синтезе механизмов параллельной структуры, весьма многочисленны. Отмечены работы следующих авторов: В. Аракелян, С. Брио, А.Ф. Крайнев, С.В. Хейло, К.Х. Хант, Г. Навратил и др. Разнообразные применения этих устройств в конструкциях манипуляторов и других машин рассмотрены в работах В.Е. Гауфа, В.А. Глазунова, Д. Стюарта и др.

К вопросам исследования вырожденных конфигураций относятся работы Ф.М. Диментберга, К. Гослена, Дж. Анджелеса, Ж-П. Мерле и др.

**Во второй главе** рассматривается расширенная классификация  $l$  – координатных механизмов, которая по сравнению с известной классификацией отличается тем, что приводы могут располагаться не только между основанием и выходным звеном, но и между одним из этих звеньев и каким-либо промежуточным звеном. Такое увеличение количества структур позволяет в значительной степени расширить функциональные возможности данных механизмов, в частности, расположить приводы вне рабочей зоны и тем самым изменить и расширить область их применения. Это соответствует основным положениям теории синтеза и анализа механизмов параллельной структуры.

Рассмотрим таблицу 1, где признаком классификации является количество точек крепления шести  $l$  – координат на основании и выходном звене, при этом будут рассмотрены различные варианты этих соотношений. Прежде всего, представим в наиболее общем виде  $L(n, m)$  возможные варианты структурных схем механизмов. Здесь обозначение  $L$  указывает, что имеют место  $l$  – координатные структурные схемы, при этом количество точек крепления  $n$  на выходном звене и на основании  $m$  удовлетворяет условиям:  $3 \leq n \leq 6$  и  $3 \leq m \leq 6$ , а количество приводных кинематических цепей равно шести.

Таблица 1

$B_i \backslash P_i$		Количество точек крепления на основании			
		3	4	5	6
Количество точек крепления на выходном звене	3	L(3,3)	L(3,4)	L(3,5)	L(3,6)
	4		L(4,4)	L(4,5)	L(4,6)
	5			L(5,5)	L(5,6)
	6				L(6,6)

Общее количество вариантов расположения приводов для  $L(3, 3)$  равно четырем: L-321-321; L-321-222; L-222-321 и L-222-222. Из них отбираем три, так как схемы L-321-222 и L-222-321 являются симметричными. Аналогичным образом определяются и остальные вариации расположения приводов. Таким образом, получаем матрицу вариантов расположения приводов в зависимости от количества точек их крепления на основании и на выходном звене.

Рассмотрим варианты модифицированных  $l$  – координатных механизмов, в

которых некоторые  $l$  – координаты крепятся не к основанию или выходному звену, а к одному из промежуточных звеньев, на примере структуры L-222-321, при этом каждой базовой схеме (в них все приводы расположены непосредственно между основанием и выходным звеном) может быть сопоставлено несколько вариантов расположения упомянутых  $l$  – координат или приводов, соответствующих этим  $l$  – координатам (рисунок 1).

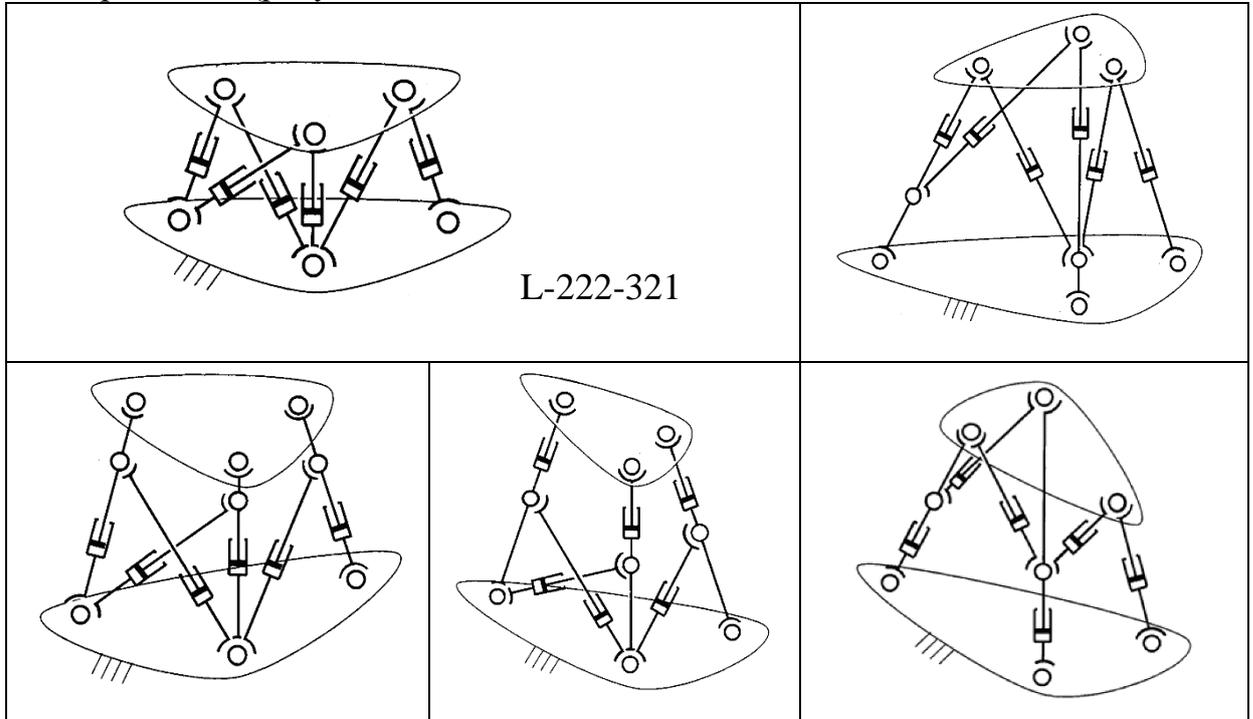


Рисунок 1.

Рассмотренный класс  $l$  – координатных механизмов может быть расширен за счет того, что некоторые штоки приводов могут быть продолжены за пределы основания либо выходного звена. При этом точки, где сходятся оси  $l$  – координат, могут быть более не связаны с выходным звеном или основанием (рисунок 2). Сказанное является принципом построения  $l$  – координатных механизмов с расположением приводов вне рабочей зоны. Это обстоятельство существенно расширяет класс  $l$  – координатных механизмов.

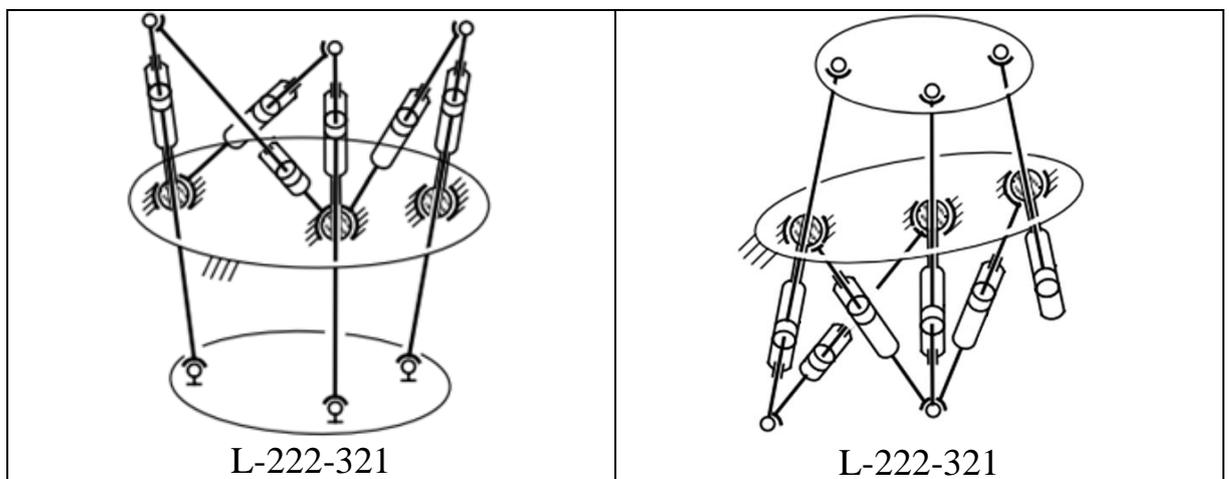


Рисунок 2.

**В третьей главе** представлено дополнительное условие расширения рассматриваемого класса  $l$  – координатных механизмов: введение дополнительных

стержней, расположенных между точками соединения  $l$  – координат между собой, с основанием и выходным звеном. При этом приводы вновь установлены вне рабочей зоны, а упомянутые дополнительные стержни должны проходить «сквозь» основание либо выходное звено (рисунок 3 а). Соединительный стержень связан с тем звеном, «сквозь» которое он проходит, сферическим шарниром с расположенной внутри него поступательной парой.

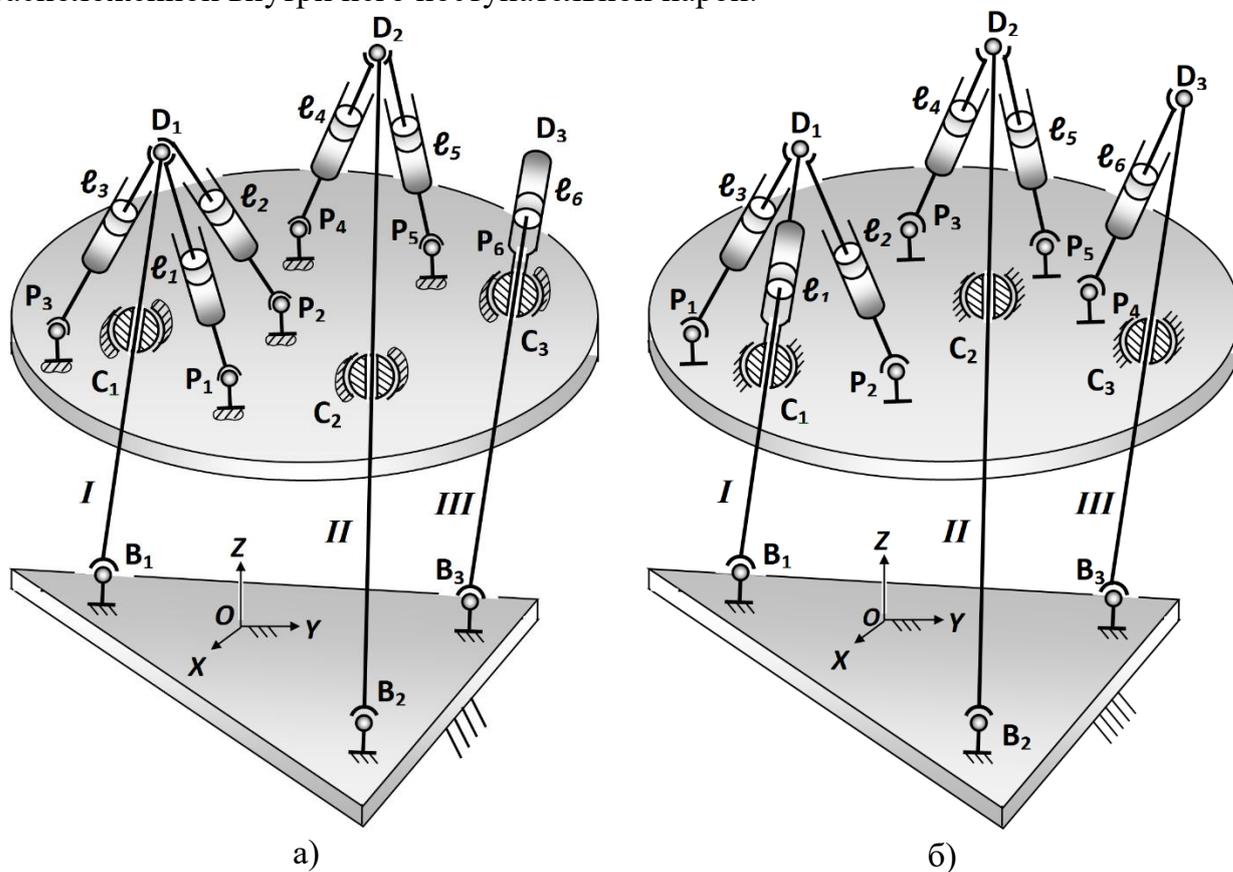


Рисунок 3.

В соответствии с изложенным, точки  $B_1, B_2, B_3$  (рисунок 3 а) расположены на основании, с которым связана неподвижная система координат  $OXYZ$ . Три соединительных вводных стержня I, II, III связаны с выходным звеном посредством сферических шарниров  $C_1, C_2, C_3$ , имеющих отверстие – охватывающий элемент поступательной кинематической пары.

$l$  – координаты  $l_1, \dots, l_6$  выражают перемещения в приводах, которые расположены между точками соответственно  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  и  $D_1, D_2, D_3$ . Такое расположение приводов показывает, что они связаны с выходным звеном и вводными стержнями, а основание связано лишь с указанными стержнями. Подобная структура востребована для роботов, работающих в экстремальных средах, к примеру, в космосе.

Можно убедиться, что движения выходного звена соответствуют шести степеням свободы, для этого воспользуемся формулой Сомова – Малышева. Количество подвижных звеньев:  $n = 16$ , количество пар каждого класса:  $p_5 = 6; p_3 = 15; p_2 = 3$ ;

$$W = 6 \cdot 16 - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 15 - 2 \cdot 3 = 96 - 81 = 15;$$

Число степеней свободы  $W = W_{\text{Осн.}} + W_{\text{Местн.}} = 6 + 9$ , где  $W_{\text{Осн.}}$  и  $W_{\text{Местн.}}$  соответствуют основной и местной подвижности. Местная подвижность связана с вращением кинематических цепей  $P_1D_1, P_2D_2, P_3D_1, P_4D_2, P_5D_2, P_6D_3$  и

дополнительных звеньев I, II, III вокруг собственных осей. Эти подвижности не влияют на кинематику механизма. Их можно устранить, если заменить сферические шарниры в точках  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  выходного звена и в точках  $B_1, B_2, B_3$  основания на двухподвижные шарниры (например, сферический шарнир с пальцем). В таком случае получим следующий результат:

$$n = 16; p_5 = 6; p_4 = 9; p_3 = 6; p_2 = 3;$$

$$W = 6 \cdot 16 - 5 \cdot 6 - 4 \cdot 9 - 3 \cdot 6 - 2 \cdot 3 = 96 - 90 = 6;$$

Развивая предложенный подход к образованию новых  $l$  – координатных механизмов, укажем, что один из приводов, не сопряженный с другими приводами  $l$  – координатами, может быть своим штоком жестко сопряжен со стержнем-вводом, так что их оси совпадают (рисунок 3 б). Здесь все обозначения соответствуют приведенным выше. Число степеней свободы также равно шести.

**В четвертой главе** рассмотрена новая методика решения прямой задачи о положениях пространственных  $l$  – координатных механизмов с шестью степенями свободы. Представленный подход к решению задачи позволяет получить аналитическое выражение для ряда  $l$  – координатных структур, ранее решаемых численно с использованием итерационных процедур. В результате количество  $l$  – координатных структур, для которых задача о положениях имеет аналитическое решение, можно увеличить. Эти структуры легко анализировать на предмет попадания в особые положения.

Рассматриваются геометрические и кинематические свойства особых положений  $l$  – координатных механизмов для структур, в которых задача о положениях имеет аналитическое решение. Приводятся алгоритмы определения особых положений и расчета областей  $l$  – координат, свободных от особых положений. Решен численный пример. Определен основной признак аналитической решаемости  $l$  – координатных структур: необходимо, чтобы в одной точке выходного звена сходились три линии  $l$  – координат, а во второй две. Исходя из этого, вводятся дополнительные  $l$  – координаты.

Рассмотрим решение прямой задачи о положениях для  $l$  – координатного механизма, полученного из исходного путем переноса выходного звена в область вне расположения приводов (рисунок 4). Задача сводится к определению положения выходного звена 2 механизма по заданным значениям  $l$  – координат.

Считаем заданными положения точек  $B_j(X_{Bj}, Y_{Bj}, Z_{Bj})$  ( $j = 1, \dots, 3$ ) в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , связанной с основанием 1, а также координаты точек  $P_i(X'_{Pi}, Y'_{Pi}, Z'_{Pi})$  ( $i = 1, \dots, 3$ ) в подвижной системе координат  $O'X'Y'Z'$ , связанной с выходным звеном 2 механизма. Кроме того, известны значения  $l$  – координат  $l_1, \dots, l_6$ , длины отрезков на выходном звене  $l_{P_1P_2}, l_{P_2P_3}, l_{P_1P_3}$ , длины отрезков на основании  $l_{B_1B_2}, l_{B_2B_3}, l_{B_1B_3}$ , а также длины штанг  $l_{P_1C_1}, l_{P_2C_2}, l_{P_3C_3}$ . Необходимо определить положение выходного звена 2 в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , что эквивалентно определению координат точек  $P_i(X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi})$  в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , связанной с основанием 1, где  $i = 1, 2, 3$ .

Для решения поставленной задачи рассмотрим треугольник  $\Delta B_2C_3B_3$ , находим длину отрезка  $l_{P_3B_2} = \sqrt{l_5^2 + l_6^2 - 2l_5l_6 \cos \angle B_2C_3B_3}$ .

Аналогичным образом, рассматривая треугольники  $\Delta B_2C_1P_1$  и  $\Delta B_1C_2P_2$ , находим длины отрезков  $l_{P_1B_2}$  и  $l_{P_2B_1}$ .

Далее в подвижной системе координат  $O'X'Y'Z'$  определяем положение точки  $B_2(X'_{B_2}, Y'_{B_2}, Z'_{B_2})$ . Для этого составляем систему из квадратных уравнений,

связывающих координаты искомой точки  $B_2$  с координатами точек  $P_1, P_2, P_3$ . Определяем длину отрезка  $l_{P_2B_2} = l_{P_2C_2} - l_4$ , в котором длина  $l_{P_2C_2}$  также является заданной. Затем определяем координаты точки  $C_2(X'_{C_2}, Y'_{C_2}, Z'_{C_2})$  в подвижной системе координат. Для этого сначала составляем уравнение прямой, проходящей через две заданные точки  $P_2(X'_{P_2}, Y'_{P_2}, Z'_{P_2})$  и  $B_2(X'_{B_2}, Y'_{B_2}, Z'_{B_2})$ , затем по заданным длинам отрезков  $l_{P_2C_2}$  и  $l_{P_2B_2}$  определяем координаты точки  $C_2(X'_{C_2}, Y'_{C_2}, Z'_{C_2})$ .

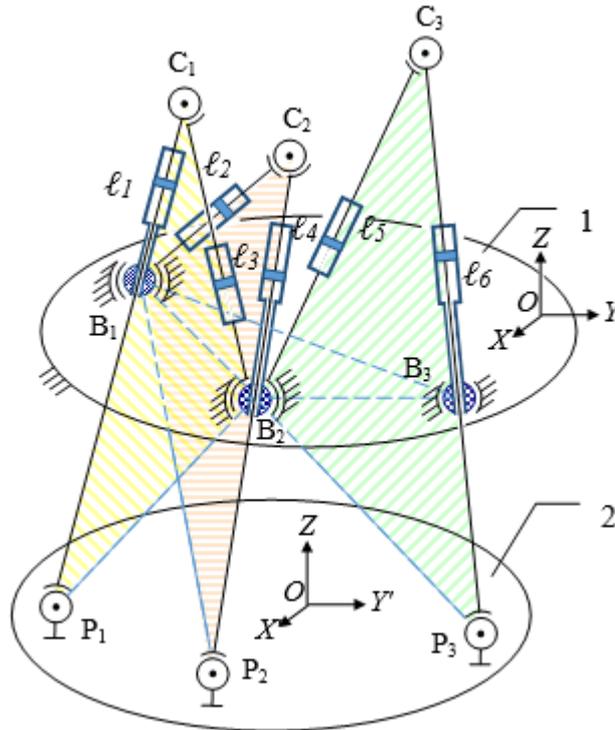


Рисунок 4.

Далее находим положение точки  $B_1(X'_{B_1}, Y'_{B_1}, Z'_{B_1})$  в подвижной системе координат  $O'X'Y'Z'$ . Для этого составляем систему квадратных уравнений, связывающих координаты искомой точки  $B_1$  с координатами точек  $P_1, C_2, P_2$ .

При этом в подвижной системе координат рассматриваем тетраэдр  $B_1B_2P_3B_3$  с вершиной в точке  $B_3$  и составляем систему квадратных уравнений, связывающих координаты точек основания тетраэдра  $B_1, B_2, P_3$  с координатами его вершины в точке  $B_3$ . Длину отрезка  $l_{P_3B_3}$  находим из соотношения  $l_{P_3B_3} = l_{P_3C_3} - l_6$ .

Имея координаты точек  $B_1, B_2, B_3$  в подвижной системе координат, можно определить расстояние между любыми точками  $B_1, B_2, B_3, P_1, P_2, P_3$ , в подвижной системе координат. В частности, можно найти длины отрезков  $l_{P_1B_3}, l_{P_2B_3}, l_{P_3B_1}$ .

Исходя из изложенного, для определения положений точек выходного звена  $P_i(X_{P_i}, Y_{P_i}, Z_{P_i})$  ( $i = 1, \dots, 3$ ) в неподвижной системе координат  $OXYZ$  рассмотрим три тетраэдра, имеющих общую плоскость основания, проходящую через точки  $B_1, B_2, B_3$ , и вершины в соответствующих точках  $P_1, P_2, P_3$ . Аналитическое решение задачи определения координат точек вершин указанных тетраэдров сводится к решению системы трех квадратных уравнений:

$$\begin{cases} (X_{B_1} - X_{P_1})^2 + (Y_{B_1} - Y_{P_1})^2 + (Z_{B_1} - Z_{P_1})^2 = l_{P_1B_1}^2, \\ (X_{B_2} - X_{P_1})^2 + (Y_{B_2} - Y_{P_1})^2 + (Z_{B_2} - Z_{P_1})^2 = l_{P_1B_2}^2, \\ (X_{B_3} - X_{P_1})^2 + (Y_{B_3} - Y_{P_1})^2 + (Z_{B_3} - Z_{P_1})^2 = l_{P_1B_3}^2, \end{cases}$$

Остальные системы уравнений составляются аналогично. На основании изложенного можно считать, что положение выходного звена, заданное координатами точек  $P_1, P_2, P_3$  известно.

Таким образом, можно утверждать, что при помощи ввода дополнительных связей, определяемых по указанной методике, группа структур, для которых прямая задача о положениях имеет аналитическое решение, расширена.

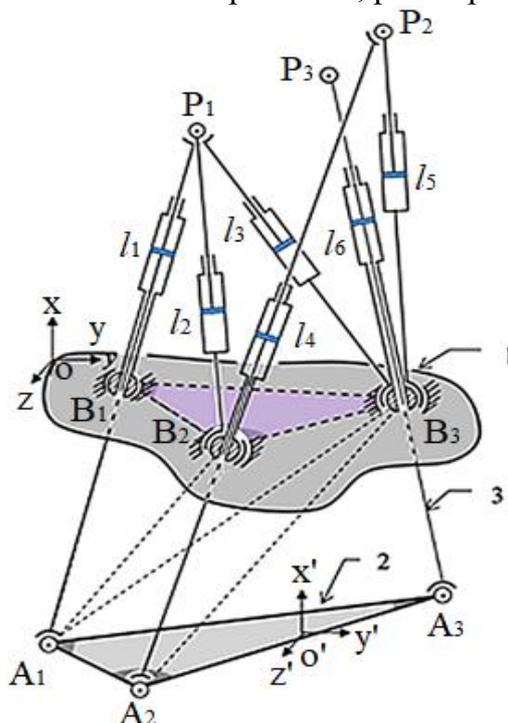


Рисунок 5.

Рассмотрим задачу анализа особых положений и синтеза механизма модифицированной структуры, не имеющего особых положений. Покажем, как взаимосвязано решение прямой задачи кинематики с определением особых положений в рабочей области.

Задан  $l$  – координатный механизм (рисунок 5), в котором выходное звено 2 (представлено точками  $A_1, A_2, A_3$ ) соединено с основанием 1 (в точках  $B_1, B_2, B_3$ ) с помощью подвижных звеньев в виде «протыкающих» штанг, длины которых  $l_{P_1A_1}, l_{P_2A_2}, l_{P_3A_3}$  известны. Известны координаты точек  $B_1(x_{B1}, y_{B1}, z_{B1}), B_2(x_{B2}, y_{B2}, z_{B2}), B_3(x_{B3}, y_{B3}, z_{B3})$  в неподвижной системе координат  $OXYZ$ . Заданы координаты точек  $A_1, A_2, A_3$  в подвижной системе координат  $O'X'Y'Z'$ , связанной с выходным звеном механизма.

Обобщенными координатами являются шесть  $l$  – координат, представляющих расстояния между соответствующими точками  $B_1, B_2, B_3$  крепления кинематических цепей на основании и  $P_1, P_2, P_3$  – точками схождения кинематических цепей на «протыкающих» штангах (рисунок 5). Пределы изменения обобщенных координат  $l_{imin}$  и  $l_{imax}, i = 1, \dots, 6$  заданы, и в частном случае могут быть одинаковы для всех приводных пар.

Необходимо определить положение точек  $A_1(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}), A_2(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}), A_3(x_{A3}, y_{A3}, z_{A3})$  в неподвижной системе координат  $OXYZ$ . Эти координаты можно найти из следующих уравнений:

$$\begin{cases} (x_{B1} - x_{A1})^2 + (y_{B1} - y_{A1})^2 + (z_{B1} - z_{A1})^2 = l_{A1B1}^2 \\ (x_{B2} - x_{A1})^2 + (y_{B2} - y_{A1})^2 + (z_{B2} - z_{A1})^2 = l_{A1B2}^2 \\ (x_{B3} - x_{A1})^2 + (y_{B3} - y_{A1})^2 + (z_{B3} - z_{A1})^2 = l_{A1B3}^2 \end{cases}$$

Имеют место еще две аналогичные системы уравнений.

Приведенные системы квадратных уравнений решаются аналитически. Для решения систем уравнений определим неизвестные дополнительные координаты – длины отрезков в правых частях этих систем уравнений. В частности, для определения длин отрезков от точек крепления на выходном звене  $A_1, A_2, A_3$  до точек  $B_1, B_2$  и  $B_3$  на основании для трех «протыкающих» штанг (рисунок 5) составим следующие уравнения:  $l_{A1B1} = l_{P1A1} - l_1, l_{A2B2} = l_{P2A2} - l_4, l_{A3B3} = l_{P3A3} - l_6$ .

Рассмотрим алгоритмы определения дополнительных координат  $l_{A1B2}, l_{A1B3}$  и  $l_{A2B3}$ .

Для нахождения длины отрезка  $l_{A1B2}$  рассмотрим  $\Delta A_1B_2P_1$  и  $\Delta B_1B_2P_1$  (рисунок 6).

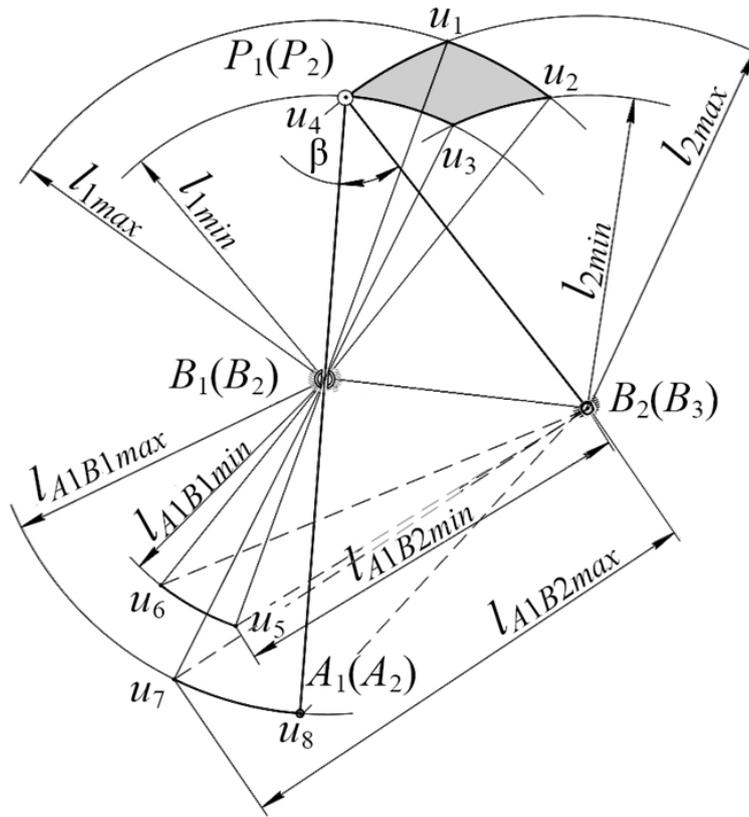


Рисунок 6.

Из  $\Delta B_1B_2P_1$  находим  $\cos \beta = \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_{B1B2}^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}$ , а затем из  $\Delta A_1B_2P_1$  определим, что

$$l_{A1B2} = \sqrt{l_{A1P1}^2 + l_2^2 - l_{A1P1} \cdot \frac{(l_1^2 + l_2^2 - l_{B1B2}^2)}{l_1}}$$

Рассматривая треугольники  $\Delta A_1B_3P_1$  и  $\Delta B_1B_3P_1$  (рисунок 5), находим длину

$$\text{дополнительной координаты } l_{A1B3} = \sqrt{l_{A1P1}^2 + l_3^2 - l_{A1P1} \cdot \frac{(l_1^2 + l_3^2 - l_{B1B3}^2)}{l_1}}$$

Далее из треугольников  $\Delta A_2B_3P_2$  и  $\Delta B_2B_3P_2$  (рисунок 6, см. буквы в скобках) определим значение дополнительной координаты

$$l_{A2B3} = \sqrt{l_{A2P2}^2 + l_5^2 - l_{A2P2} \cdot \frac{(l_4^2 + l_5^2 - l_{B2B3}^2)}{l_4}}$$

Имея значения обобщенных и дополнительных координат, можно определить положения выходного звена механизма. Таким образом, прямая задача о положениях решена.

Для анализа особых положений представим графическую интерпретацию тетраэдра с основанием  $B_1B_2B_3$  и вершиной в точке  $A_1$  с образующими ребрами  $l_{A_1B_1}$ ,  $l_{A_1B_2}$  и  $l_{A_1B_3}$  в особой конфигурации (рисунок 5, 7). Это равносильно «сплющиванию» тетраэдра с основанием  $B_1B_2B_3$  и вершиной в точке  $P_1$ . В результате пересечения окружностей радиусов  $l_{1min}$  и  $l_{1max}$ ,  $l_{2min}$  и  $l_{2max}$ , проведенных из точек  $B_1$  и  $B_2$ , образуются две области расположения точки  $P_1$  на плоскости основания тетраэдра (на рисунке 7 обозначенные соответственно  $U_L$  и  $U_R$ ).

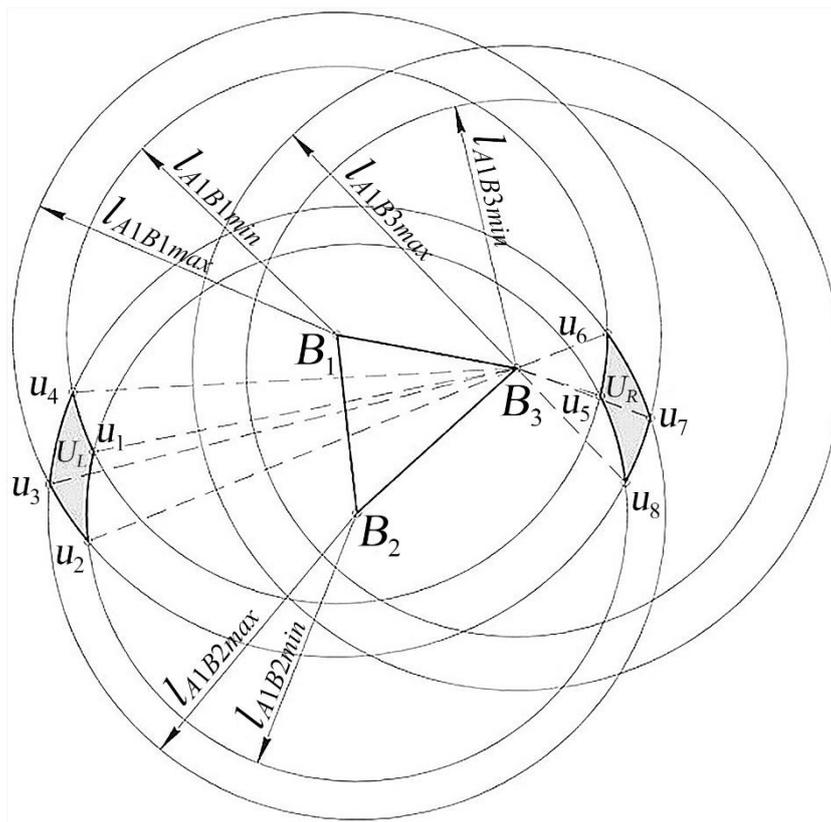


Рисунок 7.

Из точки  $B_3$  построим две окружности с радиусами  $l_{3min}$  и  $l_{3max}$ . Если они охватывают области  $U_L$  и  $U_R$ , то имеет место «сплющивание» рассматриваемого тетраэдра в плоскую фигуру. Это свидетельствует о наличии особого положения.

Измерением длин отрезков от точки  $B_3$  до точек  $u_1, u_2, u_3, u_4$  и  $u_5, u_6, u_7, u_8$  определим предельные значения координаты  $l_{3min}$  и  $l_{3max}$  для каждой области. Если заданная область изменения координаты  $l_3$  не совпадает с полученными измеренными областями  $l_{B_3u}$  ( $u=1,2,3,4$  и  $u=5,6,7,8$ ) или не пересекается с этими областями, то особых положений нет. Если такое пересечение областей изменения координат имеется, то следует корректировать длину отрезка  $l_3$  таким образом, чтобы избежать особых конфигураций для первого тетраэдра.

После этого проведем анализ вырожденности тетраэдра с основанием  $A_1B_2B_3$  и вершиной в точке  $A_2$  с образующими ребрами  $l_{A_2A_1}$ ,  $l_{A_2B_2}$  и  $l_{A_2B_3}$  (рисунок 5, 8) в плоскую фигуру.

Для этого из точек  $B_2$  и  $B_3$  следует построить concentric circles:

- из точки  $B_2$  окружности  $l_{A_1B_2min}$  и  $l_{A_1B_2max}$ ,  $l_{A_2B_2min}$  и  $l_{A_2B_2max}$ ;
- из точки  $B_3$  окружности  $l_{A_1B_3min}$  и  $l_{A_1B_3max}$ ,  $l_{A_2B_3min}$  и  $l_{A_2B_3max}$ .

В результате пересечений данных окружностей образуются две области расположения точек  $A_1$  и  $A_2$  (на рисунке 8 обозначены соответственно  $D_1$  и  $D_2$ ) на плоскости возможного «сплющивания» рассматриваемого тетраэдра.

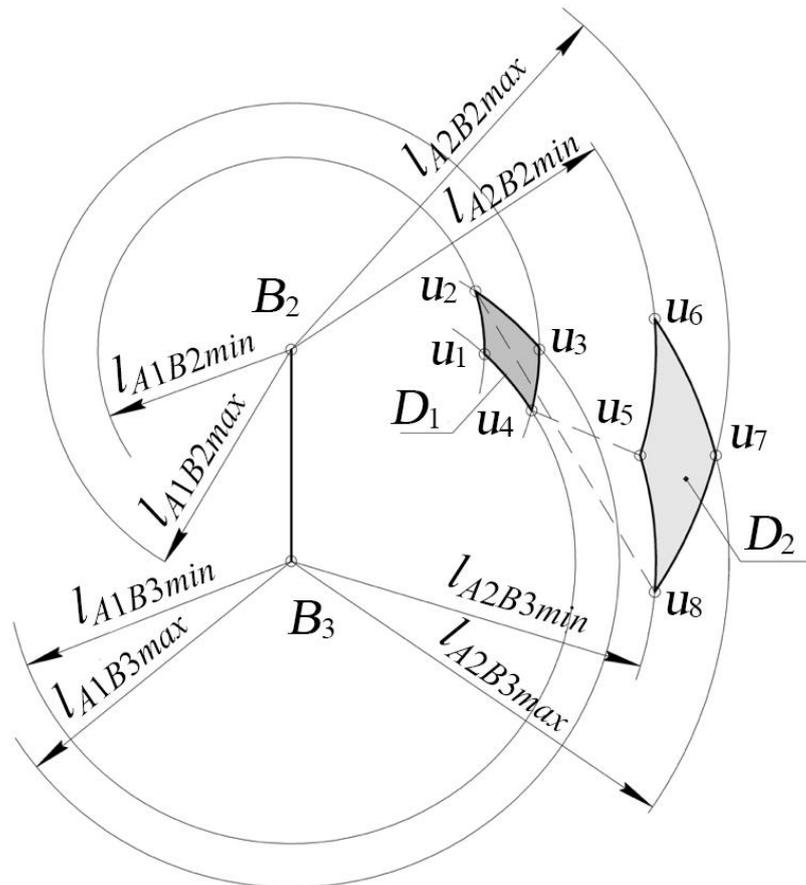


Рисунок 8.

Далее следует проверить возможность расположения отрезка, проведенного из точки  $A_1$  в точку  $A_2$ , на плоскости «сплющивания» таким образом, чтобы точка  $A_1$  расположилась в выделенной области  $D_1$ , а точка  $A_2$  - в области  $D_2$ . Если такое расположение не представляется возможным, то особого положения нет. Особое положение можно исключить, варьируя значением длин образующих данного тетраэдра.

В тетраэдре с основанием  $A_1A_2A_3$  и вершиной в точке  $B_3$ , в котором образующими ребрами являются  $l_{A_1B_3}$ ,  $l_{A_2B_3}$  и  $l_{A_3B_3}$ , графические построения аналогичны выше рассмотренному тетраэдру (рисунок 7). Таким образом, представлен метод синтеза механизма, не имеющего особых положений.

Далее рассмотрен итерационный алгоритм решения прямой задачи о положениях, который может быть применен для всех  $l$  – координатных структур. Как известно,  $l$  – координатный механизм состоит из шести соединительных цепей с одной поступательной приводной парой и с двумя сферическими неприводными парами. Пусть имеет место механизм со структурой L-321-111111 (рисунок 9). Предположим, что известно начальное положение выходного звена в неподвижной системе координат при известных значениях обобщенных  $l$  – координат.



можно решить поставленную задачу с некоторой ошибкой, уменьшение которой связано с увеличением количества итераций.

Рассмотрим пример – решение прямой задачи о положениях для механизма, положение которого определяется шестью расстояниями между точками  $P_1, P_2, P_3$  и  $B_1, \dots, B_6$ . В начальном положении механизма обобщенные координаты равны  $l_i = 2$  м, тогда матрица плюккеровых координат единичных векторов  $E_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) имеет следующий вид:

$$\Pi = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

Зададим приращение обобщенным координатам  $l_1, l_2, l_3$  и  $l_6$  на 0,1 м. Выполним одну итерацию, решая систему уравнений, в которой правая часть имеет следующий вид  $(0,1; 0,1; 0,1; 0; 0; 0,1)^T$ , и находим плюккеровы координаты кинематического винта  $W$ :

$$x = 0,05 \text{ рад}; \quad y = 0,05 \text{ рад}; \quad z = -0,1 \text{ рад}; \\ x^0 = 0; \quad y^0 = -0,1 \text{ м}; \quad z^0 = 0,05 \text{ м}.$$

В данном случае точка выходного звена  $O$  переместится на 0 и -0,1 м по осям  $OX$  и  $OY$  соответственно, и на 0,05 м по оси  $OZ$ , а выходное звено ( $\Delta P_1 P_2 P_3$ ) повернется вокруг оси с направляющим вектором  $(0,05; 0,05; -0,1)$  на угол 0,122 рад.

Перенесем винт  $W$  к точкам  $P_1, P_2, P_3$  и найдем перемещение этих точек по осям  $OX, OY$  и  $OZ$ . Изменение координат состоит из суммы перемещений от моментной части винта и момента от векторной части винта относительно точек  $P_1(0; 1; 0), P_2(1; 0; 0), P_3(-1; 0; 0)$ . В результате приращений обобщенных координат точка  $P_1$  будет иметь координаты  $(0,1; 0,9; -0,1)$ , а невязка для обобщенных координат  $l_1, l_2, l_3$  составит 0,00475 м, что составляет 4,75% от величины заданного шага. Точка  $P_2$  будет иметь координаты  $(1; -0,2; 0)$ , а невязка для обобщенных координат  $l_4$  и  $l_5$  составит 0,01 м. Точка  $P_3$  будет иметь координаты  $(-1; 0; 0,1)$  с нулевой невязкой для обобщенной координаты  $l_6$ . Таким образом, получен алгоритм решения прямой задачи о положениях для соответствующей структурной схемы (рисунок 9).

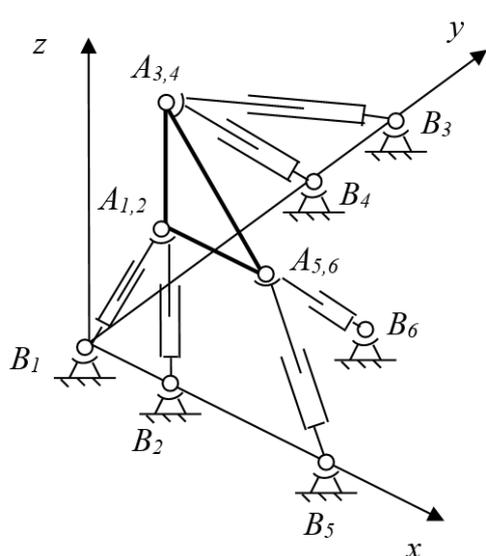


Рисунок 10.

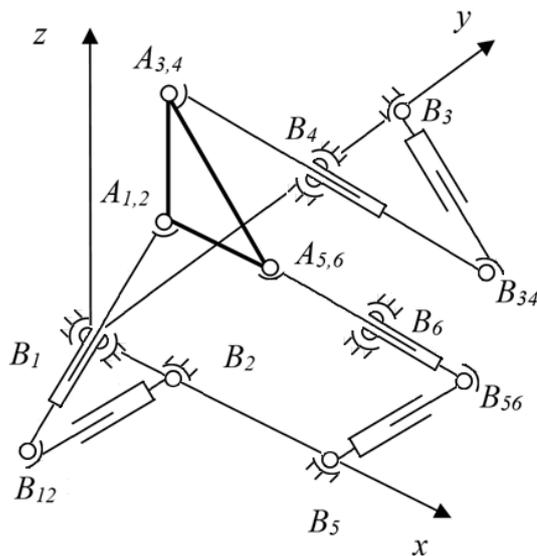


Рисунок 11.

Механизм, представленный на рисунке 10, может быть преобразован таким образом, что приводы будут расположены вне рабочей зоны (рисунок 11). Нетрудно видеть, что особые положения будут идентичны для механизмов на рисунках 10 и 11. Можно утверждать, что у этих механизмов будут идентичны и пятимерные зоны сингулярности, поскольку приращение плюккеровых координат силовых винтов одинаковое. Таким образом, свойства  $l$  – координатных механизмов, соответствующие движениям внутри зон сингулярности, могут быть распространены на те случаи, когда приводы расположены вне рабочей зоны.

**В пятой главе** представлен алгоритм определения углов давления в кинематических парах выходного звена  $l$  – координатных механизмов. Кроме того, здесь рассматриваются другие факторы, влияющие на функциональные возможности механизмов и измерительных систем и алгоритм корректировки траектории движения  $l$  – координатных механизмов для обхода особых положений.

Для механизма, приведенного на рисунке 12, задан закон изменения выходного звена в координатах Декарта-Эйлера – параболическое движение в плоскости  $XOY$  (в базовой системе координат  $OXYZ$ ):  $x = t$ ;  $y = t^2 + 1$ ;  $z = 0$ ;  $\psi = 0$ ;  $\varphi = 0$ ;  $\theta = 0$ ;  $t_0 = 2$ ;  $t_K = -2$ ;  $\Delta t = 0,01$  – шаг итерации.

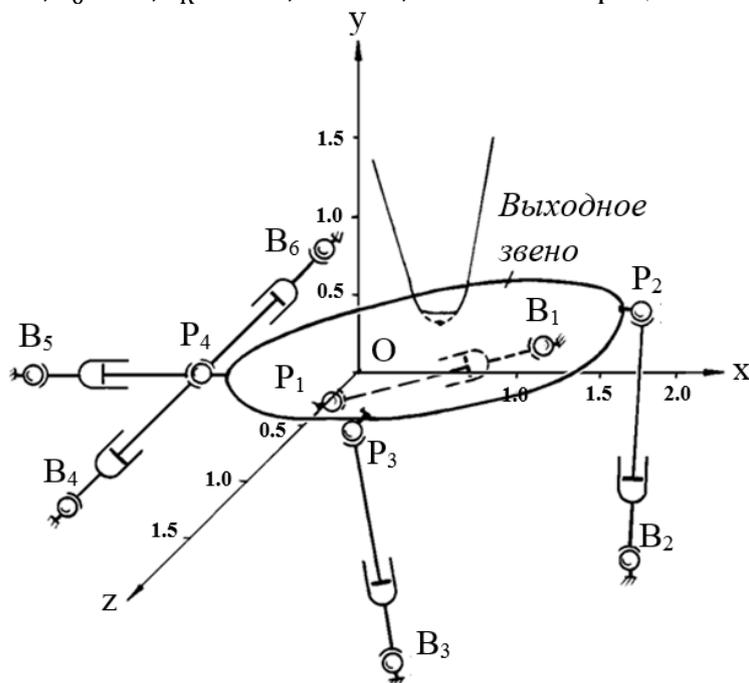


Рисунок 12.

В результате перемещения по кинематическому винту  $\Phi'$  в промежутке параметра  $-0,06 \leq t \leq 0,06$  получена новая траектория, близкая к заданной, с определителем, удовлетворяющим условию  $\Delta \Pi \geq \varepsilon$  при заданной величине  $\varepsilon = 0,015$ . Данный подход можно применить в процессе управления, когда заранее не проанализирована возможность близости к особым положениям. При этом в системе управления должно быть предусмотрено отслеживание определителя  $\Delta \Pi$ . Обход особых положений осуществляется на основе коррекции согласно приведенному алгоритму.

Решена задача определения границ рабочей зоны  $l$  – координатного механизма с учетом особых положений и допустимых углов давления. На рисунке 13 приведен пример рабочей зоны механизма, ограниченной особыми положениями (линия-1) и углом давления  $\alpha_d \leq 84^\circ$  (линия-2). Углы давления определяются таким образом,

что вначале затормаживаются пять приводов из шести и затем находится угол между вектором скорости точки крепления незаторможенного привода к выходному звену и вектором силы, расположенной по оси данного двигателя.

Затем данная процедура повторяется еще пять раз, положение считается рабочим, если никакой из шести углов давления не превышает допустимый.

Далее рассмотрена измерительная система, позволяющая определять пространственные траектории движения выходного звена какого-либо робота (рисунок 14). В данной системе используется принцип последовательной регистрации длин шести отрезков для определения пространственной траектории движения схвата робота как твердого тела. Так как робот может многократно повторить заданную траекторию, то во время первого прохода регистрируются изменения трех длин, а перед вторым проходом изменяются положения точек крепления на выходном звене робота (рисунок 14), и затем регистрируются три другие длины. В результате образуется  $l$  – координатная структурная схема 2-2-2, для которой задача о положениях имеет численное решение.

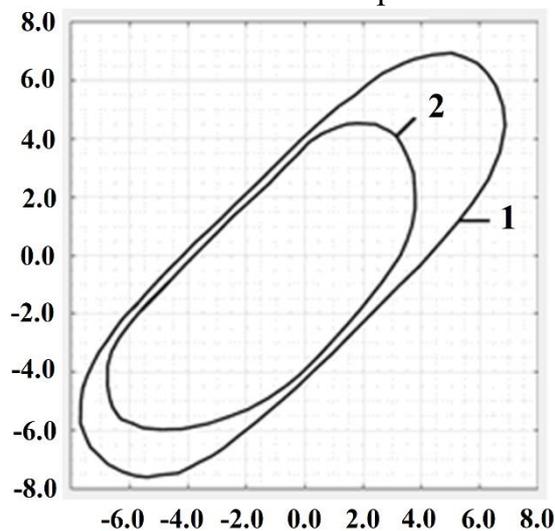


Рисунок 13.

В начальном положении выходного звена определяем положения точек  $T_i (i = 1, \dots, 6)$  (рисунок 14) – точек схода с поворотных роликов для шести тросов (три во время первого цикла, три во втором цикле). Эти точки в данном случае выполняют роль базовых (неподвижных) точек подобно  $l$  – координатным механизмам. Имея приращения длин  $\Delta l_i (i = 1, \dots, 6)$ , решаем систему линейных уравнений:

$$P\Phi = \Delta l,$$

где  $P$  – матрица, составленная из плюккеровых координат единичных векторов, направленных вдоль осей тросов в отрезках между точками  $P_m$  и  $T_i (m = 1, \dots, 6, i = 1, \dots, 6)$  (рисунок 14). Определяем винт перемещения  $\Phi = \Phi(\Delta x^0, \Delta y^0, \Delta z^0, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ , в котором координатами являются элементарные перемещения и вращения относительно осей неподвижной системы координат  $OXYZ$ , связанной с основанием.

В новом положении выходного звена определяем положение точек  $T_i$  и длины тросов между соответствующими точками  $B_i$  и  $P_i$ , с учетом огибания тросами поворотных роликов:

$$\begin{aligned} B_1 P_1 &= \cup B_1 T_1 + |T_1 P_1|, & B_2 P_3 &= \cup B_2 T_4 + |T_4 P_3|, \\ B_1 P_2 &= \cup B_1 T_2 + |T_2 P_2|, & B_3 P_3 &= \cup B_3 T_5 + |T_5 P_3|, \\ B_2 P_2 &= \cup B_2 T_3 + |T_3 P_2|, & B_3 P_1 &= \cup B_3 T_6 + |T_6 P_1|. \end{aligned}$$

Для определения невязок составляем разности:

$$\begin{aligned} B_1 P_1 - \Delta l_1 &\leq \Delta l'_1, & B_2 P_2 - \Delta l_3 &\leq \Delta l'_3, & B_3 P_3 - \Delta l_5 &\leq \Delta l'_5, \\ B_1 P_2 - \Delta l_2 &\leq \Delta l'_2, & B_2 P_3 - \Delta l_4 &\leq \Delta l'_4, & B_3 P_1 - \Delta l_6 &\leq \Delta l'_6. \end{aligned}$$

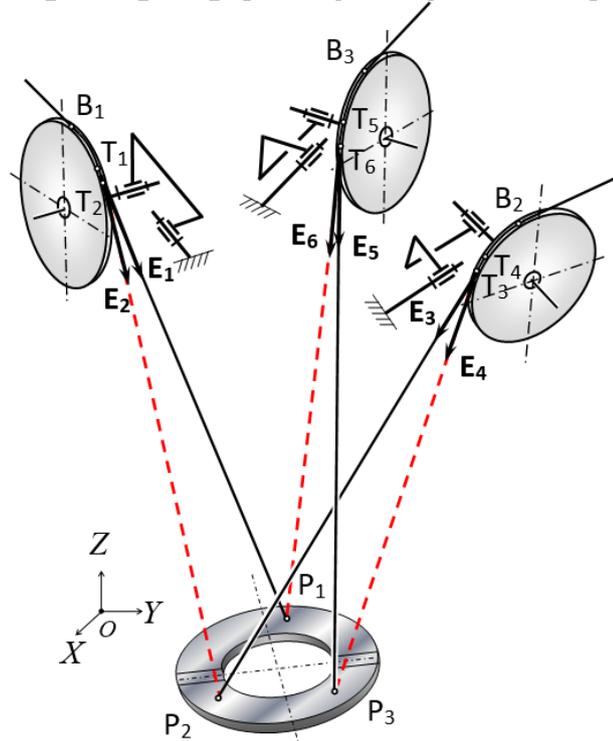


Рисунок 14.

В случае, если не выполняется условие  $\Delta l'_i \leq \varepsilon$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), где  $\varepsilon$  – заданная малая величина, то величину  $\Delta l'_i$  подставляем в уравнение  $\Pi\Phi = \Delta l$  и повторяем процедуру до выполнения условия  $\Delta l'_i \leq \varepsilon$ . Зная положение трех точек выходного звена, определяем для него координаты Декарта – Эйлера. Этот же алгоритм можно применить для манипуляционных механизмов с тросовыми приводами.

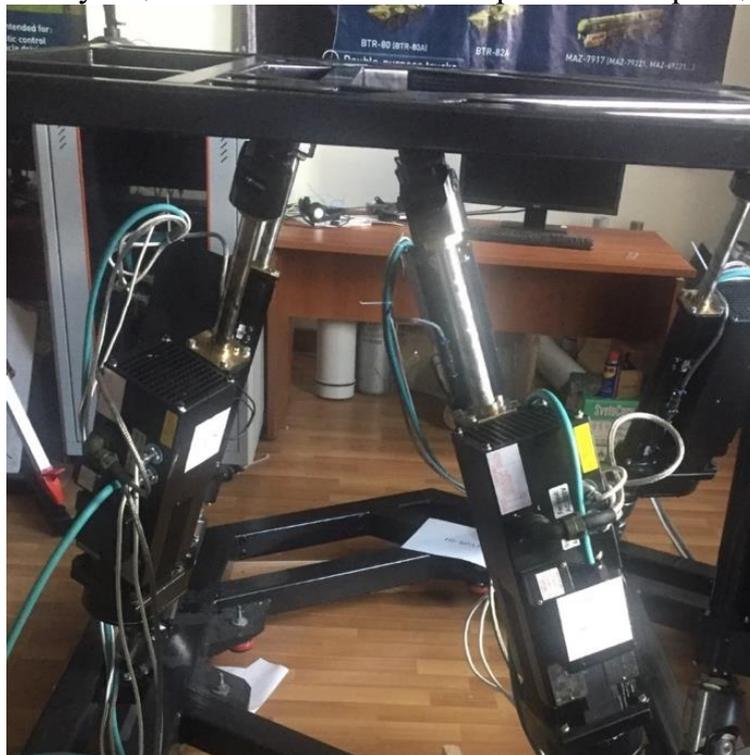


Рисунок 15.



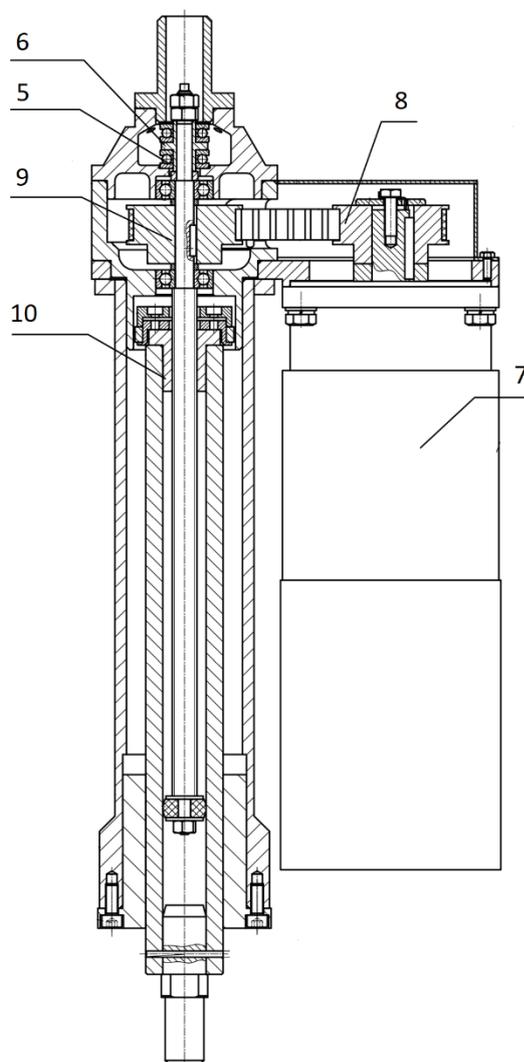


Рисунок 18

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

### *Результаты:*

- Проведены синтез и классификация структурных и кинематических схем механизмов параллельной структуры, существенно расширяющих класс  $l$  – координатных механизмов. Разработан метод структурного синтеза новых механизмов, основой которого является перенесение точек крепления приводов на промежуточные звенья.
- Получены теоретические закономерности проектирования структурных схем  $l$  – координатных механизмов, для которых имеет место аналитическое решение задач о положениях.
- Разработан новый метод кинематического анализа и решения задач о положениях для расширенного класса  $l$  – координатных механизмов, основанный на винтовом исчислении.
- Получены теоретические закономерности выбора параметров новых  $l$  – координатных механизмов, исключающие возможность наличия особых положений.
- Разработаны методы расчета точностных параметров для  $l$  – координатных измерительных систем вблизи особых положений с учетом конструктивных особенностей механизма вождения троса.

- Разработан метод кинематического анализа для вывода  $l$  – координатных механизмов из особых положений и движения внутри зоны особых положений.

- Получены базовые закономерности анализа особых положений с учетом углов давления для  $l$  – координатных механизмов, определены рабочие зоны экспериментальных образцов  $l$  – координатных механизмов и информационно-измерительных систем.

*Выводы:*

- Существенное расширение класса  $l$  – координатных механизмов достигается за счет перенесения точек крепления приводов на промежуточные звенья механизма, а также за счет расположения приводов выходного звена по разные стороны от основания.

- Аналитическое решение задач о положениях имеет место для таких структур  $l$  – координатных механизмов, в которых на основании либо на выходном звене имеются три точки крепления приводов, при этом в одной точке сходятся 3 привода, в другой два; это же свойство распространяется для модифицированных схем расширенного класса  $l$  – координатных механизмов.

- Для решения задач кинематического анализа и задач о положениях расширенного класса  $l$  – координатных механизмов эффективным средством является составление уравнений, основанных на винтовом исчислении и включающих в себя кинематические винты выходного звена и силовые винты соединительных кинематических цепей.

- Для исключения особых положений  $l$  – координатных механизмов расширенного класса нужно установить пределы изменения обобщенных  $l$  – координат на основе рассмотрения возможного пересечения окружностей, определяемых указанными предельными значениями.

- При приближении к особым положениям точность  $l$  – координатной измерительной системы существенно ухудшается. Для повышения точности целесообразно разложить кинематический винт движущегося звена на две составляющие, одна из которых взаимна линейно независимым ортам осей  $l$  – координат, а другая «ортогональна» первой составляющей.

- Для наискорейшего вывода  $l$  – координатных механизмов из особых положений нужно найти кинематический винт-градиент, при этом необходимо определить приращение ортов силовых винтов, действующих на выходное звено со стороны кинематических цепей.

- Критерием близости к особым положениям для  $l$  – координатных механизмов является недопустимо большое значение хотя бы одного из углов давления, которые находятся при затормаживании всех приводов, кроме одного, и определении направления скорости точки крепления незаторможенного привода.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и WoS:**

1. Акопян А.М., Глазунов В.А., Рашоян Г.В. Исследование траекторий движения звеньев манипулятора с учетом особых положений измерительной системы. / Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 1992. № 5. С. 83-88. (Переводная статья Akopyan A.M., Glazunov V.A., Rashoyan G.V. Investigation of

motion trajectories of manipulator sections with due account for special positions of gauge system // Problemy Prochnosti i Nadezhnos'ti Mashin. 1992. Vol. 5. pp. 83-88.)

2. Glazunov V., Kraynev A., Rashoyan G., Terekhova A., Esina M. Structure synthesis of parallel manipulators // Romansy 13. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures). 2000. Vol 422. pp. 235-240.

3. Глазунов В.А., Крайнев А.Ф., Рашоян Г.В., Быков Р.Э., Цыбин А.В. К задаче о выводе из особых положений механизмов параллельной структуры. / Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 2001. № 6. С. 70-75. (Переводная статья Glazunov V.A., Krajnev A.F., Rashoyan G.V., Bykov R.E., Tsybin A.V. On the problem about disposal of the parallel structure mechanisms from particular positions // Problemy Mashinostraeniya i Nadezhnos'ti Mashin. 2001. Vol. 6. pp. 70-75.)

4. Glazunov V., Kraynev A., Rashoyan G., Bykov R., Novikova N. Neighboring special configurations of parallel manipulators // Romansy 14. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures). 2002 Vol 438. pp. 59-66

5. Глазунов В.А., Досегаев А.Ю., Костерева С.Д., Полойко И.И., Рашоян Г.В. Критерии динамического и кинематического синтеза механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 1. С. 3-12. (Переводная статья Glazunov V.A., Dosegaev A.Yu., Kostereva S.D., Poloiko I.I., Rashoyan G.V. Criteria of dynamic and kinematic synthesis of parallel mechanisms // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2009. Vol. 38 (1). pp. 1-8.)

6. Глазунов В.А., Аракелян В., Бриот С., Рашоян Г.В. Скоростные и силовые критерии близости к сингулярностям манипуляторов параллельной структуры. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 3. С. 10-17. (Переводная статья Glazunov V.A., Arkaelyan V., Briot S., Rashoyan G.V. Speed and force criteria for the proximity to singularities of parallel structure manipulators // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2012. Vol. 41. № 3. pp. 194-199.)

7. Рашоян Г.В., Ласточкин А.Б., Глазунов В.А. Кинематический анализ пространственного механизма параллельной структуры с круговой направляющей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 2. С. 20-26. (Переводная статья Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic analysis of a spatial parallel structure mechanism with a circular guide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. № 7. pp. 626-632.)

8. Rashoyan G.V., Skvortsov S.A., Aleshin A.K., Slavutin M.F., Sheptunov S.A. Analysis of special positions of parallel structure mechanisms for aggressive media // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS. 2016. № 7751948 pp. 160-163.

9. Алешин А.К., Глазунов В.А., Оффер Ш., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Ласточкин А.Б. Анализ элементарных перемещений манипулятора параллельной структуры с круговой направляющей на основе дифференцирования уравнений связей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 17-21. (Переводная статья Aleshin A.K., Glazunov V.A., Rashoyan G. V., Skvortsov, S.A.,

Lastochkin, A.B., Shai O. Infinitesimal displacement analysis of a parallel manipulator with circular guide via the differentiation of constraint equations // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. Vol. 45. № 5. pp. 398-402.)

10. Алешин А.К., Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Оффер Шаи. Анализ кинематических винтов, определяющих топологию сингулярных зон роботов параллельной структуры // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. № 4. С. 3-8. (Переводная статья Aleshin A.K., Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Shai O. Analysis of kinematic screws that determine the topology of singular zones of parallel-structure robots // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. Vol. 45. № 4. pp. 291-296.)

11. Ларюшкин П.А., Рашоян Г.В., Эрастова К.Г. Об особенностях применения винтового исчисления для оценки близости кособым положениям механизмов параллельной структуры // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. №4. С. 39-45. (Переводная статья Laryushkin P.A., Erastova K.G., Rashoyan G.V. On the features of applying the theory of screws to the evaluation of proximity to specific positions of the mechanisms of parallel structure // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol 46. № 4. pp. 349-355.)

12. Пащенко В.Н., Шарапов И.В., Рашоян Г.В., Быков А.И. Построение рабочей зоны манипуляционного механизма совместного относительного манипулирования // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017. №3. С. 11-17. (Переводная статья Pashchenko V.N., Bykov A.I., Sharapov I.V., Rashoyan G.V. Construction of a working area for the manipulation mechanism of simultaneous relative manipulation // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46. № 3. pp. 225-231.)

13. Rashoyan G.V., Shalyukhin K.A., Gaponenko E.V. Development of structural schemes of parallel structure manipulators using screw calculus // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327 (4). №. 042090.

14. Рашоян Г.В., Алешин А.К., Скворцов С.А., Левин С.В., Антонов А.В., Шалюхин К.А. Задачи кинематического анализа и особых положений механизмов роботов параллельной структуры // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2018. № 4. С. 11-18. (Переводная статья Shalyukhin K.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Skvortsov S.A., Levin S.V., Antonov A.V., Problems of Kinematic Analysis and Special Positions of Mechanisms of Robots with Parallel Structure // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. № 4. pp. 310-316.)

15. Pashchenko V.N., Meleshchenko D.I., Rashoyan G.V., Malyshev D.I., Kuzmina V.S. Decision of the direct position problem of the joint relative manipulation mechanism with five degrees of freedom // *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Vol. 23. № 4. pp. 1025-1033.

16. Антонов А.В., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Лактионова М.М. Кинематический анализ механизма параллельной структуры для работы в агрессивных средах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2018. № 2. С. 3-10. (Переводная статья Antonov A.V., Glazunov V.A., Aleshin A.K., Rashoyan G.V., Laktionova M.M. Kinematic analysis of a parallel structure mechanism for work in

extreme environments // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. № 2. pp. 121-127.)

17. Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Antonov A.V., Gavrilina L.V., Glazunov V.A., Skvortsov S.A., Shalyukhin K.A. Analysis and synthesis of parallel structure mechanism without singularities // Journal of physics: conference series. 2019. Vol. 1260 (11). № 112023.

18. Рашоян Г.В., Демидов С.М., Алешин А.К., Антонов А.В., Скворцов С.А., Шалюхин К.А. К решению прямой задачи о положениях  $l$  – координатных механизмов различного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 5. С. 18-26. (Переводная статья Rashoyan G.V., Demidov S.M., Aleshin A.K., Antonov A.V., Skvortsov, S.A., Shalyukhin, K.A. The Direct Position Problem for 1-Coordinate Mechanisms of Various Types // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. № 5. pp. 392-400.)

19. Glazunov V.A., Filippov G.S., Lastochkin A.B., Skvortsov S.A., Rashoyan G.V., Aleshin, A.K., Shaluhin, K.A. 5DOF Mechanism for Vertebral Surgery Kinematic Analysis and Velocity Calculation // Mechanisms and machine science (book series). 2019. Vol. 73. pp. 1741-1749.

20. Glazunov V.A., Filippov G.S., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A., Antonov A.V., Terekhova A.N. Velocity analysis of a spherical parallel robot // Journal of physics: conference series. 2019. Vol. 1260 (11). №. 112012

21. Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Aleshin A.K., Shalyukhin K.A., Skvortsov S.A. Structural Synthesis of Spatial 1-Coordinate Mechanisms with Additional Links for Technological Robots // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. 902. pp. 683-691.

22. Pashchenko V.N., Artemyev A.V., Antonov A.V, Rashoyan G.V., Chernetsov R.A., Ulyanov E.E. Inverse dynamics problem solution for the combined relative manipulation mechanism with five degrees of freedom // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. 154. pp. 253-263.

23. Antonov A.V., Aleshin A.K., Glazunov V.A., Rashoyan G.V., Shalyukhin K.A., Kovaleva N.L., Chernozov R. Dynamics of a new parallel structure mechanism with motors mounted on the base outside the working area // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. 154. pp. 183-195.

24. Rashoyan G., Shalyukhin K., Antonov A., Aleshin A., Skvortsov S. Analysis of the Structure and Workspace of the Isoglide-Type Robot for Rehabilitation Tasks // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. pp. 186-194.

25. Rashoyan G., Maloyan N., Antonov A., Romanov A. Synthesis of  $l$ -coordinate parallel mechanism without singularities // International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education. Springer. 2021. pp. 270-282.

26. Malyshev D., Mohan S., Rybak L., Rashoyan G., Nozdracheva A. Determination of the Geometric Parameters of a Parallel-Serial Rehabilitation Robot Based on Clinical Data // CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures. 2021. Vol. 601. pp. 556-566.

### **Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Глазунов В.А., Рашоян Г.В. Вывод  $l$  – координатных манипуляторов из особых положений // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1990. № 7. С. 9-12.
2. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Модель Б.И., Рашоян Г.В., Чернов В.Ф. К решению задачи о положениях  $l$  – координатных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение, 1991, № 2, с. 100-105
3. Крайнев А.Ф., Глазунов В.А., Муницына Н.В., Рашоян Г.В. Выбор формы упругих элементов кинематических пар механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 1997. № 4. С. 26-35.
4. Глазунов В.А., Крайнев А.Ф., Рашоян Г.В., Трифонова А.Н. Планирование траекторий и построение рабочих зон механизмов параллельной структуры с учетом особых положений // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 1998. № 5. С. 50-56.
5. Глазунов В.А., Крайнев А.Ф., Рашоян Г.В., Трифонова А.Н., Есина М.Г. Моделирование зон особых положений механизмов параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 2000. № 2. С. 97-104.
6. Глазунов В.А., Новикова Н.Н., Рашоян Г.В., Нгуен Минь Тхань Оптимизация параметров механизма параллельной структуры для агрессивных сред при учете особых положений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 2. С. 102-109.
7. Глазунов В.А., Духов А.В., Шептунов С.А., Скворцов С.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В. и др. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и некоторые их применения в медицине // Качество. Инновации. Образование. 2016. Т. 2. №. 2. С. 84-88.
8. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. Перспективы развития механизмов параллельной структуры // Станкоинструмент. 2016. №. 3. С. 86-89.
9. Левин С. В., Гаврилина Л.В., Новикова Н.Н., Рашоян Г.В., Юдкин В.Ф. Разработка механизмов параллельной структуры для работы в агрессивных средах (на земле, в космосе, под водой) // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. №. 4. С. 34-40.
10. Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Шалюхин К.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в зондовой диагностике плазменных потоков // Лесной вестник/Forestry bulletin. 2019. Т. 23. №. 6. С. 88-94.

### **Патенты:**

1. Глазунов В.А., Дайч Д.М., Колискор А.Ш., Модель Б.Г., Рашоян Г.В. и др.  $l$  - координатный механизм // А.С. СССР №1563978. 1990.
2. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Левин С.В., Шалюхин К.А. Пространственный механизм с четырьмя степенями свободы с частичной кинематической развязкой // Патент России № 104505. 2011. Бюл. 14.

3. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Глазунов М.В., Ламасова А.А. Пространственный механизм с шестью степенями свободы // Патент России № 119279. 2012. Бюл. № 23.
4. Демидов С.М., Ласточкин А.Б., Глазунов В.А., Костерева С.Д., Рашоян Г.В., Дубровский В.А. Механизм с тремя степенями свободы // Патент России № 2498895. 2013. Бюл. № 32.
5. Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Левин С.В., Рашоян Г.В., Шалюхин К.А. Пространственный механизм с шестью степенями свободы // Патент России № 147057. 2014. Бюл. № 30.
6. Глазунов В.А., Ласточкин А.Б., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Шевченко Е.Ф. Пространственный механизм с шестью степенями свободы // Патент России № 160612. 2016. Бюл. № 9.
7. Алешин А.К., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Скворцов С.А. Устройство многоярусной механизированной парковки автомобилей // Патент России № 165138. 2016. Бюл. № 28.
8. Глазунов В.А., Алешин А.К., Габутдинов Н.Р., Рашоян Г.В. и др. Устройство для изменения положения модели в рабочей части аэродинамической трубы // Патент России № 2629696. 2017. Бюл. № 25.
9. Глазунов В.А., Алешин А.К., Левин С.В., Шалюхин К.А., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Шептунов С.А., Исмаилова Н.А. Портальный манипулятор параллельной структуры // Патент России № 172752. 2017. Бюл. № 21.
10. Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Левин С.В., Рашоян Г.В., Шалюхин К.А., Скворцов С.А., Бельский А.В., Гаврюшин С.С., Григорьянц А.Г. Манипулятор с пятью степенями свободы // Патент России № 182801. 2018. Бюл. № 25.
11. Орлов А.В., Глазунов В.А., Алешин А.К., Скворцов С.А., Рашоян Г.В., Шалюхин К.А., Галигерова А.С. Манипулятор для субмикронных перемещений // Патент России № 2679260. 2018. Бюл. 4.
12. Алешин А. К., Антонов А.В., Глазунов В.А., Демидов С.М., Рашоян Г.В. и др. Пространственный механизм с шестью степенями свободы // Патент России № 182946. 2018. Бюл. №25.
13. Алёшин А. К., Андреев В.Н., Глазунов В.А., Козловский В.А., Кондратьев И.М., Лагутин В.И., Макушин А.В., Надеждин А.Е., Рашоян Г.В., Скворцов С.А. Устройство для изменения положения модели в рабочей части аэродинамической трубы // Патент России № 2708680. 2019. Бюл. № 35.
14. Алёшин А. К., Глазунов В.А., Козловский В.А., Кондратьев И.М., Лагутин В.И., Макушин А.В., Надеждин А.Е., Рашоян Г.В. Устройство для изменения положения модели в рабочей части аэродинамической трубы // Патент России № 2708681. 2019. Бюл. № 35.
15. Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Левин С.В., Рашоян Г.В. и др. Пространственный механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы // Патент России № 191807. 2019. Бюл. № 24.

### **Публикации в других изданиях:**

1. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Трифонова А.Н. Гиперповерхности особых положений механизмов параллельной структуры // Известия Ивановского отделения Петровской академии наук и искусств. Ивановская государственная архитектурно-строительная академия. 1996. Вып. 2. С. 151-156.
2. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Трифонова А.Н. Шестикоординатный возбудитель пространственных колебаний // Динамика виброударных сильнонелинейных систем. XII Международный симпозиум. Тезисы докладов. Москва – Звенигород. 1998. С. 76.
3. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Данилин П.О., Ласточкин А.Б., Остриков И.Н., Винтовое исчисление как основа метода анализа и синтеза механизмов параллельной структуры // Международная конференция по теории механизмов и механике машин. Краснодар 2006. Сборник докладов. 2006. С. 54-55.
4. Глазунов В.А., Костерева С.Д., Рашоян Г.В., Сатовский Б.Л. Двигательные и измерительные системы параллельно-последовательной структуры // Материалы научной конференции Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. Сочи 2008. С. 90-91.
5. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Данилин П.О. К параметрической оптимизации параллельных роботов // Философско-методологические проблемы искусственного интеллекта. Материалы всероссийского междисциплинарного семинара. Пермь. Изд. Пермского гос. тех. ун-та. 2008. С. 132-141.
6. Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Дубровский В.А., Новикова Н.Н. Критерий близости к особым положениям, связанным с потерей степени свободы механизмов параллельной структуры // Проблемы механики современных машин. Материалы V международной конференции. 25-30 июня 2012 г. Улан-Удэ. Изд. ВСГУТУ. 2012. С. 32-36.
7. Glazunov V.A., Rashoyan G.V. Parallel structure mechanisms for air-dynamic tubes // International Conference on the Methods of Aero-106physical Research. August 19-25, 2012. Kazan, Russia. Abstracts. Part II. Kazan. 2012. pp. 106 -107.
8. Алешин А.К., Глазунов В.А., Рашоян Г.В., Скворцов С.А. Динамика движения пространственного механизма параллельной структуры с управлением по положению и скорости // XVIII Международный Симпозиум Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем - DYVIS-2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского: Сборник трудов (Москва-Бекасово, 17-23 мая 2015 г. / Под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Г.Я. Пановко, К.Б. Саламандра / М.: ИМАШ РАН. 2015. С. 8-13.
9. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. От первого робота до наших дней // РИТМ машиностроения. 2016. №. 2. С. 30-32.
10. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. Моделирование роботов параллельной структуры для хирургических применений в полевых условиях // Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации. 2016. С. 223-225.

11. Глазунов В. А., Алешин А.К., Антонов А.В., Рашоян Г.В. и др. Разработка фундаментальных основ структурно-геометрического синтеза, оптимизации, динамического анализа и оптимального управления совместно функционирующих роботов параллельной структуры, предназначенных для выполнения операций на земле, в воздухе, под водой, в космосе (второй этап) // Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов. 2018. С. 28-30.
12. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. Роботы и манипуляционные системы на основе механизмов параллельной структуры для выполнения групповых технологических операций // Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники в машиностроении. 2018. С. 46-47.
13. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. Особенности сингулярных положений пространственных  $l$  – координатных механизмов параллельной структуры // Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах. 2018. С. 250-254.
14. Пащенко В. Н., Мясоедов К. Р., Рашоян Г. В. Решение задач о положениях механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения. 2018. С. 135.
15. Рашоян Г.В., Шалюхин К.А., Алешин А.К. Анализ кинематики механизма параллельной структуры со свойствами кинематической развязки // Вестник научно-технического развития. 2018. № 1 (125). С. 32-37.
16. Скворцов С. А., Рашоян Г.В. и др. Особенности кинематики механизмов параллельной структуры с круговой направляющей // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения. 2018. С. 171.
17. Шалюхин К. А., Рашоян Г.В. и др. Принципы структурного синтеза механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения. 2018. С. 210.
18. Рашоян Г. В., Глазунов В. А. Структурный синтез и классификация  $l$  – координатных механизмов с учетом расположения приводов между основанием и выходным звеном // Новые механизмы в современной робототехнике. 2018. С.9-52.
19. Глазунов В. А., Рашоян Г.В. и др. Прецизионный механизм параллельной структуры для микроперемещений объектов в нанодиапазоне // Научные труды VI Международной научной конференции Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. 2019. С. 125-127.
20. Глазунов В.А., Антонов А.В., Алешин А.К., Шалюхин К.А., Филиппов Г.С., Рашоян Г.В., Скворцов С.А. Многофункциональные механизмы параллельной структуры // Специальная связь и безопасность информации: технология, производство, управление. 2019. С. 120-124.
21. Глазунов В. А., Рашоян Г.В., Антонов А.В., Скворцов С.А., Филиппов Г.С., Алешин. А.К. Задача оптимального управления траекторией движения объекта // Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах. 2019. С. 208-213.