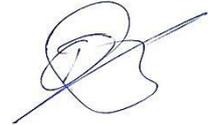


На правах рукописи



Филиппов Глеб Сергеевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ
ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ
МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.02.18

Теория механизмов и машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2019

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: **Несмиянов Иван Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, декан инженерно-технологического факультета ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», доцент кафедры «Механика»

Ермолов Иван Леонидович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБУН Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории робототехники и мехатроники

Смелягин Анатолий Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземного транспорта и механики» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), г. Курск

Защита состоится «12» ноября 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.059.05 на базе ИМАШ РАН по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМАШ РАН и на сайте <http://www.imash.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д 002.059.05.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Бозров Виктор Маирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение задач, поставленных Стратегией научно-технологического развития России, предполагает создание новых робототехнических, технологических, медицинских, исследовательских систем, основанных на эффективно спроектированных машинах и механизмах. В первую очередь речь идёт о цифровом производстве, аддитивных технологиях, роботохирургии, лазерных системах, создании новых двигателей для авиации.

Во всех этих случаях представляется эффективным использование новых механизмов параллельной структуры, отличающихся повышенными показателями по грузоподъёмности, точности, быстродействию. Однако указанные механизмы не всегда полностью отвечают поставленным требованиям в силу относительно небольших размеров рабочей зоны. Поэтому важной задачей является разработка новых механизмов параллельно-последовательной структуры, сочетающих в себе преимущества высокой нагрузочной способности и большой диапазон рабочей зоны.

Следует отметить, что для многих технических задач необходимо иметь пять степеней свободы рабочего органа. Это относится к различным многокоординатным манипуляционным системам, в том числе аддитивным технологиям, лазерным системам, системам вертебральной хирургии (хирургии на позвоночнике), исследовательским системам для изучения плазмы. В частности, для лазера, шпинделя или экструдера 3D принтера нет необходимости вращения вокруг собственной оси.

Для решения подобных задач существуют манипуляционные системы различного назначения с применением отдельных представителей механизмов параллельно-последовательной структуры, однако отсутствует общий подход к синтезу, анализу и методам исследования таких механизмов, чему и посвящена данная работа.

В связи с изложенным тема данного исследования, связанная с разработкой нового семейства многофункциональных механизмов параллельно-последовательной структуры, прежде всего с пятью степенями свободы, предназначенных для решения широкого круга технических задач, представляется актуальной.

Цель диссертационной работы заключается в разработке нового семейства механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы для решения широкого круга технических задач, связанных с многокоординатными манипуляционными системами.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие **задачи**:

1. Разработать методологию структурного синтеза механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.
2. Провести классификацию механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.
3. Провести синтез механизмов параллельно-последовательной структуры для аддитивных технологий, вертебральных и урологических операций, для исследования свойств плазмы.
4. Разработать методики кинематического и динамического анализа с учётом законов управления для синтезированных механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.
5. Разработать конструкции и провести экспериментальные исследования механизмов для аддитивных технологий, для медицинских операций, для исследования свойств плазмы.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработана методология синтеза и исследования нового семейства механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем с учётом специфики задач.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что впервые получено новое семейство механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, включающих частичный механизм параллельной структуры и частичный механизм последовательной структуры. Определены их кинематические и динамические свойства, связанные с конкретными техническими применениями.

На защиту выносятся:

1. Методология структурного синтеза механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы для решения широкого круга технических задач.
2. Классификация механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.
3. Разработанные схемы механизмов параллельно-последовательной структуры для аддитивных технологий, вертебральных и урологических операций, для исследования свойств плазмы.
4. Методики кинематического и динамического анализа с учётом законов управления для синтезированных механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.
5. Конструкции механизмов для аддитивных технологий, для медицинских операций, для исследования свойств плазмы.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что разработано семейство механизмов параллельно-последовательной структуры, которое может решать широкий круг технических задач для вертебральной и урологической хирургии, для исследования свойств плазмы, для изготовления элементов реактивных двигателей, для производственных систем, в частности аддитивной технологии. Кроме того, разработанные методики синтеза и анализа, созданные алгоритмы и программы могут найти широкое применение для многих других технических приложений.

Научные результаты диссертационной работы были использованы в ФГУП «НПО «Техномаш», в Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, в Военном учебно-научном центре военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», в Центральной клинической больнице РАН, в МАИ в рамках выполнения научно-исследовательской работы по теме: «Разработка комплекса технических требований к наноструктурированным оптическим покрытиям», выполняемой для ОКБ имени А. Люльки, в учебном процессе МАИ, в Научно-производственном центре автоматики и приборостроения имени академика Н.А. Пилюгина, в ООО «Московский центр лазерных технологий», в ООО «Дмикро», в ООО ПФ «Логос». Использование результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими документами.

Методы исследования. В работе применялись методы теории механизмов и машин, аналитической геометрии, методы математического и компьютерного моделирования, теории автоматического управления, а также элементы винтового исчисления.

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

Личный вклад заключается в постановке целей и задач исследования, синтезе схем механизмов, проведении расчётов для этих схем, определении числа степеней свободы различных схем, составлении уравнений и программ для решения задач о положениях, скоростях, динамики. В экспериментальных исследованиях лично автором разрабатывались элементы конструкций, в частности кинематических цепей частичного механизма параллельной структуры для обработки пера лопаток и вертебральных операций. Лично автором были проведены исследования рабочих зон при изменении положений точек крепления линейных приводов на выходном звене и основании.

Апробация. Основные положения доложены и обсуждены на конференциях: 15-м Международном конгрессе ИFToMM (2019, Краков, Польша); Международном военно-техническом форуме «Армия-2019» (2019, Московская область); Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки» (2019, Москва, ЦИАМ); 7-м Международном научном симпозиуме «Специальная связь и безопасность информации: технология, производство, управление» (2019, Краснодар – п. Терскол); Конференции «Проблемы развития теории механизмов и машин. Разработка научных основ инновационных технологий в станкостроении» (2019, Москва, ИМАШ РАН); Всероссийской научно-практической конференции школы-семинара «Передача, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах» (2018, Сочи); Всероссийской научно-технической конференции школы-семинара «Передача, обработка и отображение информации» (2018, Краснодар – п. Терскол); Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященной 80-летию Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН (2018, Москва, ИМАШ РАН); 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (2018, Москва, МАИ); III Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем» (2018, Москва, ГосНИИАС); 15-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016» (2016, Москва, МАИ).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 58 работ, из них 20 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК, среди которых 5 публикаций, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science, 4 коллективные монографии, 2 патента на полезную модель, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 229 наименований. Объём диссертации составляет 324 страницы, включая 205 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи диссертации, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлены сведения об апробации работы, публикациях.

В главе 1 проведён анализ публикаций в области механизмов параллельной и параллельно-последовательной структур. Рассмотрены труды В. Гауфа, Д. Стюарта, К. Ханта, И.И. Артоболевского, А.Ш. Колискова, А.Ф. Крайнева, Ф.М. Диментберга, В.А. Глазунова, Л.И. Тывеса, Б.Л. Саламандры и др. Изучены различные виды таких механизмов, их структурные схемы, задачи о положениях, задачи об особых положениях, задачи динамики и другие работы.

Были также изучены работы Д. Анджелеса, М. Чеккарелли, Д. Шабла, Ф. Венгера, В. Аракеляна, Р. Клавеля, К. Конга, К. Гослена, К. Неймана и др.

В главе 2 проведены структурный синтез и классификация механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы. Основа используемого подхода заключается в следующем. Изначально рассматривались механизмы последовательной структуры, включающие вращательные и поступательные кинематические пары. Затем одна часть кинематической цепи заменялась на механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы. Такой выбор обоснован тем, что это наиболее простые с конструктивной точки зрения механизмы, их можно располагать в различных частях упомянутой кинематической цепи с последовательным расположением звеньев. При этом учитывались условия, которые препятствуют наличию неуправляемой конечной подвижности в какой-либо части кинематической цепи.

Исходные кинематические цепи представлены в таблице 1, где буквой «в» обозначены вращательные кинематические пары, «п» – поступательные, всего 26 исходных схем.

Таблица 1

1.ввввв	2.пвввв	3.впввв	4.ввпвв	5.вввпв	6.ввввп	7.ппввв
8.пвпвв	9.пввпв	10.пвввп	11.вппвв	12.впвпв	13.впввп	14.ввппв
15.ввпвп	16.вввпп	17.пппвв	18.пппвп	19.ппввп	20.пвппв	21.пвпвп
22.пввпп	23.впппв	24.впвпп	25.впппв	26.ввппп		

После этого любая из частей упомянутых кинематических цепей с последовательным расположением звеньев заменялась на частичный механизм параллельной структуры. Таким образом, получено 78 базовых схем механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы (таблица 2). Прописные буквы означают движения, выполняемые частичным механизмом параллельной структуры, строчные – последовательной.

Таблица 2

1. 0П5В		
1.1.1. ВВВВВ	1.1.2. вВВВВ	1.1.3. ввВВВ
2. 1П4В		
2.1.1. ПВВВВ	2.1.2. пВВВВ	2.1.3. пвВВВ
2.2.1. ВПВВВ	2.2.2. вПВВВ	2.2.3. впВВВ
2.3.1. ВВПВВ	2.3.2. вВПВВ	2.3.3. ввВПВВ
2.4.1. ВВВПВ	2.4.2. вВВПВ	2.4.3. ввВВПВ
2.5.1. ВВВВП	2.5.2. вВВВП	2.5.3. ввВВП
...		

В работе рассмотрены все варианты базовых схем механизмов параллельно-последовательной структуры. Например, механизм с круговой направляющей, соответствующий варианту базовой схемы 1.1.1 таблицы 2 и выполняющий пять движений, первые три из которых определяются сферическим частичным механизмом (рис. 1).

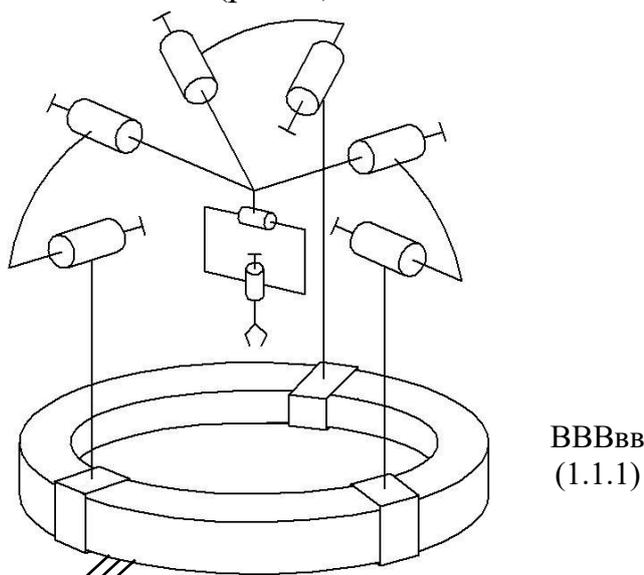


Рис. 1

В этом случае число степеней свободы определялось следующим образом: рассчитывалось число степеней свободы для частичного механизма параллельной структуры по формуле, соответствующей сферическим механизмам, затем использовалась формула Сомова-Малышева:

$$W_n = 3(n-1) - 2p_5 = 3 \cdot (8-1) - 2 \cdot 9 = 3;$$

$$W = 6 \cdot (n-1) - 5 \cdot p_5 - 3 \cdot p_3 = 6 \cdot (4-1) - 5 \cdot 2 - 3 = 5, \quad (1)$$

где W_n – число степеней свободы частичного механизма параллельной структуры, W – число степеней свободы всего механизма, n – число звеньев кинематической цепи, p_i – количество кинематических пар i -го класса.

Вариант схемы, частичный механизм параллельной структуры которой соответствует двум вращательным и одному поступательному движениям (триподу), представлен на рисунке 2.

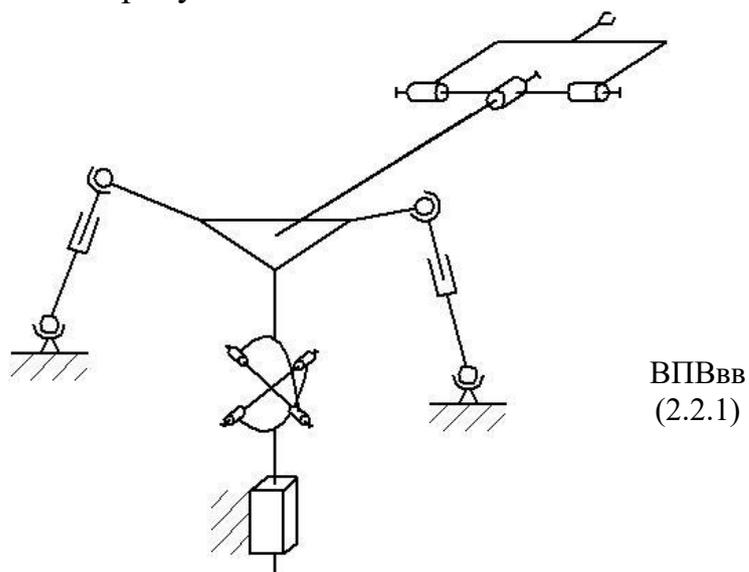


Рис. 2

В этом случае можно для всего механизма воспользоваться формулой Сомова-Малышева. При этом нужно учесть, что кинематические цепи со сферическими парами добавляют к результату по одной степени свободы за счёт имеющегося вращения вокруг соединяющей их штанги, данное вращение не влияет на степени свободы выходного звена:

$$W = 6 \cdot (n - 1) - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3 = 6 \cdot (9 - 1) - 5 \cdot 5 - 4 \cdot 1 - 3 \cdot 4 = 7 = 5 + 2. \quad (2)$$

Далее рассмотрены механизмы, в которых частичный механизм параллельной структуры соответствует двум поступательным и одному вращательному движениям (рис. 3). Это плоский механизм, который может иметь несколько кинематических цепей.

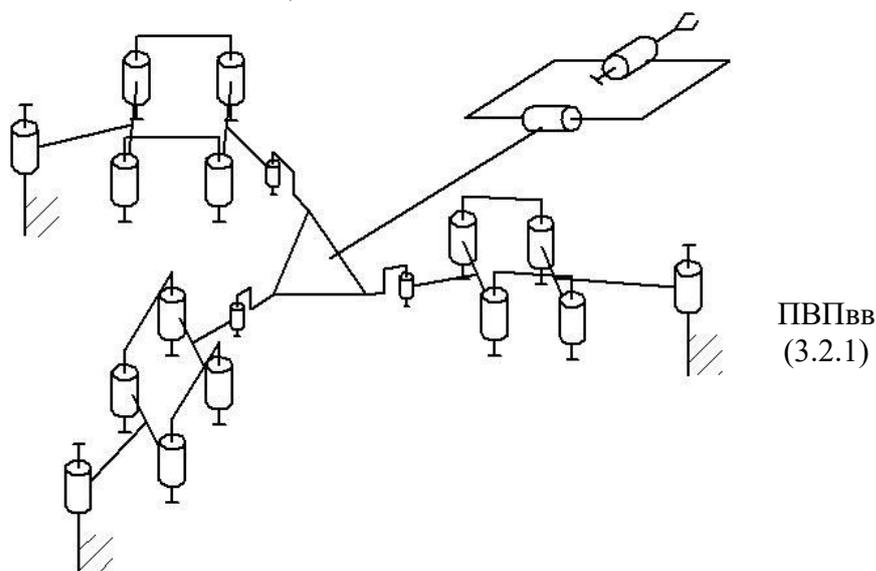


Рис. 3

Ещё один вид частичного механизма параллельной структуры – это механизмы с поступательными перемещениями выходного звена этого частичного механизма (рис. 4).

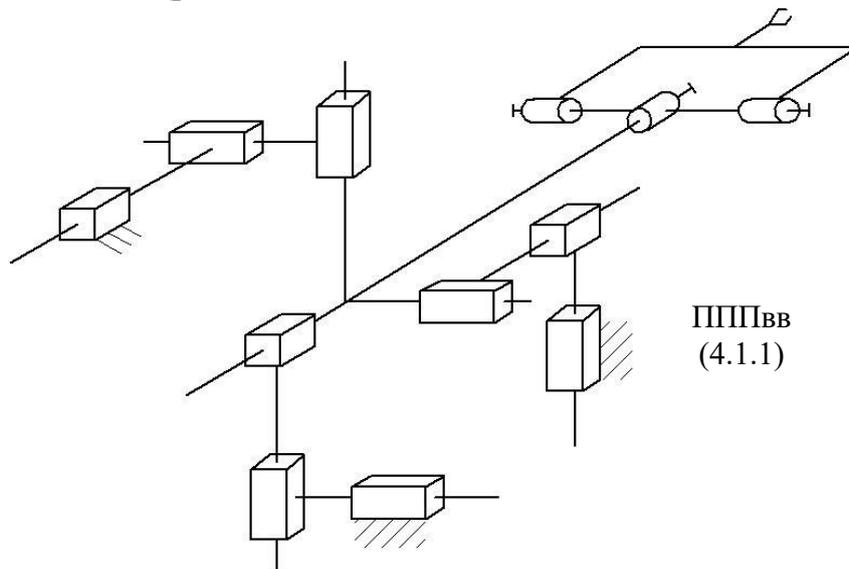


Рис. 4

Из упомянутых 78 базовых структурных схем были отобраны наиболее перспективные с точки зрения решения конкретных технических задач, для того чтобы удовлетворить специфические технические условия. Одно из них – обработка объектов, имеющих один размер больший, чем два других. Например, это может быть связано с обработкой пера лопатки реактивного двигателя, либо с проведением хирургических операций на позвоночнике (рис. 5, 6).

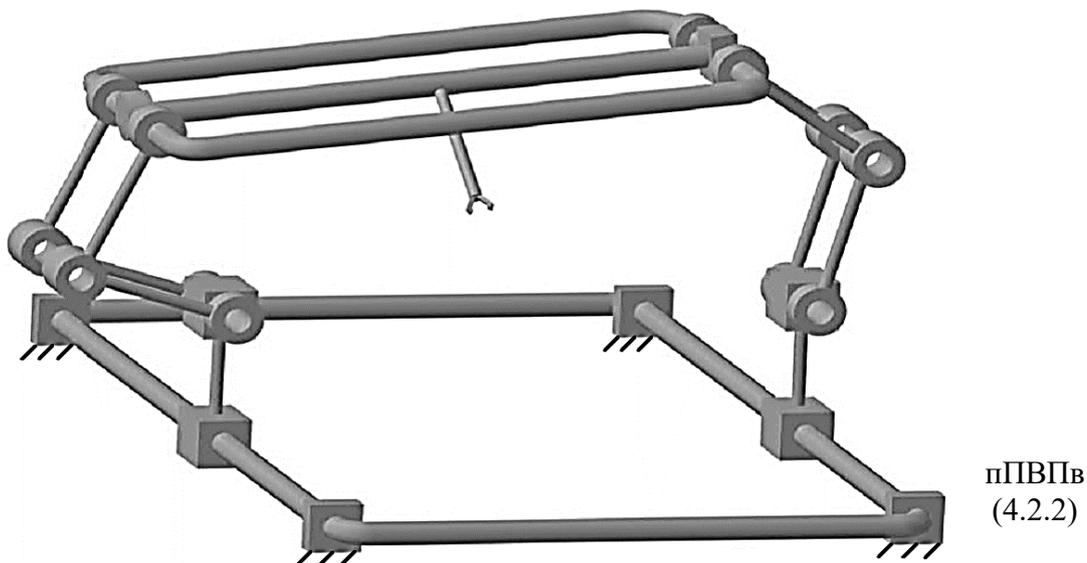


Рис. 5

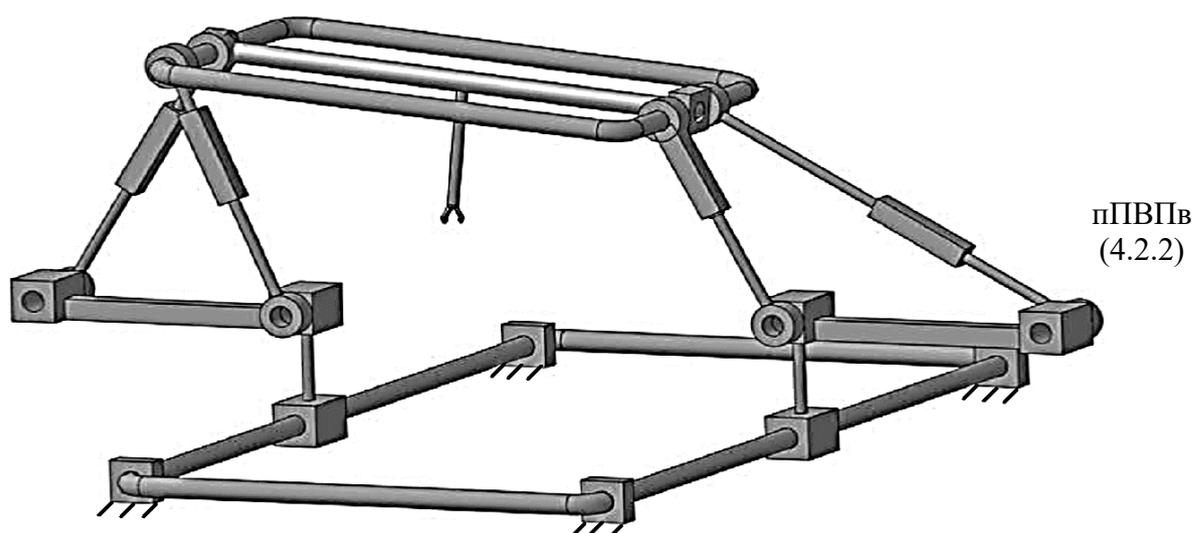


Рис. 6

Представленные на рисунках 5, 6 механизмы отличаются друг от друга тем, что в одном случае частичный механизм параллельной структуры имеет только вращательные кинематические пары, а в другом случае часть из них заменяется на поступательные кинематические пары. Число степеней свободы для обоих механизмов равно пяти. Наличие линейного двигателя, расположенного на основании, обеспечивает перемещение вдоль обрабатываемого объекта, например, вдоль позвоночника человека.

Технической задачей, обладающей собственной спецификой, является обработка объектов круглой формы, имеющих симметрию относительно одной оси. В этом случае необходимо, чтобы обрабатывающий инструмент имел возможность подхода к объекту с разных сторон под разными углами. Данная задача решалась с помощью механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, в котором одна из кинематических цепей частичного механизма параллельной структуры содержит карданный шарнир (рис. 7).

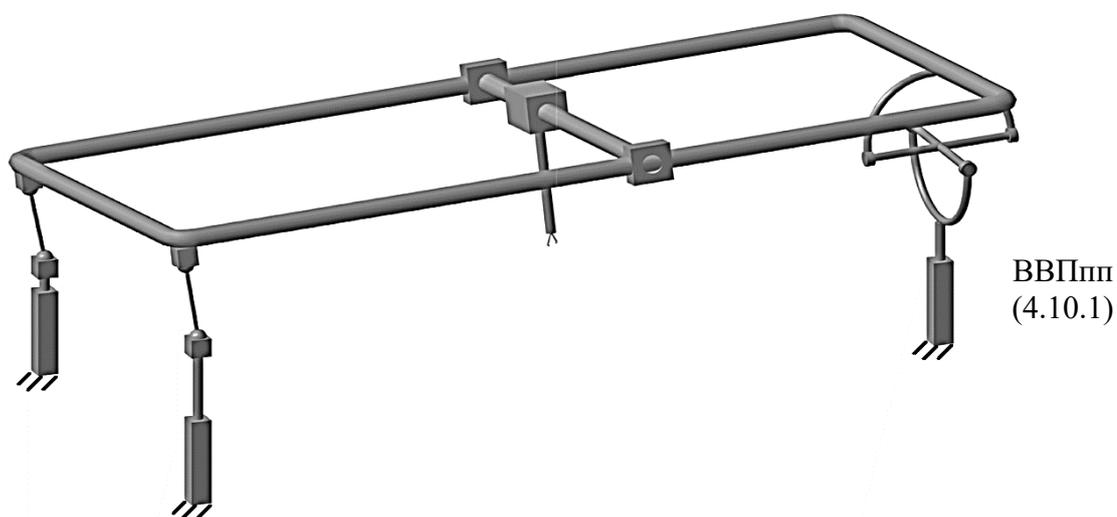


Рис. 7

Другим важным условием является обеспечение постоянства точки ввода инструмента. Эта задача возникает при проведении операций внутри брюшной полости пациента, например, при урологических операциях. Такие же требования формируются в процессе зондовой диагностики плазменных потоков, когда нужно перемещать датчик, исследующий свойства плазмы, внутри её объёма. При этом точка ввода инструмента на поверхности потока не должна меняться. В этих случаях целесообразно применить частичный механизм параллельной структуры, совершающий сферические движения, с круговой направляющей и тремя кинематическими цепями (рис. 8).

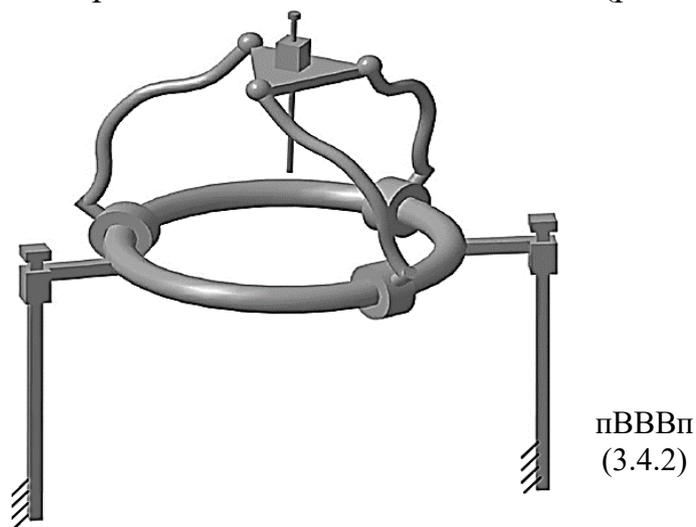


Рис. 8

Таким образом, проведённый структурный синтез и классификация показывают, что синтезированное семейство механизмов параллельно-последовательной структуры достаточно велико и может быть применено в различных областях техники.

В главе 3 решались задачи о положениях, рассматривались вопросы кинематического и динамического анализа механизмов параллельно-последовательной структуры, имеющих перспективы приложения в аддитивных технологиях, в высокоточном оборудовании, применяемом для изготовления и обработки деталей сложной формы, а также в вертебральной хирургии. Движение вдоль соответствующей координаты, которая связана с большими размерами обрабатываемого объекта, обеспечивается начальной поступательной кинематической парой, снабжённой двигателем. На ней установлен плоский частичный механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы (рис. 5).

Для данного механизма была решена обратная задача о положениях, когда известно положение выходного звена (x, y, z) , углы его ориентации (α, β) и требуется определить обобщённые координаты $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ (рис. 9).

Сначала были найдены координаты, связанные с последовательным расположением кинематических пар (q_5 и q_1), затем рассматривались обобщённые координаты, которые соответствуют частичному плоскому механизму параллельной структуры. Для этого на основании положения и ориентации инструмента была найдена точка центра рамки A_1 , что позволило определить первую и пятую обобщённые координаты. Далее, на основании угла α и координаты точки A_1 получены координаты точек A_2 и A_3 . Затем рассматривались кинематические цепи, соединяющие рамку с начальной поступательной кинематической парой и определялись обобщённые координаты в плоском механизме.

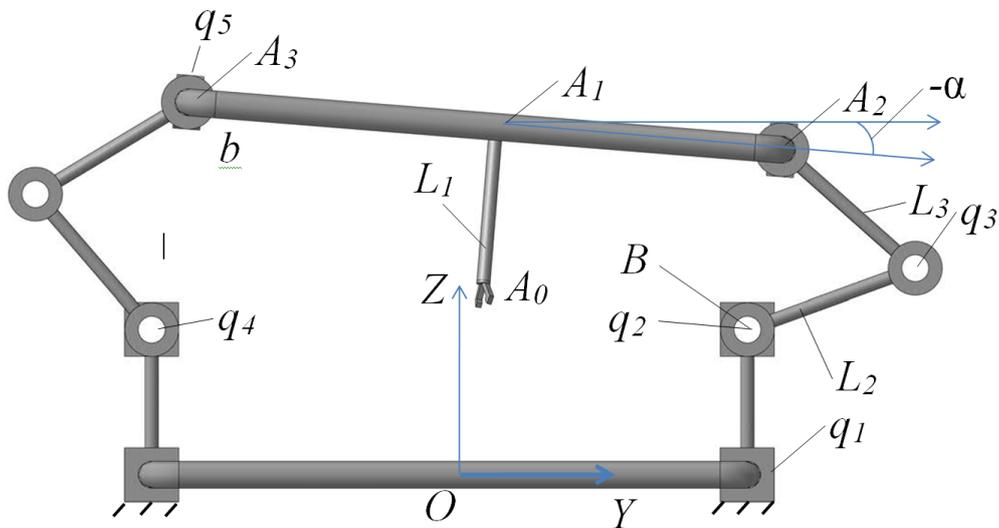


Рис. 9

Таким образом, решением обратной задачи о положениях является система функций, определяющих положение приводов в зависимости от положения выходного звена и начальных параметров задачи, ниже приведены некоторые из них:

$$q_1 = x + L_1 \cdot \sin \beta;$$

$$q_2 = \arccos \left[\frac{y + \frac{b \cdot \cos \alpha}{2} - L_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha - y_B}{\sqrt{\left(z + \frac{b \cdot \sin \alpha}{2} + L_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha - z_B \right)^2 + \left(y + \frac{b \cdot \cos \alpha}{2} - L_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha - y_B \right)^2}} \right] \pm \arccos \left[\frac{\left(z + \frac{b \cdot \sin \alpha}{2} + L_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha - z_B \right)^2 + \left(y + \frac{b \cdot \cos \alpha}{2} - L_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha - y_B \right)^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot \sqrt{\left(z + \frac{b \cdot \sin \alpha}{2} + L_1 \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha - z_B \right)^2 + \left(y + \frac{b \cdot \cos \alpha}{2} - L_1 \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha - y_B \right)^2}} \right], \quad (3)$$

где L_i – длины соответствующих звеньев; y_B, z_B – координаты точки B , b – длина рамки.

Для решения задачи о скоростях метод Д. Анджелеса и К. Гослена, предназначенный для механизмов параллельной структуры, был развит для механизмов параллельно-последовательной структуры. Суть метода в следующем. Представляя уравнения связей (3) в виде неявных функций F_i и дифференцируя их по обобщённым координатам и по координатам выходного звена, можно получить выражение вида:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \alpha} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial z} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta F_5}{\delta \alpha} & \dots & \frac{\partial F_5}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial q_1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \frac{\partial F_5}{\partial q_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет определить обобщённые скорости по заданным абсолютным и абсолютные скорости по заданным обобщённым.

Также был исследован механизм, у которого, в отличие от ранее рассмотренного, вместо части вращательных имеют место линейные кинематические пары и есть дополнительная кинематическая цепь, которая призвана исключить возможные особые положения и снизить нагрузки на все двигатели (рис. 6). Обратная задача о положениях, прямая и обратная задачи о скоростях для данного механизма решались аналогично предыдущему случаю.

Обратная задача динамики решалась для случая, когда рассматривается только частичный механизм параллельной структуры, имеющий три привода. Этот случай более тяжёлый с точки зрения работы приводов, потому что четвёртый двигатель призван несколько разгрузить другие и исключить особые положения. В качестве абсолютных координат выступали z , y , α (рис. 10).

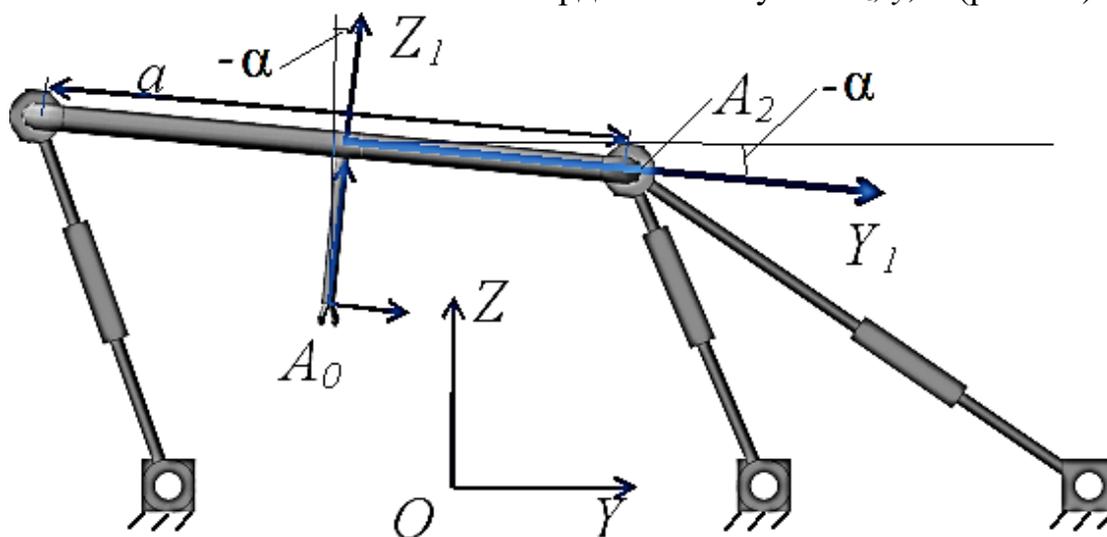


Рис. 10

Обратная задача динамики формулировалась следующим образом: требовалось найти силы (моменты) в приводах, при которых исполнительный

механизм перемещался бы по заданному закону. Принималось допущение, что вся масса сосредоточена на выходном звене.

Для решения задачи применялись уравнения Даламбера-Лагранжа:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = P_1 \frac{\partial q_1}{\partial z} + P_2 \frac{\partial q_2}{\partial z} + P_3 \frac{\partial q_3}{\partial z}; \\ m\ddot{y} = P_1 \frac{\partial q_1}{\partial y} + P_2 \frac{\partial q_2}{\partial y} + P_3 \frac{\partial q_3}{\partial y} - mg; \\ J\ddot{\alpha} = P_1 \frac{\partial q_1}{\partial \alpha} + P_2 \frac{\partial q_2}{\partial \alpha} + P_3 \frac{\partial q_3}{\partial \alpha}, \end{cases} \quad (5)$$

где m – масса выходного звена; \ddot{z} , \ddot{y} – ускорения центра масс; $\ddot{\alpha}$ – угловое ускорение; P_i – силы в приводах; J – момент инерции выходного звена; $\frac{\partial q_i}{\partial z}$, $\frac{\partial q_i}{\partial y}$, $\frac{\partial q_i}{\partial \alpha}$ – переменные коэффициенты, нелинейно зависящие от координат выходного звена; g – ускорение свободного падения.

Рассматривался закон управления, который минимизирует ошибки по скорости, по положению и по ускорению. Тогда закон изменения ускорения принимает вид:

$$\begin{cases} \ddot{z} = \ddot{z}_T + Hg \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + Hg_1 \cdot (z_T - z); \\ \ddot{y} = \ddot{y}_T + Hg \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + Hg_1 \cdot (y_T - y); \\ \ddot{\alpha} = \ddot{\alpha}_T + Hg \cdot (\dot{\alpha}_T - \dot{\alpha}) + Hg_1 \cdot (\alpha_T - \alpha), \end{cases} \quad (6)$$

где Hg, Hg_1 – коэффициенты, определяющие вид и скорость переходного процесса; $z_T(t)$, $y_T(t)$, $\alpha_T(t)$, $\dot{z}_T(t)$, $\dot{y}_T(t)$, $\dot{\alpha}_T(t)$, $\ddot{z}_T(t)$, $\ddot{y}_T(t)$, $\ddot{\alpha}_T(t)$ – требуемые координаты, скорости, ускорения; $z(t)$, $y(t)$, $\alpha(t)$, $\dot{z}(t)$, $\dot{y}(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, $\ddot{z}(t)$, $\ddot{y}(t)$, $\ddot{\alpha}(t)$ – фактические координаты, скорости, ускорения.

При этом силы в приводах определялись согласно соотношениям:

$$\begin{cases} P_1 = m \cdot (\ddot{z}_T + Hg \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + Hg_1 \cdot (z_T - z)) \cdot A_{11} + m \cdot (\ddot{y}_T + Hg \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + Hg_1 \cdot (y_T - y)) \cdot A_{22} + \\ \quad + J \cdot (\ddot{\alpha}_T + Hg \cdot (\dot{\alpha}_T - \dot{\alpha}) + Hg_1 \cdot (\alpha_T - \alpha)) \cdot A_{33}; \\ P_2 = m \cdot (\ddot{z}_T + Hg \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + Hg_1 \cdot (z_T - z)) \cdot B_{11} + m \cdot (\ddot{y}_T + Hg \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + Hg_1 \cdot (y_T - y)) \cdot B_{22} + \\ \quad + J \cdot (\ddot{\alpha}_T + Hg \cdot (\dot{\alpha}_T - \dot{\alpha}) + Hg_1 \cdot (\alpha_T - \alpha)) \cdot B_{33}; \\ P_3 = m \cdot (\ddot{z}_T + Hg \cdot (\dot{z}_T - \dot{z}) + Hg_1 \cdot (z_T - z)) \cdot C_{11} + m \cdot (\ddot{y}_T + Hg \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}) + Hg_1 \cdot (y_T - y)) \cdot C_{22} + \\ \quad + J \cdot (\ddot{\alpha}_T + Hg \cdot (\dot{\alpha}_T - \dot{\alpha}) + Hg_1 \cdot (\alpha_T - \alpha)) \cdot C_{33}, \end{cases} \quad (7)$$

где $A_{11}, A_{22}, \dots, C_{33}$, – переменные коэффициенты, нелинейно зависящие от координат выходного звена, полученные из решения задачи о скоростях.

В качестве примера был рассмотрен случай, когда требуемое движение связано только с перемещением по оси Y :

$$\begin{cases} z_T(t) = 0; \\ y_T(t) = 0,5 \cdot \sin(10 \cdot t); \\ \alpha_T(t) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Движение по оси Z и вращение по углу α должно быть равно нулю. Однако в силу наличия динамического взаимного влияния между приводами получено движение по всем трём координатам. Упомянутый ранее закон управления позволяет достаточно быстро стабилизировать координаты z (рис. 11) и α .

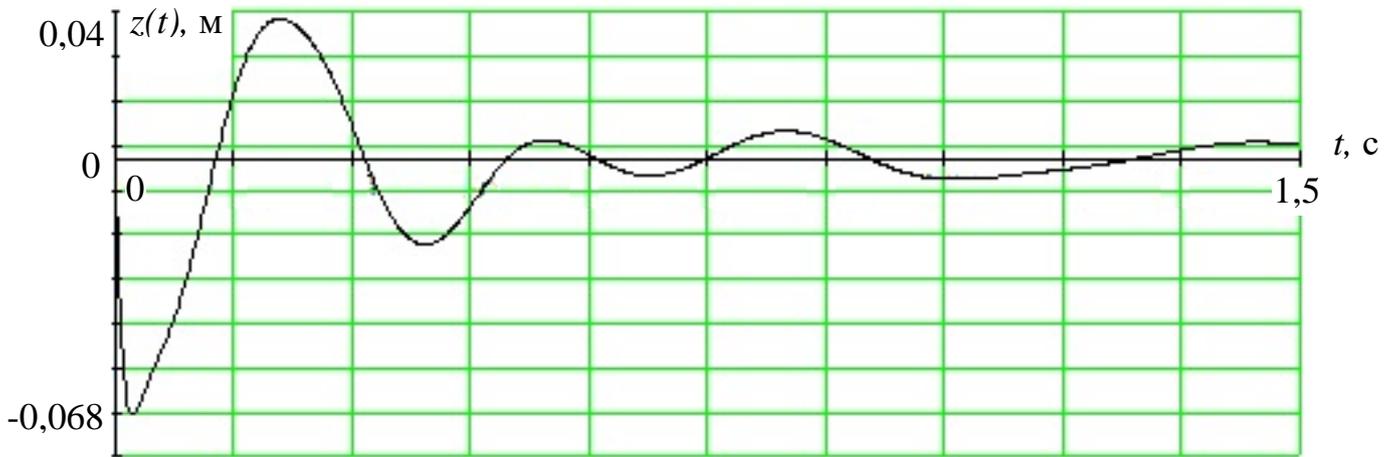


Рис. 11

В главе 4 рассматривается механизм параллельно-последовательной структуры, обеспечивающий доступ к изготавливаемому или обрабатываемому объекту с разных сторон под разными углами, часть которого представляет собой трипод (рис. 12).

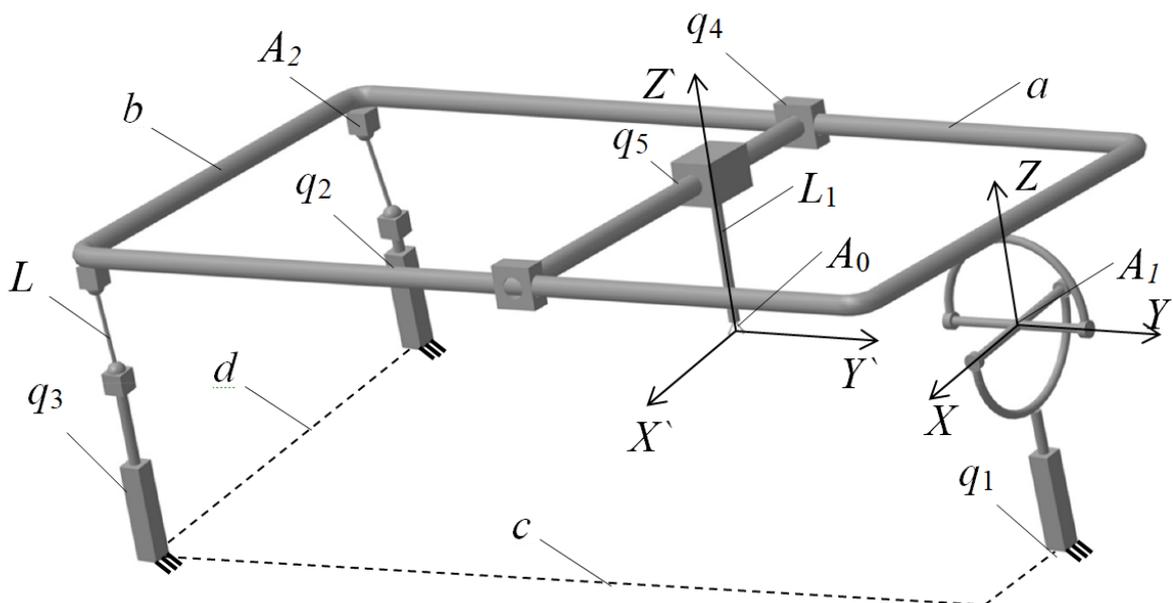


Рис. 12

Данный механизм может быть использован при разработке роботов для аддитивных технологий, применяемых в изготовлении и обработке сложных деталей авиационной и космической техники с осевой симметрией, таких, как центральное эллипсоидное тело сопла реактивного двигателя (кок).

Синтезированный механизм имеет следующее взаимное расположение элементов. На основании расположен частичный механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы (который является триподом), обеспечивающий линейное перемещение и два вращения вокруг двух перпендикулярных осей. На выходном звене данного частичного механизма расположены две последовательные поступательные кинематические пары.

Проведённые исследования формы кока реактивного двигателя показали, что синтезированный механизм подходит для изготовления данного элемента.

Рассматриваемый механизм был исследован с точки зрения решения обратной задачи о положениях. В качестве исходных данных задавалось положение выходного звена в абсолютной системе координат, а также его ориентация. Как и в других случаях, трудность заключалась в том, что при пяти степенях свободы имеется две части механизма, одна из которых имеет параллельную структуру, другая – последовательную. Эти степени свободы должны быть соответствующим образом разделены при решении задачи о положениях. Сначала рассматривались движения в частичном механизме параллельной структуры, затем перемещения в последовательной части. При этом частичный механизм параллельной структуры описывался с точки зрения преобразования координат. Определялись перемещения в линейных приводах, один из которых связан с карданным шарниром, а два других с двумя кинематическими цепями со сферическими парами. Затем рассчитывались перемещения в поступательных парах, расположенных на выходном звене частичного механизма параллельной структуры.

Другим вариантом данного механизма является схема, когда две кинематические цепи, содержащие линейные двигатели, выполнены по структуре l -координат (рис. 13). Это может быть важно с точки зрения конструкции, поскольку не всегда имеется возможность расположить два привода непосредственно на основании. Для этого варианта механизма обратная задача о положениях решалась аналогично предыдущему случаю. Но после того, как были найдены требуемые абсолютные координаты выходного звена частичного механизма параллельной структуры, имеется специфика определения обобщённых координат этого частичного механизма.

Для обоих вариантов механизмов были решены прямая и обратная задачи о скоростях по методике, описанной ранее.

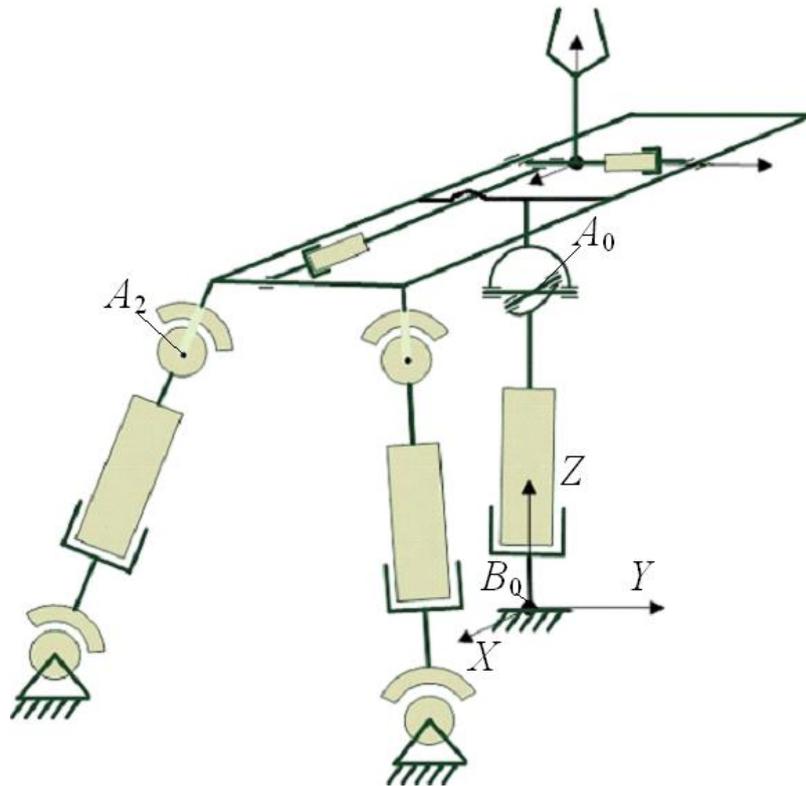


Рис. 13

Была рассмотрена обратная задача динамики для частичного механизма параллельной структуры. Её специфика заключается в том, что можно составить два динамических уравнения Эйлера, описывающих вращение вокруг двух осей, и уравнение Ньютона:

$$\begin{cases} J_{\xi} \cdot \dot{\omega}_{\xi} + (J_{\eta} - J_{\zeta}) \cdot \omega_{\eta} \cdot \omega_{\zeta} = P_1 \cdot A_{1\xi} + P_2 \cdot A_{2\xi} + P_3 \cdot A_{3\xi}; \\ J_{\eta} \cdot \dot{\omega}_{\eta} + (J_{\xi} - J_{\zeta}) \cdot \omega_{\xi} \cdot \omega_{\zeta} = P_1 \cdot A_{1\eta} + P_2 \cdot A_{2\eta} + P_3 \cdot A_{3\eta}; \\ m \cdot \ddot{z} = P_1 \cdot A_{1z} + P_2 \cdot A_{2z} + P_3 \cdot A_{3z} - m \cdot g, \end{cases} \quad (9)$$

где m – масса выходного звена; \ddot{z} – ускорение центра масс; J_{ξ} , J_{η} , J_{ζ} – моменты инерции выходного звена относительно ξ , η , ζ – осей подвижной системы координат, связанной с выходным звеном, и расположенных по главным центральным осям инерции этого звена; ω_{ξ} , ω_{η} , ω_{ζ} , $\dot{\omega}_{\xi}$, $\dot{\omega}_{\eta}$, $\dot{\omega}_{\zeta}$ – проекции угловых скоростей и ускорений на оси ξ , η , ζ ; P_1 , P_2 , P_3 – силы в приводах; $A_{1\xi}, \dots, A_{3z}$ – переменные коэффициенты, нелинейно зависящие от координат выходного звена; g – ускорение свободного падения.

Задача решалась следующим образом. Как и в остальных случаях, принималась во внимание только масса выходного звена. Задавался закон требуемого движения. Определялись требуемые значения обобщённых сил, затем находилось реальное движение выходного звена. В качестве примера был выбран случай, когда колебания должны происходить по всем трём координатам:

$$\begin{cases} z = 0,1 \cdot \sin(10 \cdot t); \\ \alpha = 0,1 \cdot \sin(10 \cdot t); \\ \beta = 0,1 \cdot \sin(10 \cdot t). \end{cases} \quad (10)$$

При этом фактические положение и скорость центра масс по координате z представлены на рисунке 14. Вид графиков объясняется наличием динамического взаимного влияния между приводами.

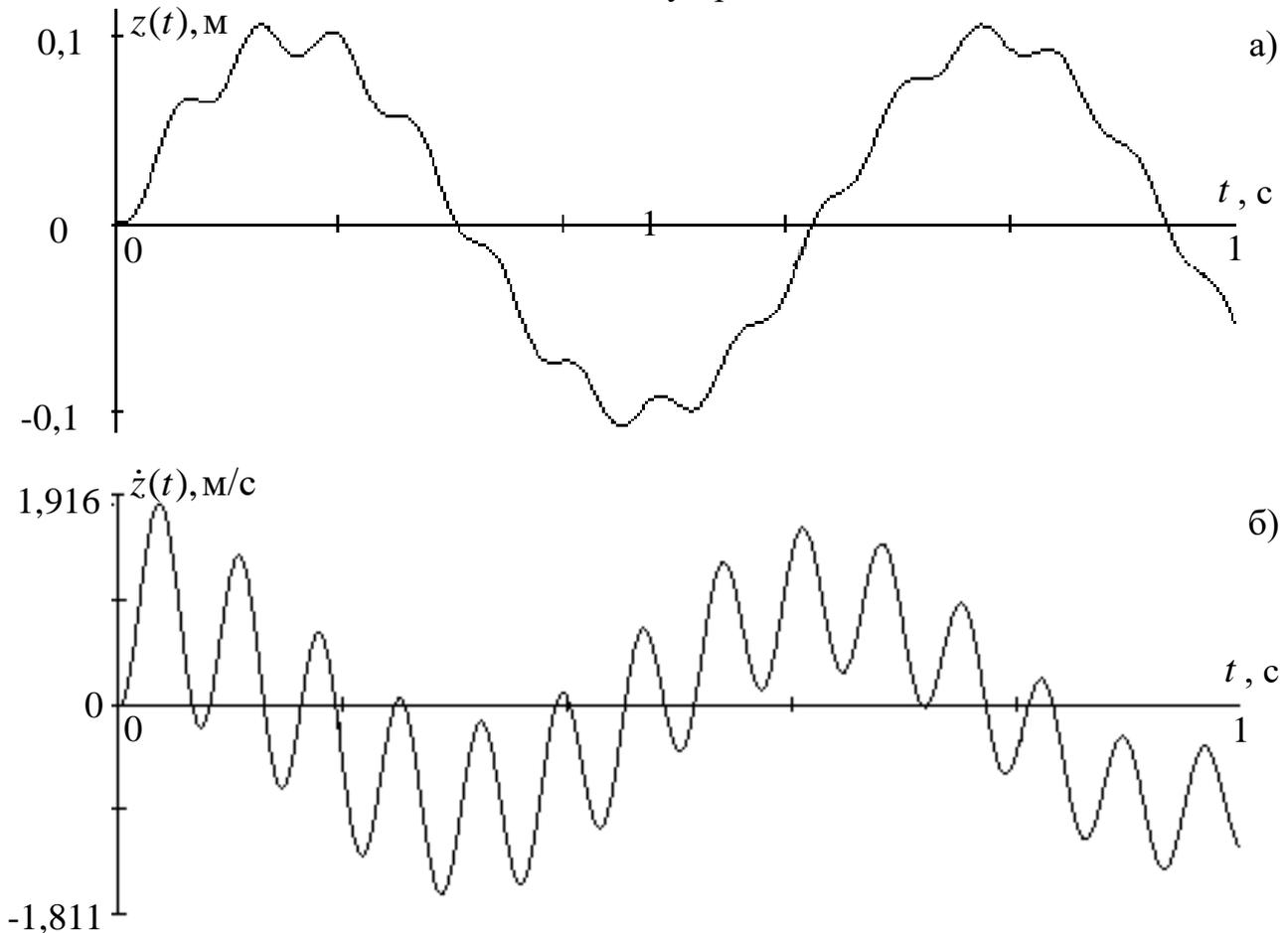


Рис. 14

В главе 5 рассмотрены синтез и анализ механизмов параллельно-последовательной структуры, обеспечивающих постоянство точки ввода рабочего органа, с частичным механизмом параллельной структуры, представляющим собой сферический механизм. Это важно для хирургических операций, в том числе урологических, а также для исследований свойств плазмы. Для более подробного исследования данной задачи была исследована структура существующего робота *daVinci*, который имеет последовательное расположение звеньев (рис. 15).

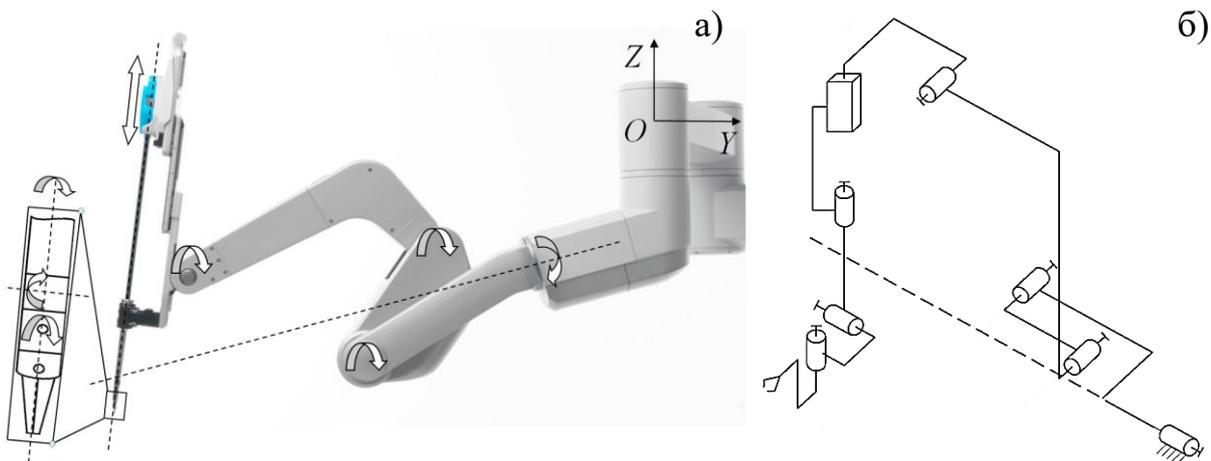


Рис. 15

Чтобы обеспечивать условие постоянства точки ввода, робот *daVinci* имеет две дополнительных кинематических пары (два дополнительных привода). Таким образом, для обеспечения шести степеней свободы инструмента используется восемь двигателей. В силу этого, данный робот имеет нерациональные массогабаритные характеристики и высокое отношение веса механизма к инструменту.

На основе предлагаемого подхода, связанного с синтезом механизмов параллельно-последовательной структуры, была предложена альтернатива роботу *daVinci* – механизм с круговой направляющей, частичный механизм параллельной структуры которого выполняет сферические движения выходного звена (рис. 16). Кроме того, в данном механизме имеются три дополнительных последовательные степени свободы – это поступательное перемещение стержня рабочего органа и два вращения инструмента.

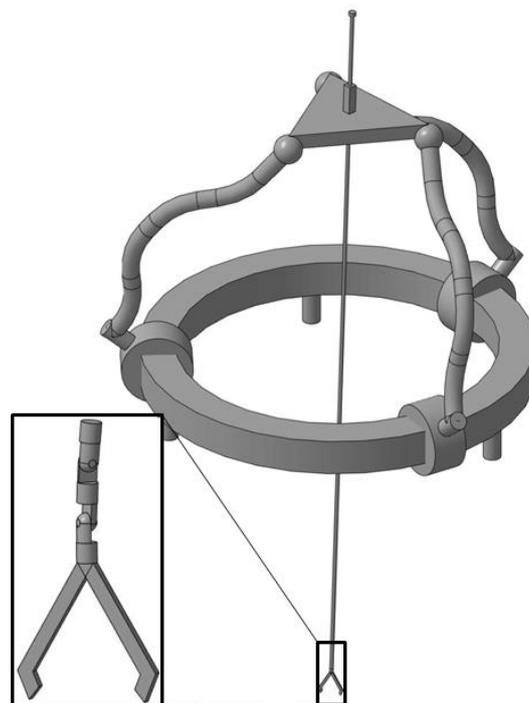


Рис. 16

Были рассмотрены некоторые характеристики предлагаемого механизма и робота *daVinci* (таблица 3). Сравнение показало, что новый механизм обладает лучшими показателями по габаритам, весу при сохранении тех же условий и функциональных возможностей.

Таблица 3

	Степени свободы	Приводы	Вес	Размер рабочей области	Позиционная точность	Увеличение рабочей нагрузки	Зависимость от импорта	Стандартный лапароскоп
<i>daVinci S</i>	6	8	≈80 кг	15см×15см×15см	1,05±±0,24мм	Нет	Да	Нет
Предлагаемый механизм	6	6	≈8 кг	15см×15см×15см	0,13±±0,03мм	Да	Нет	Да

Была рассмотрена обратная задача о положениях для того случая, когда механизм параллельно-последовательной структуры имеет пять степеней свободы. В качестве исходных данных задавались положение инструмента и его ориентация. Сначала определялись обобщённые координаты, связанные с последними двумя степенями свободы. После этого находились углы α , β , γ поворота выходного звена частичного механизма параллельной структуры, выполняющего сферические движения. Затем была рассмотрена обратная задача о положениях для частичного механизма параллельной структуры. Определялись углы поворота φ_{11} , φ_{21} , φ_{31} в первой кинематической паре каждой из трёх кинематических цепей сферического механизма параллельной структуры.

Решения прямой и обратной задач о скоростях получены с помощью описанного ранее метода.

Для решения задачи управления использовались динамические уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} J_{\xi} \cdot \dot{\omega}_{\xi} + \omega_{\eta} \cdot \omega_{\zeta} (J_{\zeta} - J_{\eta}) = M_1 \cdot A_{1\xi} + M_2 \cdot A_{2\xi} + M_3 \cdot A_{3\xi}; \\ J_{\eta} \cdot \dot{\omega}_{\eta} + \omega_{\xi} \cdot \omega_{\zeta} (J_{\xi} - J_{\zeta}) = M_1 \cdot A_{1\eta} + M_2 \cdot A_{2\eta} + M_3 \cdot A_{3\eta}; \\ J_{\zeta} \cdot \dot{\omega}_{\zeta} + \omega_{\xi} \cdot \omega_{\eta} (J_{\eta} - J_{\xi}) = M_1 \cdot A_{1\zeta} + M_2 \cdot A_{2\zeta} + M_3 \cdot A_{3\zeta}, \end{cases} \quad (11)$$

где J_{ξ} , J_{η} , J_{ζ} – главные центральные моменты инерции относительно осей ξ , η , ζ ; ω_{ξ} , ω_{η} , ω_{ζ} , $\dot{\omega}_{\xi}$, $\dot{\omega}_{\eta}$, $\dot{\omega}_{\zeta}$ – проекции угловых скоростей и ускорений на оси ξ , η , ζ подвижной системы координат (связанные с выходным звеном и расположенные вдоль главных центральных осей инерции); M_i – моменты в приводах, действующие на начальные звенья частичного механизма

параллельной структуры; $A_{1\xi}, \dots, A_{3\zeta}$ – переменные коэффициенты, нелинейно зависящие от координат выходного звена, связывающие обобщённые скорости и проекции угловой скорости выходного звена на оси подвижной системы координат.

Задача управления формулировалась аналогично рассмотренным ранее. Рассмотрен режим свободных колебаний, при котором учитывались упругости в приводах. Получены графики изменения координат выходного звена частичного механизма параллельной структуры (рис. 17).

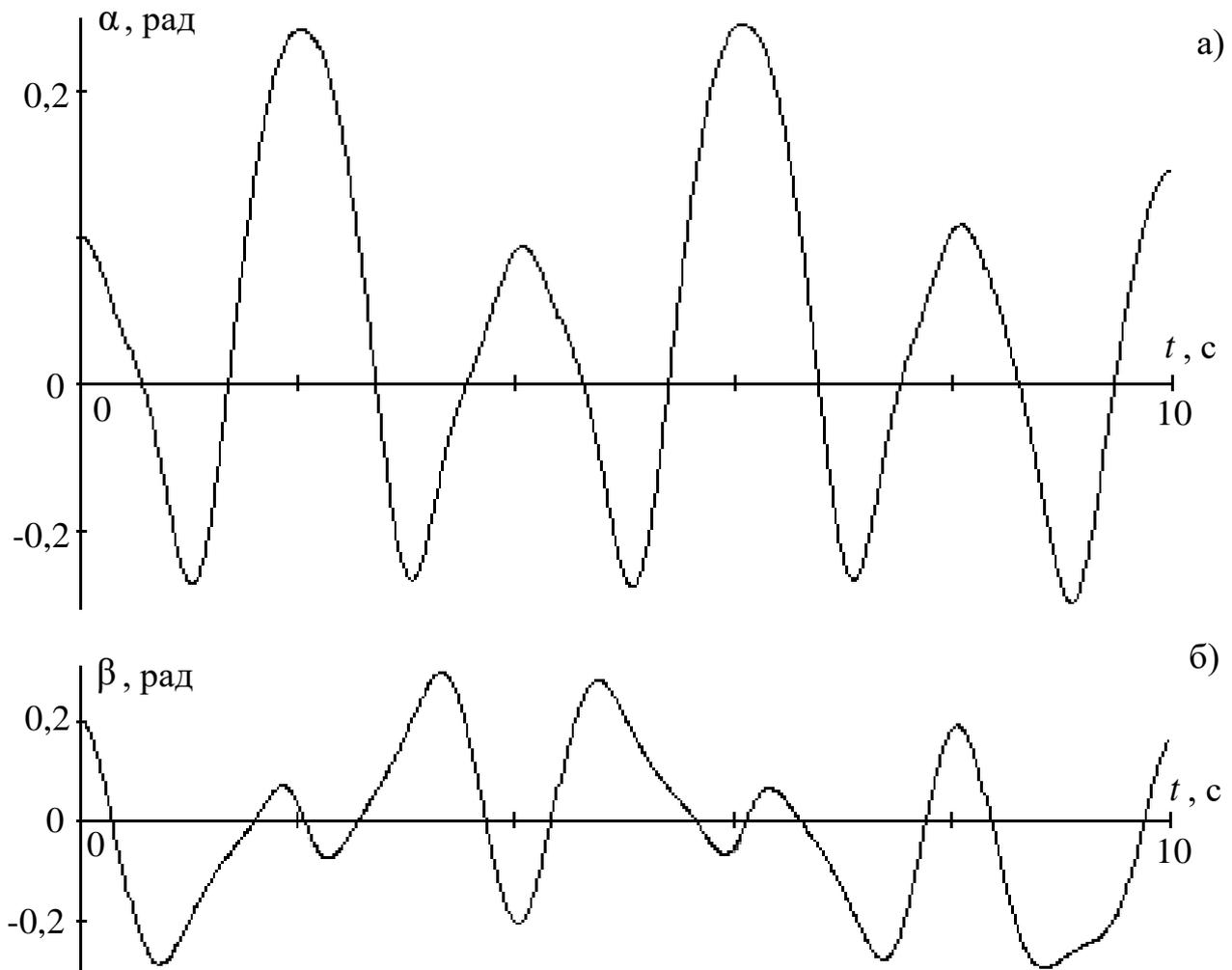


Рис. 17

Был рассмотрен случай, когда колебания носят вынужденный характер. При этом полагалось, что основание совершает колебания вокруг оси Z по закону $\varphi_z = 0,5 \cdot \sin(10 \cdot t)$ (рис. 18).

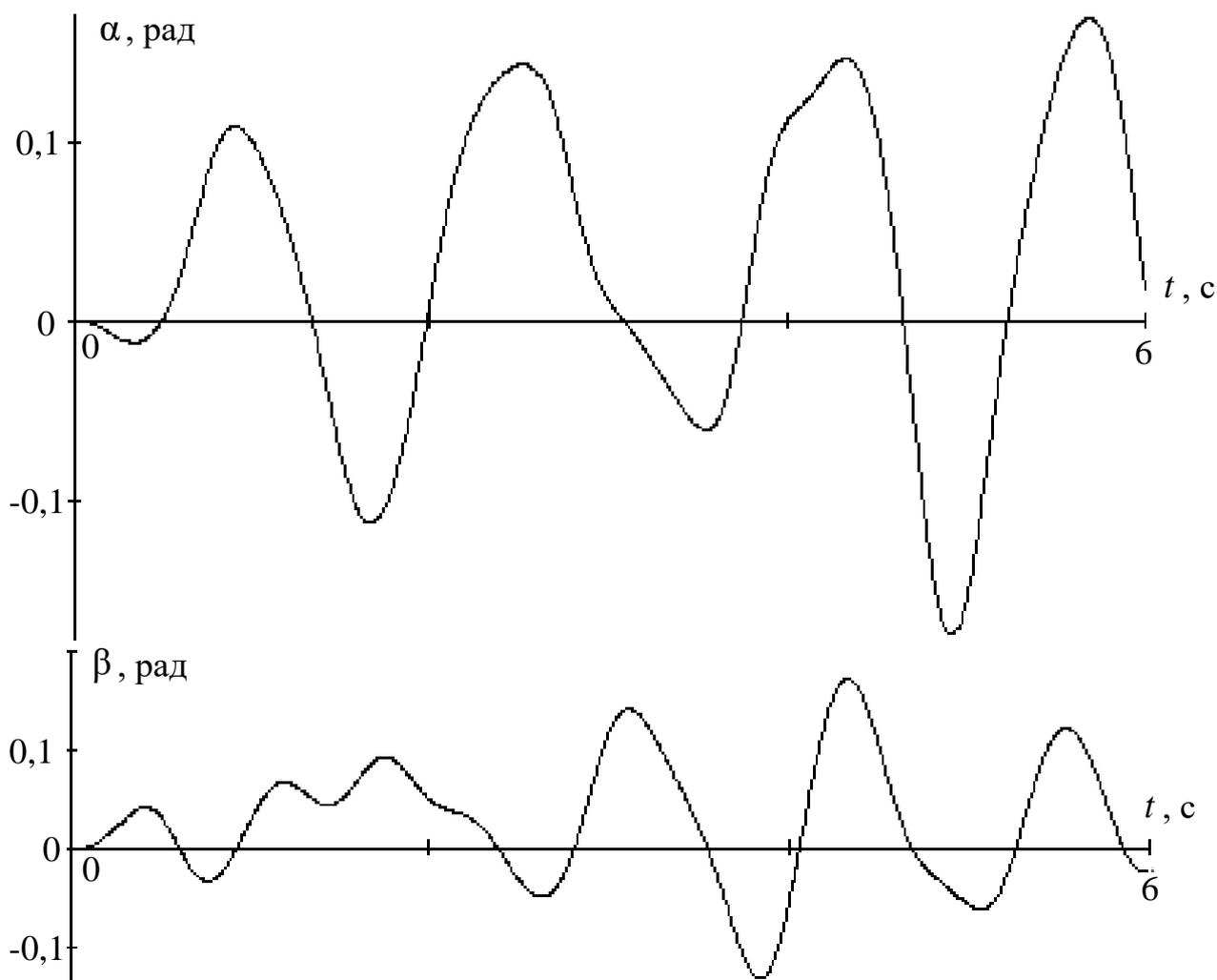


Рис. 18

В главе 6 рассмотрены особенности функционирования экспериментальных образцов механизмов параллельно-последовательной структуры, показаны возможные варианты применения данных механизмов для многокоординатных манипуляционных систем, а также рассмотрены некоторые условия, определяющие функциональные возможности данных устройств, в частности, особые положения. Выявлено, что механизмы такого рода имеют три вида особых положений: потеря одной из степеней свободы общей кинематической цепи; потеря одной из степеней свободы в частичном механизме параллельной структуры; наличие неуправляемой подвижности в частичном механизме параллельной структуры.

Кроме того, рассматривались вопросы точности данных механизмов. В частности, рассматривалась ситуация, связанная с неточностью положения выходного звена для частичного механизма параллельной структуры типа трипод с карданным шарниром, когда точки крепления шарниров на выходном звене и на основании могут иметь отклонения в своих координатах. Ставилась задача определения ошибки положения выходного звена данного частичного механизма. При этом использовался подход, основанный на линейной теории

точности и на дифференцировании уравнений связей.

Для того чтобы на практике проверить функциональные возможности, были разработаны конструкции и изготовлены соответствующие действующие образцы. В частности, манипулятор с частичным плоским механизмом параллельной структуры и различные его модификации могут быть применены для вертебральных операций либо для изготовления деталей вытянутой формы, например, пера лопаток реактивного двигателя (рис. 19, 20).

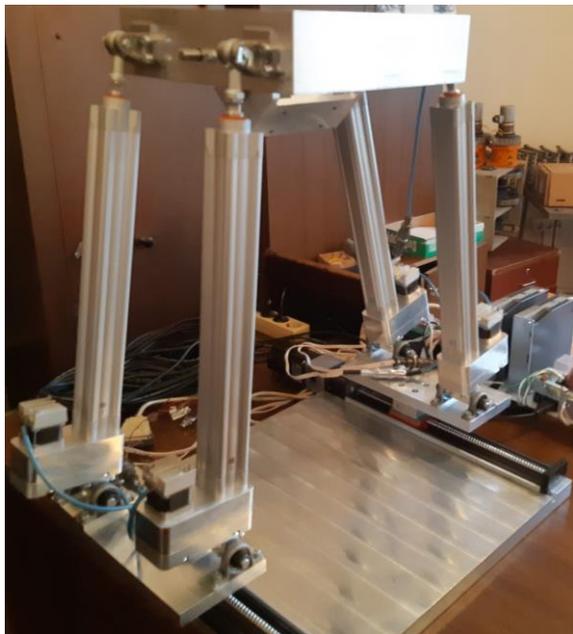


Рис. 19

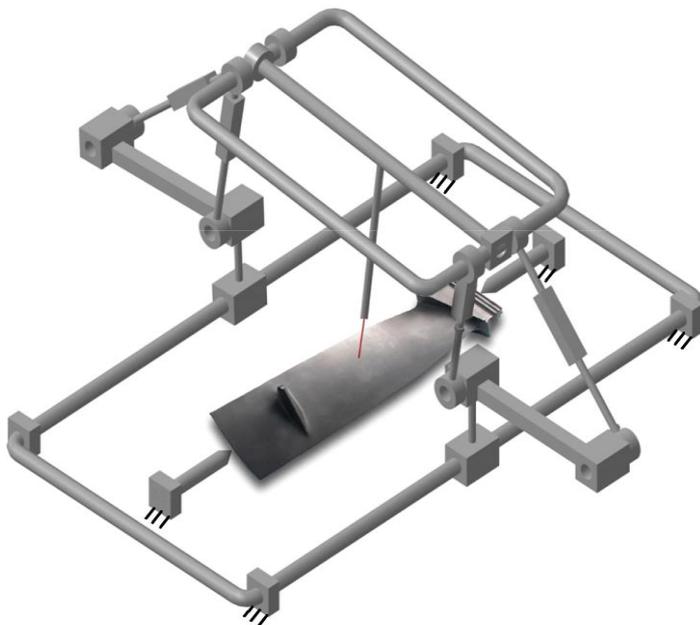


Рис. 20

Были рассмотрены различные модификации данного механизма, различающиеся положением точек крепления шарниров на выходном звене. При этом меняется нагрузочная способность механизма, а также его рабочая зона, которая была детально исследована (рис. 21, 22).

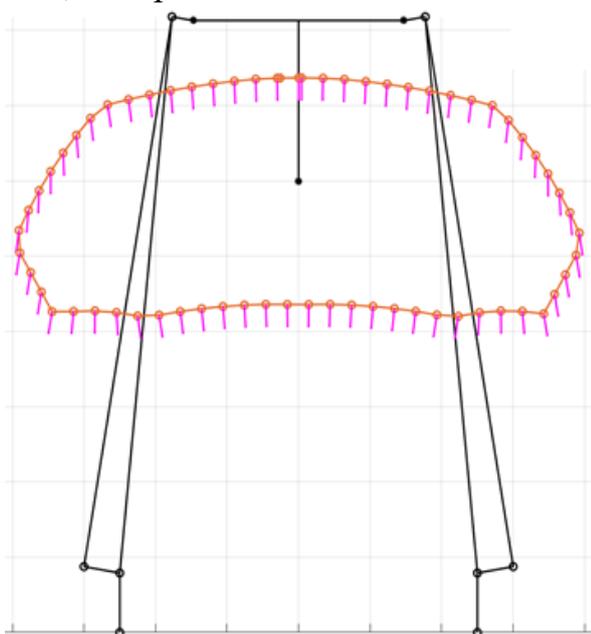


Рис. 21

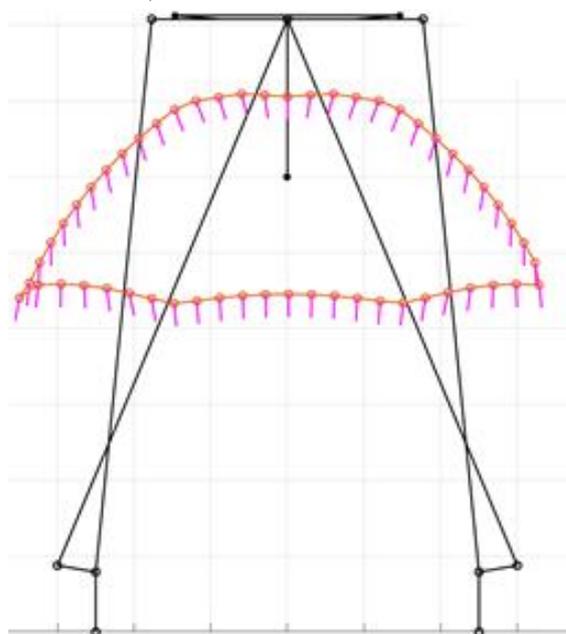


Рис. 22

На рисунке 23 приведена конструкция действующего образца синтезированного механизма, который может быть применён для операций на брюшной полости (урологических операций), а также для исследований свойств плазмы. Механизм имеет круговую направляющую, и его сферическая часть, то есть частичный механизм параллельной структуры, обеспечивает постоянство точки ввода инструмента. Были рассчитаны и определены его основные характеристики.



Рис. 23

Была разработана конструкция и изготовлен макет механизма, предназначенного для обработки объектов круговой формы с осевой симметрией. Отличительными особенностями является то, что у механизма имеется карданный шарнир, кинематические цепи со сферическими шарнирами, рама, на которой расположены две поступательные кинематические пары (рис. 24).

Предложены практические рекомендации возможных применений рассматриваемых в диссертации механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем. Было рассмотрено применение данных механизмов для изготовления коков реактивных двигателей. Различные формы коков были поставлены во взаимосвязь с параметрами механизмов параллельно-последовательной структуры, содержащих карданный шарнир.

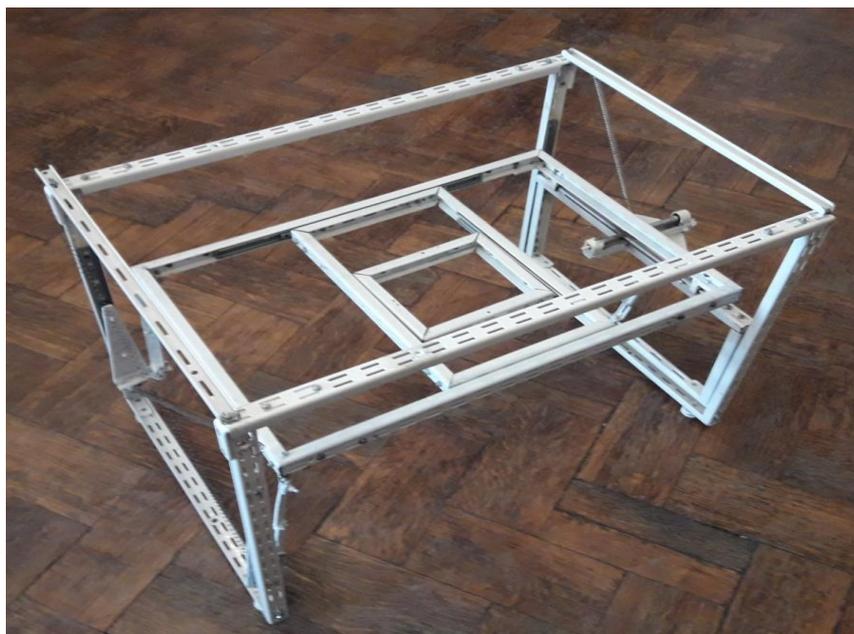


Рис. 24

При проведении зондовой диагностики плазменных потоков зонд, который помещается в плазму, также, как и хирургический инструмент, должен иметь постоянную точку ввода, поскольку в противном случае будут искажаться соответствующие измерения. В настоящее время эти работы осуществляются вручную, что связано с возможными опасными воздействиями на экспериментатора. Предлагаемый механизм с круговой направляющей позволит безопасно и качественно проводить экспериментальные исследования свойств плазмы.

Таким образом, разработанные механизмы найдут широкое применение в различных многокоординатных манипуляционных системах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации рассмотрена актуальная научная проблема разработки нового семейства механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы для многокоординатных манипуляционных систем. Основой их структурного синтеза является включение частичного механизма параллельной структуры с тремя степенями свободы в кинематическую цепь последовательной структуры.

Проведена классификация механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы. Основные классификационные признаки механизмов — расположение и вид частичного механизма параллельной структуры. Это могут быть плоские, сферические, поступательно направляющие механизма, механизмы типа трипод, и для каждому случаю

соответствует своя структурная формула. Имеет место 26 исходных схем последовательной структуры и 78 базовых схем механизмов параллельно-последовательной структуры.

Сформированное в работе новое семейство механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы обладает преимуществами механизмов параллельной и последовательной структур: сниженными массогабаритными характеристиками, высокой точностью перемещений, большой рабочей зоной.

На основе требования обработки протяженных изделий для технологических и медицинских многокоординатных манипуляционных систем синтезированы механизмы с пятью степенями свободы с частичным плоским механизмом параллельной структуры и линейным двигателем, установленным на основании. Данные механизмы пригодны для хирургических операций на позвоночнике и аддитивных технологий по изготовлению деталей сложной формы.

Для обработки изделий круглой формы с осевой симметрией синтезированы механизмы параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, включающие частичный механизм параллельной структуры типа трипод, установленный на основании. Эти механизмы целесообразно применять для изготовления коков реактивных двигателей.

Выполнение условия сохранения постоянства точки ввода инструмента для медицинских и исследовательских многокоординатных манипуляционных систем потребовало синтеза механизмов параллельно-последовательной структуры со сферическим механизмом параллельной структуры с круговой направляющей и с последовательно расположенной поступательной и вращательной кинематической парами. Сравнительный анализ робота *daVinci* и синтезированного механизма параллельно-последовательной структуры с круговой направляющей показал, что в роботе *daVinci* имеется два дополнительных привода для обеспечения постоянства точки ввода инструмента, а в предложенном механизме дополнительных приводов не требуется, что способствует уменьшению габаритов и веса устройства примерно в 10 раз. Анализ кинематики и динамики с учетом законов управления, а также экспериментальные исследования изготовленного образца показали, что синтезированный механизм параллельно-последовательной структуры с круговой направляющей целесообразно использовать для хирургических операций, а также для исследования свойств плазмы.

Для рассматриваемых в диссертации механизмов и их вариантов решены задачи о положениях и скоростях, проведён динамический анализ. Разработаны

конструкции, изготовлены действующие образцы указанных механизмов параллельно-последовательной структуры для многокоординатных манипуляционных систем.

Выявлены и описаны общие свойства механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы: в частности, их особые положения могут быть трёх видов, два из которых связаны с уменьшением числа степеней свободы и один связан с неуправляемой подвижностью. Для анализа точности целесообразно использовать дифференцирование уравнений связи.

Итак, в работе получены **результаты**:

1. Разработана методология структурного синтеза механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.

2. Проведена классификация механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.

3. Проведён синтез механизмов параллельно-последовательной структуры для манипуляционных систем различного назначения: для аддитивных технологий, вертебральных и урологических операций, для исследования свойств плазмы.

4. Разработаны методики кинематического и динамического анализа с учётом законов управления для синтезированных механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.

5. Разработаны конструкции и проведены численные и натурные экспериментальные исследования механизмов для аддитивных технологий, для медицинских операций, для исследования свойств плазмы.

По полученным результатам можно сделать **выводы**:

1. Для решения широкого круга технических задач целесообразно использовать механизмы параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы, основой структурного синтеза которых является включение частичного механизма параллельной структуры с тремя степенями свободы в кинематическую цепь последовательной структуры, на основе чего получено новое семейство механизмов параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы.

2. Основными классификационными признаками механизмов являются расположение и вид частичного механизма параллельной структуры. Имеют место 26 исходных схем последовательной структуры и 78 базовых схем механизмов параллельно-последовательной структуры.

3. Для обеспечения требования обработки протяженных объектов наиболее приемлем механизм параллельно-последовательной структуры, содержащий

линейный двигатель, установленный на основании, частичный плоский механизм параллельной структуры и вращательную пару, сопряженную с рабочим органом.

4. Для обработки круглых объектов с осевой симметрией вполне применимы синтезированные механизмы параллельно-последовательной структуры, содержащие частичный механизм параллельной структуры типа трипод, установленный на основании.

5. Для удовлетворения условия сохранения постоянства точки ввода рабочего органа целесообразно применять механизм параллельно-последовательной структуры с частичным сферическим механизмом параллельной структуры с круговой направляющей и с последовательно расположенными поступательной и вращательной кинематическими парами.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Научные публикации в рецензируемых журналах ВАК

1. Филиппов, Г.С. Синтез и анализ механизма параллельно-последовательной структуры с пятью степенями свободы для аддитивных технологий / Г.С. Филиппов // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2019. № 2. С. 4-9.

2. Филиппов, Г.С. Разработка механизмов параллельной структуры с пятью степенями свободы для ортопедических операций и аддитивных технологий / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, М.М. Лактионова, А.Н. Терехова, Л.В. Гаврилина // Машиностроение и инженерное образование, 2018. Т.4 (57). С. 2-11.

3. Диденко, Е.В. Кинематический анализ плоского механизма параллельной структуры с одной степенью свободы / Е.В. Диденко, В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2018. Т.4. С. 52-60.

4. Диденко, Е.В. Разработка плоского механизма параллельной структуры с одной степенью свободы для возбуждения колебаний по любому кинематическому винту / Е.В. Диденко, В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2018. № 11(704). С. 30-37.

5. Филиппов, Г.С. Механизм параллельной структуры с 5 степенями свободы для вертебральных операций и аддитивных технологий / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, А.Б. Ласточкин // Справочник. Инженерный журнал, 2018. Т.10. С. 55-60.

6. Филиппов, Г.С. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя, высокопрецизионных хирургических манипуляторах, зондовой диагностике плазменных потоков / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2018. Т.3. С. 121-

128.

7. Glazunov, V.A. 5DOF Mechanism for Vertebral Surgery Kinematic Analysis and Velocity Calculation / V.A. Glazunov, G.S. Filippov, A.B. Lastochkin, M. Ceccarelli, S.A. Skvortsov, G.V. Rashoyan, A.K. Aleshin, K.A. Shaluhin // Advances in Mechanism and Machine Science Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science, 2019. PP. 1741-1749.

8. Велиев, Е.И. Разработка и решение задачи о положениях механизма параллельно-последовательной структуры для хирургических операций как альтернативы роботу da Vinci / Е.И. Велиев, Р.Ф. Ганиев, В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов, А.Н. Терехова // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2019. № 4. С. 3-13.

9. Veliev, E.I. Parallel and Sequential Structures of Manipulators in Robotic Surgery / E.I. Veliev, R.F. Ganiev, V.A. Glazunov, G.S. Filippov // Doklady Physics, 2019. Vol. 64. № 3. PP. 106-109.

10. Ларюшкин, П.А. К расчёту механизмов типа Delta с линейными приводами и различным числом степеней свободы / П.А. Ларюшкин, К.Г. Эрастова, Г.С. Филиппов, С.В. Хейло // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2019. № 3. С. 37-44.

11. Ganiev, R.F. Urgent Problems of Machine Science and Ways of Solving Them: Wave and Additive Technologies, the Machine Tool Industry, and Robot Surgery / R.F. Ganiev, V.A. Glazunov, G.S. Filippov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018. Vol. 47. № 5. PP. 399-406.

12. Kotel'nikov, V.A. Electrical and Physical Parameters of Plasma Fluxes in Exhaust from a Liquid-Propellant Rocket Engine / V.A. Kotel'nikov, M.V. Kotel'nikov, G.S. Filippov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018. Vol. 47. № 6. PP. 487-492.

Коллективные монографии

13. Глазунов, В.А. Разработка новых механизмов для современных робототехнических систем, предназначенных для технологических, медицинских, аддитивных и диагностических устройств / В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов, А.А. Петраков, А.В. Царьков // Новые механизмы в современной робототехнике / под ред. В.А. Глазунова –М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. С. 131-143. 316 С.

14. Глазунов, В.А. Разработка и применение роботизированных комплексов на современных принципах для проведения технологических операций при изготовлении центрального тела сопла турбореактивного двигателя / В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов, А.Б. Ласточкин // Перспективные методы обработки деталей машин / под ред. Г.В. Москвитина –М.: ЛЕНАНД, 2019. С. 23-37. 448 С.

15. Котельников, В.А. Физические, математические и численные модели пристеночной плазмы / В.А. Котельников, М.В. Котельников, Г.С. Филиппов // АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», 2018. С. 280.

16. Котельников, В.А. Диагностика плазменных потоков с помощью ориентированных зондов. Теория и практика зондовых измерений /

В.А. Котельников, М.В. Котельников, Г.С. Филиппов // LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 340 С.

Патенты

17. Патент РФ на полезную модель № 182801 / Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Левин С.В., Шалюхин К.А., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Бельский А.В., Гаврюшин С.С., Григорьянц А.Г. Манипулятор с пятью степенями свободы. №2018114080, 17.04.2018.

18. Патент РФ на полезную модель / Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Алешин А.К., Левин С.В., Шалюхин К.А., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Гаврюшин С.С., Григорьянц А.Г., Филиппов О.С. Пространственный механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы. №2018127113, 24.07.2018.

Статьи и доклады в российских изданиях

19. Филиппов, Г.С. О тенденциях развития робототехники / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, Л.В. Гаврилина, Н.Л. Ковалева // Ритм машиностроения, 2019. № 2. С. 12-14.

20. Филиппов, Г.С. Разработка механизмов параллельно-последовательной структуры для технологических систем / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, О.С. Филиппов, Д.В. Кассин // Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки», 2019. С. 210.

21. Шалюхин, К.А. Зондовая диагностика плазменных потоков с применением механизмов параллельной структуры / К.А. Шалюхин, Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, Е.Е. Ульянов // Сборник тезисов Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», 2018. С. 211.

22. Филиппов, Г.С. Решение задачи о скоростях для механизма с пятью степенями свободы для проведения вертебральных операций / Г.С. Филиппов, А.Б. Ласточкин, Л.В. Гаврилина // Сборник тезисов Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», 2018. С. 208.

23. Скворцов, С.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры при производстве авиационных деталей / С.А. Скворцов, Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, Р.А. Чернецов // Сборник тезисов Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», 2018. С. 172.

24. Глазунов, В.А. Робототехнические системы параллельной структуры в технологиях поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи / В.А. Глазунов, О.С. Филиппов, А.С. Рослякова, Г.С. Филиппов, П.А. Швец // Сборник тезисов Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», 2018. С. 59.

25. Филиппов, Г.С. Применение механизмов параллельной структуры для снижения тепловой заметности двигателя летательного аппарата / Г.С. Филиппов, В.А. Глазунов, В.С. Николаенко // Сборник статей Материалы

Всероссийской научно-технической конференции школы-семинара «Передача, приём, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах», 2018. С. 477-482.

26. Хоперсков, А.А. Системы управления механизмами параллельной структуры, используемых при добыче полезных ископаемых / А.А. Хоперсков, О.С. Филиппов, Г.С. Филиппов // Сборник тезисов 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 2018. С. 235-236.

27. Шевкунов, В.А. Проблемы изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя / В.А. Шевкунов, Г.С. Филиппов // Сборник тезисов 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 2018. С. 122-123.

28. Глазунов, В.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя / В.А. Глазунов, Г.С. Филиппов // Сборник тезисов докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», 2018. С. 104.