

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned horizontally across the upper right portion of the page.

Мухин Кирилл Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
МЕХАНИЗМОВ СЕМЕЙСТВА «ДЕЛЬТА»**

Специальность 2.5.2. Машиноведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель: **Фомин Алексей Сергеевич**
кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Теория механизмов и структура машин» ИМАШ РАН, Москва

Официальные оппоненты: **Воробьева Наталья Сергеевна**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», г. Волгоград

Ермолаев Михаил Михайлович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Основы конструирования машин» ФГАОУ ВО Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

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

Защита состоится «06» октября 2026 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.1.075.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просьба направлять по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.075.01.

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

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Рашоян Гагик Володяевич

Актуальность темы диссертации. Современное машиностроительное оборудование и растущая сложность изготавливаемых на предприятиях изделий требуют организации доступа обрабатывающего и измерительного инструмента к заготовке с разных сторон и под разными углами, возникает необходимость задействования всех шести степеней свободы при выполнении той или иной технологической операции. При этом применение сложных по конструктиву многокоординатных механических систем не всегда является рациональным ввиду ограниченности рабочей зоны таких систем, их комплексного строения, недостаточной жесткости и сложности в управлении.

Для эффективного осуществления работы над заготовкой с возможностью ее смещения по всем шести координатам наиболее подходящими являются системы относительного манипулирования. Они включают в свой состав два или более модулей, имеющих параллельную или последовательную структуру, выходные звенья которых взаимодействуют друг с другом для выполнения поставленной задачи, благодаря чему повышается гибкость и точность реализуемых ими процессов. В станкостроении и машиностроении наиболее востребованными являются механические системы относительного манипулирования, состоящие из двух модулей, каждый из которых обеспечивает несколько степеней свободы. Такие модули могут располагаться в пространстве друг относительно друга по-разному. В рамках данной работы принимается, что модули располагаются друг над другом в вертикальной плоскости, поэтому один модуль является верхним, а другой – нижним.

Имея две, три или четыре независимые степени свободы, комбинации таких модулей могут обеспечить взаимодействие заготовки и инструмента с использованием всех шести степеней свободы. Модульная структура позволяет расширить рабочую зону, увеличить жесткость, надежность и скорость работы устройства в целом, а также помогает решить ряд технологических проблем, к которым относится, например, обработка деталей машин за один установ или обработка элементов, имеющих сложную (криволинейную) геометрию.

При постоянном совершенствовании технологических процессов возникает естественная необходимость разработки нового оборудования, в том числе устройств, основанных на системах относительного манипулирования, обеспечивающих проведение технологических операций с большими скоростями, имеющих расширенные габариты рабочих зон и увеличенные углы наклона выходных звеньев. Одним из решений данной проблемы является использование модулей параллельной структуры с дельта-подобной архитектурой.

В связи с этим проблема разработки и исследования механических систем, обеспечивающих относительное манипулирование с шестью степенями свободы, а также использующих в своем составе механизмы параллельной структуры семейства «Дельта», является в достаточной степени актуальной, а ее решение способствует созданию более эффективного технологического оборудования для различных отраслей производства.

Область исследований диссертации соответствует пунктам 1, 2 и 3 паспорта специальности 2.5.2. Машиноведение: «Синтез структурных и

кинематических схем механизмов и обобщенных структурных схем машин, оптимизация параметров»; «Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов, узлов и деталей машин»; «Методы кинематического и динамического анализа, в том числе математического моделирования, анимационного и экспериментального исследования механизмов».

Цель диссертационной работы: разработка новых шестиподвижных механических систем относительного манипулирования с применением механизмов семейства «Дельта» и анализ их функциональных свойств.

Задачи, решаемые в работе:

1. Разработать двухмодульные шестиподвижные механические системы относительного манипулирования, включающие четырехподвижный верхний модуль в виде механизма семейства «Дельта» и двухподвижный нижний модуль с возможностью неограниченного вращения.

2. Для синтезированных механических систем относительного манипулирования разработать алгоритмы кинематического исследования, включающие решение обратной задачи о положениях, задачи о скоростях, задачи о построении рабочей зоны.

3. Разработать сборочные компьютерные модели (виртуальные прототипы) синтезированных механических систем относительного манипулирования, из которых выбрать наиболее рациональную модель для дальнейшего изготовления в качестве физического прототипа.

4. Для подтверждения теоретических расчетов изготовить физический прототип выбранной модели механической системы относительного манипулирования и на его основе провести экспериментальные исследования структурных и кинематических параметров.

Научная новизна:

1. Разработаны структурные и кинематические схемы двухмодульных шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, состоящие из четырехподвижного верхнего модуля в виде механизма семейства «Дельта» и двухподвижного нижнего модуля, имеющего, в том числе, возможность неограниченного вращения выходного звена (п. 1 паспорта специальности).

2. Разработаны алгоритмы аналитического решения обратной кинематической задачи о положениях и задачи о скоростях для новых механических систем относительного манипулирования, являющиеся универсальными при заданном типе движений механизмов верхнего и нижнего модулей (п. 3 паспорта специальности).

3. Разработан аналитический итерационный алгоритм построения рабочей зоны, учитывающий интерференцию звеньев и ограничения в шарнирах верхнего и нижнего модулей при их совместном манипулировании (п. 3 паспорта специальности).

4. Разработан алгоритм проектирования шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, в которых один из модулей выполнен в виде механизма параллельной структуры семейства «Дельта» (п. 2 паспорта специальности).

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке группы новых шестиподвижных механических систем относительного манипулирования для решения технологических задач, связанных с обработкой и исследованием поверхностей элементов деталей машин. При этом в разработанных устройствах верхнему модулю обеспечивается четыре степени свободы, а нижнему – две, что является наиболее рациональным соотношением при расположении инструмента на верхнем модуле, а манипулируемой детали – на нижнем.

Создан физический прототип новой шестиподвижной механической системы относительного манипулирования на базе четырехподвижного механизма семейства «Дельта». Для созданного устройства разработаны практические алгоритмы управления движением выходных звеньев нижнего и верхнего модулей на основе решения задач кинематики. Разработана документация, содержащая компьютерные трехмерные модели и чертежи для изготовления предложенного устройства, обеспечивающая изготовление компонентов и сборку данной системы.

Результаты, полученные в диссертации, приняты к использованию на АО «НПО «Пульс»» (г. Липки, Россия) и ООО «ТОННЕЛИОН» (Москва, Россия), а также применяются в учебном процессе и при подготовке выпускных квалификационных работ обучающихся МГТУ им. Н. Э. Баумана и используются в научно-исследовательской работе сотрудников и учебном процессе при подготовке аспирантов ИМАШ РАН.

Методы исследования. В работе используются методы теории механизмов и машин, теоретической механики, аналитической геометрии и матричного исчисления, компьютерного моделирования, пакеты систем компьютерной алгебры MATLAB, Mathcad, программные комплексы САПР SolidWorks, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D, методы конструирования деталей машин и методы проведения эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка структурных схем двухмодульных шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, включающих в качестве верхнего модуля четырехподвижный механизм семейства «Дельта» и двухподвижный механизм в качестве нижнего модуля, в том числе обеспечивающий неограниченное вращение.

2. Алгоритмы кинематического анализа синтезированных механических систем относительного манипулирования, включающие решение обратной задачи о положениях, задачи о скоростях, основанные на аналитическом определении взаимосвязей между управляемыми перемещениями в приводах и перемещениями выходного звена с учетом относительного движения модулей.

3. Алгоритмы построения рабочей зоны разработанных механических систем относительного манипулирования с учетом ограничений в шарнирах модулей и с учетом интерференции их звеньев.

4. Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, полученные на основе теоретических разработок и подтверждающие адекватность предложенных аналитических алгоритмов, а также

подтверждающие возможность практической реализации выбранной конструкции физического прототипа.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением классических положений теории механизмов и машин и теоретической механики; подтверждается использованием общепринятых допущений и апробированных методик анализа структуры, кинематики и динамики механизмов; применением современного программного обеспечения; проверкой полученных результатов путем численных и натурных экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях и симпозиумах: Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», Санкт-Петербург, Россия, 2021; XIV Международный Конгресс по деревянному строительству, Санкт-Петербург, Россия, 2023; VIII Российская научная конференция «Перспективы и направления развития теории механизмов и машин», Москва, Россия, 2024; the 8th International Symposium on Robotics and Mechatronics (ISRM), о. Джерба, Тунис, 2024; IX Международная научная конференция «Перспективы и направления развития теории механизмов и машин», Москва, Россия, 2025; the 2025 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics (M³ Symposium), г. Оттава, Канада, 2025; XVIII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ), г. Тула, Россия, 2025.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора конструкций и методов анализа известных систем относительного манипулирования; в разработке структурных схем систем относительного манипулирования, синтезированных с применением механизмов семейства «Дельта»; в разработке алгоритмов решения задач обратной кинематики, алгоритмов анализа скоростей, алгоритмов построения рабочей зоны с учетом относительного взаимодействия модулей; в создании сборочных компьютерных моделей (виртуальных прототипов) новых систем относительного манипулирования и моделировании их динамического поведения с применением инструментов САПР; в разработке узлов, элементов и звеньев и сборке конструкции физического прототипа новой механической системы; в проведении натурных экспериментов с применением прототипа.

Поддержка и финансирование исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (главы 1 и 2) и грантов Российского научного фонда (РНФ) (главы 3 и 4).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 7 работ, в том числе 4 работы в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science, 1 работа в издании из списка РИНЦ и 2 работы в изданиях из списка ВАК РФ; получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 120 наименований, 7 приложений. Объем диссертации (с приложениями) составляет 184 страницы, включая 70 рисунков и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Представлена степень разработанности темы. Приведены методы исследования и обоснована достоверность полученных результатов. Приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, поддержке и финансировании исследования, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе проведен обзор известных механических систем относительного манипулирования, состоящих из нескольких модулей, установленных, как правило, на неподвижном основании и работающих совместно. На примере шестиподвижных систем, объединяющих четырех- и двухподвижные модули, рассмотрена классификация таких систем, предложенная В. А. Глазуновым, а также проанализированы возможные комбинации типов движений модулей. Примеры конструкций механических систем относительного манипулирования систематизированы по числу степеней свободы (от трех до шести) с учетом структуры модулей (последовательной, параллельной и гибридной). Рассмотрены высокоскоростные роботы для пересадки рассады, реконфигурируемые механизмы, устройства для 3D-печати, монтажа кристаллов, сварки трением, фрезерования, полирования, а также станки и медицинское оборудование. Выполнен обзор известных методов кинематического анализа механических систем относительного манипулирования. Рассмотрены методы решения прямой и обратной задач кинематики, включая аналитические подходы с использованием относительных систем координат и численные итерационные методы. Проанализированы алгоритмы построения рабочих зон с учетом относительного движения модулей и предотвращения столкновений их звеньев. Рассмотрены методы, используемые при анализе скоростей.

В главе анализируются работы А. Ф. Крайнева, В. А. Глазунова, А. В. Антонова, П. А. Ларюшкина, Л. А. Рыбак, Л. Карбонари, Ю. Фана, Д. Пислы, А. Мюллера, Ж. Лина, Х. Хуанга, Х. Лю, Д. Рус, И. Лазоглу, В. Гуо, М. Карригато, М. Чеккарелли, Б. Ху, М. Милутиновича, Ф. Гао, Ф. Се, С.-Ж. Лю, Е. Дюка, Д. Шабла, К. М. Линча, Ф. К. Парка, М. Руссо, Л. Ромданэ, С. Зеглула, Л.-В. Цая, М. А. Лариби, К. Ли, В. Е., Б. Эль-Хасавнеха, А. Госала, Д. Чжана, Д. Рейнартса, К. Гослена, Ж.-П. Мерле, Л. Ноташ, Дж. Галлардо-Альварадо и других ученых.

Рассмотрены работы, посвященные классификации, структурному синтезу и анализу механических систем относительного манипулирования. На основе проведенного анализа современного состояния исследований в данной области отмечается, что механические системы относительного манипулирования в целом изучены значительно меньше по сравнению с отдельными механизмами последовательной или параллельной структуры. Установлено, что не все предложенные комбинации модулей нашли практическое применение в промышленности, а в большинстве исследований не учитывается относительное движение выходных звеньев, что приводит к расхождению расчетных и фактических характеристик разрабатываемых механических систем. При этом проведенный обзор показал, что шестиподвижные системы относительного

манипулирования с применением в них четырехподвижных модулей исследованы недостаточно, несмотря на высокий потенциал их применения в практике.

В связи с этим делается вывод об актуальности разработки и комплексного кинематического анализа двухмодульных шестиподвижных систем относительного манипулирования, в которых один из модулей выполнен в качестве четырехподвижного дельта-подобного механизма, а другой – в качестве двухподвижного поворотного механизма. При этом комплексный анализ рассматриваемых систем должен учитывать совместное движение модулей.

Во второй главе на основе анализа функциональных требований к механическим системам относительного манипулирования, предназначенным для выполнения машиностроительных операций, обоснован выбор комбинации модулей $(4 + 2)$, где 4 и 2 – числа степеней свободы верхнего и нижнего модулей, соответственно. Выбор основан на сравнительном анализе трех групп шестиподвижных механических систем $(5 + 1)$, $(4 + 2)$ и $(3 + 3)$, в результате которого установлено, что комбинация четырехподвижного верхнего и двухподвижного нижнего модулей обеспечивает необходимое число степеней свободы, а наличие у верхнего модуля большей подвижности открывает новые возможности при реализации технологических операций в аддитивном производстве, сварке, контрольно-измерительных и сборочных процедурах.

Выполнен анализ возможных вариантов верхнего модуля, для чего рассмотрены различные типы четырехподвижных механизмов параллельной структуры семейства «Дельта»: базовая модель с вращением вокруг вертикальной оси (рис. 1а), механизм с наклоном выходного звена вокруг горизонтальной оси (рис. 1б), а также механизмы Н4 (рис. 1в), I4 (рис. 1г) и Par4 (рис. 1д).

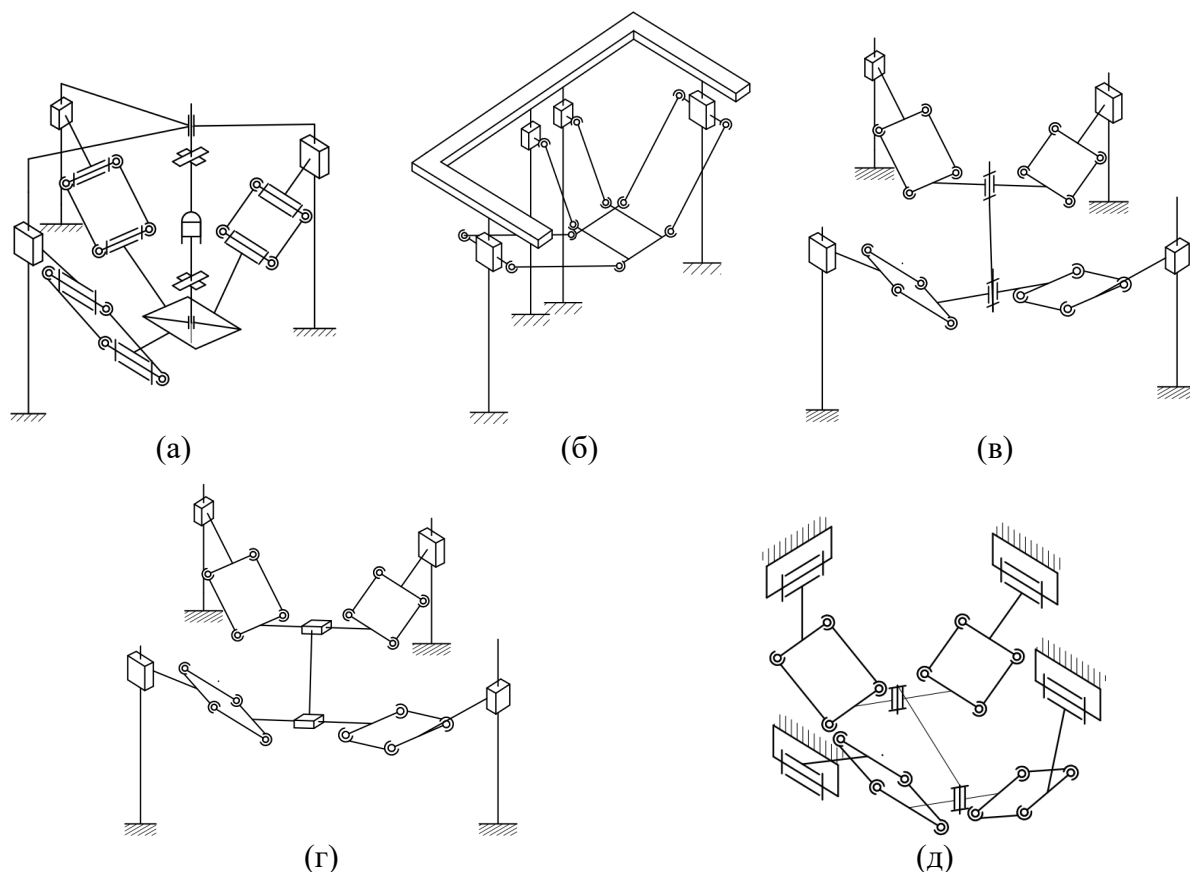


Рис. 1. Четырехподвижные механизмы семейства «Дельта» для верхнего модуля

На основе введенных критериев сравнения (типы относительных движений выходного звена, приведенный размер рабочей зоны, сложность сборки, особенности кинематики и области применения) обоснован выбор механизма верхнего модуля — четырехподвижного дельта-робота (рис. 1б), имеющего тип движения 3T1R, где Т – линейное смещение выходного звена, а R – угловое. Данный тип движения обеспечивает позиционирование выходного звена верхнего модуля в пространстве с учетом наклона вокруг горизонтальной оси при сохранении границ рабочей зоны в вертикальном габарите.

Для выбора нижнего модуля проведен сравнительный анализ разнотипных двухподвижных механизмов, обеспечивающих вращательные степени свободы (рис. 2), по функциональным критериям и уровню научной проработанности. Выбраны наиболее рациональные варианты нижнего модуля (рис. 2г, д) для использования в системах относительного манипулирования.

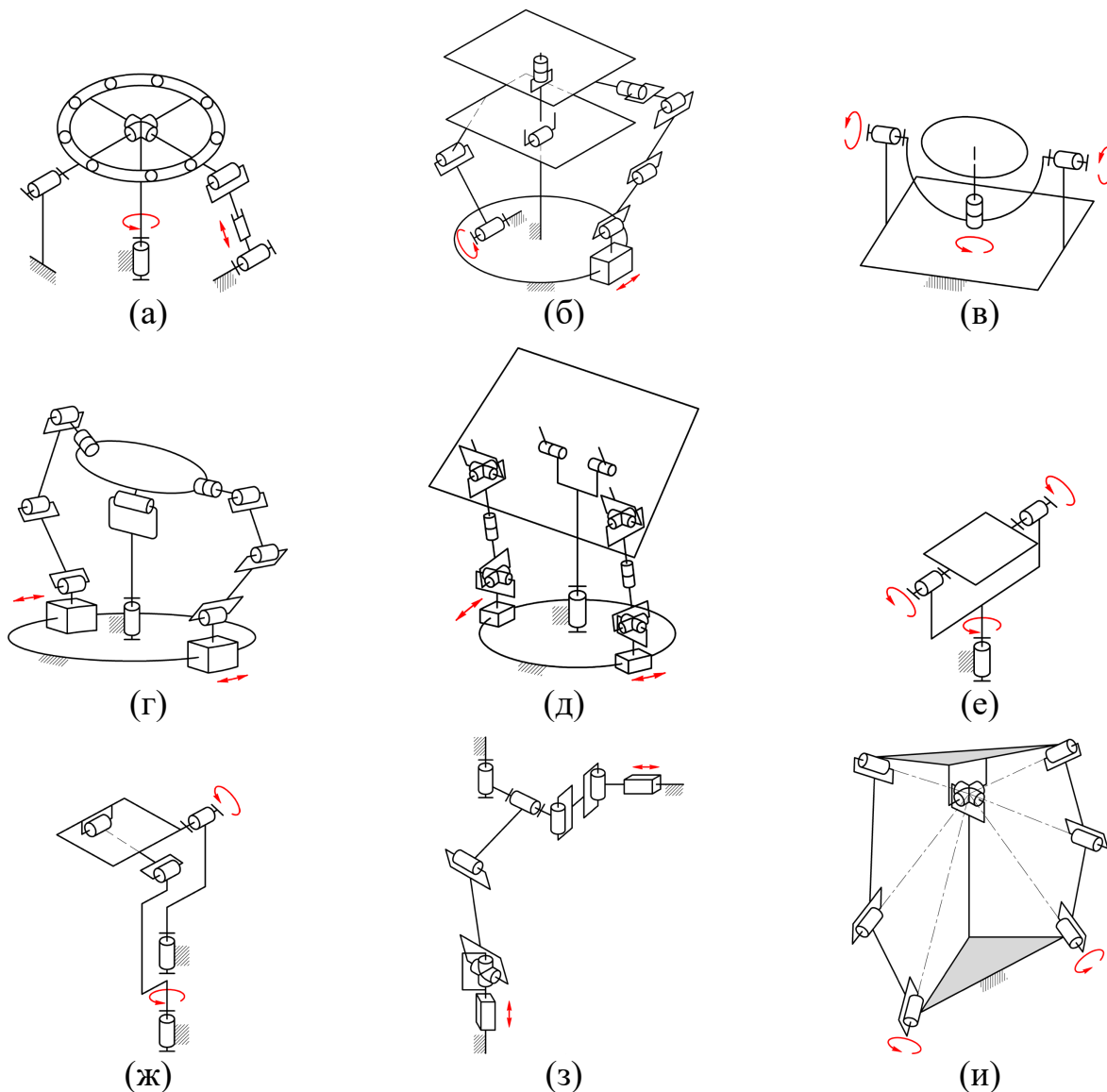


Рис. 2. Двухподвижные механизмы для нижнего модуля

На основе выбранных механизмов верхнего и нижнего модулей предложены две шестиподвижные механические системы относительного манипулирования (рис. 3а, б), включающие четырехподвижный дельта-подобный механизм верхнего

модуля (рис. 1б) и двухподвижные механизмы нижнего модуля со структурой 2-RRRRR/1-U (рис. 2г) и 2-RUU/1-U (рис. 2д). В главе приведено подробное описание конструкций, их компоновка и состав основных элементов. Эти данные необходимы для последующего анализа кинематики и формализации геометрических и кинематических соотношений.

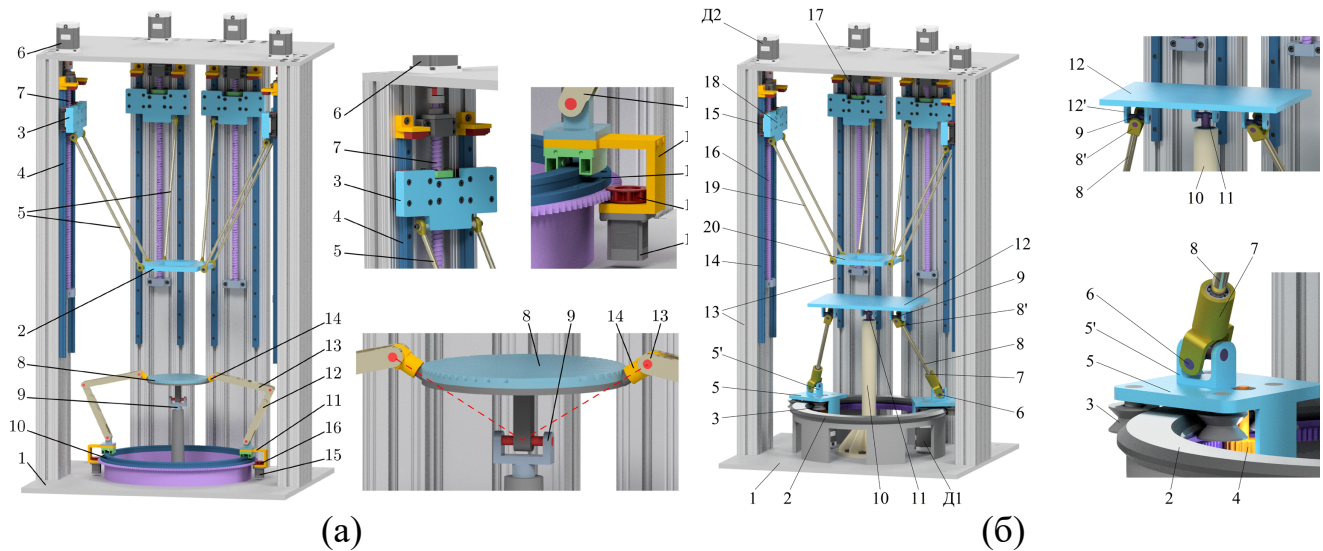


Рис. 3. Разработанные системы относительного манипулирования

В третьей главе разработаны аналитические алгоритмы комплексного кинематического анализа шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, представленных на рис. 3.

Разработанные алгоритмы в первую очередь включают решение обратной кинематической задачи, основанное на введении трех систем координат (неподвижной, связанной с верхней платформой и связанной с нижней платформой) и матричных уравнений перехода:

$$\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_2 \mathbf{T},$$

где $\mathbf{T}_1$ и $\mathbf{T}_2$ – матрицы перехода, описывающие конфигурации подвижных систем координат $O_1x_1y_1z_1$ и $O_2x_2y_2z_2$ относительно базовой системы координат $Oxyz$.

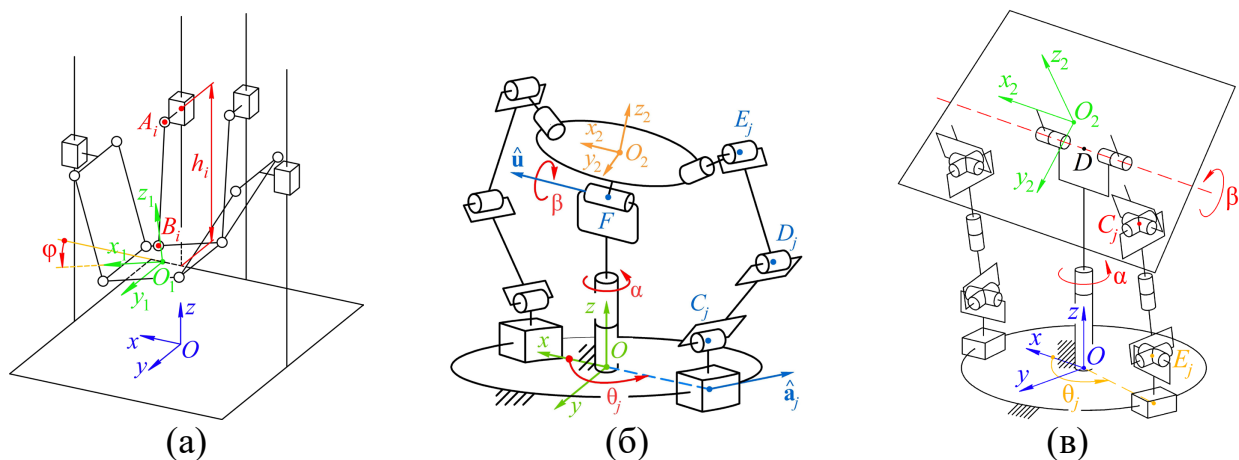


Рис. 4. Обозначения для решения задачи кинематики: (а) для верхнего модуля; для нижних модулей 2-RRRRR/1-U (б) и 2-RUU/1-U (в)

Получены соотношения, связывающие относительную конфигурацию модулей с приводными координатами. Четыре линейных перемещения ползунков верхнего модуля, описываются уравнением:

$$h_i = \pm \sqrt{l_{AiBi}^2 - (x_{Bi} - x_{Ai})^2 - (y_{Bi} - y_{Ai})^2} + z_{Bi}, \quad i = 1, \dots, 4,$$

где l_{AiBi} – длина звена A_iB_i ; x_{Ai} , x_{Bi} , y_{Ai} , y_{Bi} и z_{Bi} – координаты соответствующих точек в базовой системе координат $Oxyz$. Параметры l_{AiBi} , x_{Ai} и y_{Ai} являются постоянными и определяются геометрией механизма.

Угловые перемещения кареток нижнего модуля 2-RRRRR/1-U определяются из уравнения:

$$\theta_j = \text{atan2}(y_{Ej}, x_{Ej}), \quad j = 1, 2,$$

где x_{Ej} и y_{Ej} – координаты точки E_j в неподвижной системе координат $Oxyz$.

Для системы относительного манипулирования с нижним модулем 2-RUU/1-U значения углов $\theta_j, j = 1, 2$, кареток определяются из следующего уравнения:

$$(\mathbf{p}_{Ej} - \mathbf{p}_{Cj})^2 = L_{CjEj}^2,$$

где $\mathbf{p}_{Ej} = [R \cos(\theta_j) \quad R \sin(\theta_j) \quad z_{Ej}]^T$ – координаты точки E_j в системе $Oxyz$; R – радиус круговой направляющей нижнего модуля; z_{Ej} – координата z точки E_j в системе $Oxyz$; $\mathbf{p}_{Cj}$ – координаты точки C_j в системе $Oxyz$; L_{CjEj} – постоянное расстояние между точками C_j и E_j .

Преобразуя предыдущее уравнение в тригонометрическое уравнение вида:

$$c_1 \cos(\theta_j) + c_2 \sin(\theta_j) + c_3 = 0,$$

где c_1 , c_2 и c_3 – константы, становится возможным определить параметры θ_j , $j = 1, 2$, по следующей формуле:

$$\theta_j = 2 \arctg \left(\frac{c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - c_3^2 + c_1^2}}{c_1 - c_3} \right).$$

Из возможных комбинаций решений θ_j для θ_1 и θ_2 определяем тот набор координат, при котором каретки не наезжают друг на друга.

Разработанные аналитические алгоритмы решения обратных кинематических задач реализованы в среде Mathcad и апробированы на численных примерах с заданными траекториями относительного движения (рис. 5), включающими дуги параллелей и меридиан на сферической поверхности. На рис. 6 приведены кинематические диаграммы, полученные в результате решения задач обратной кинематики.

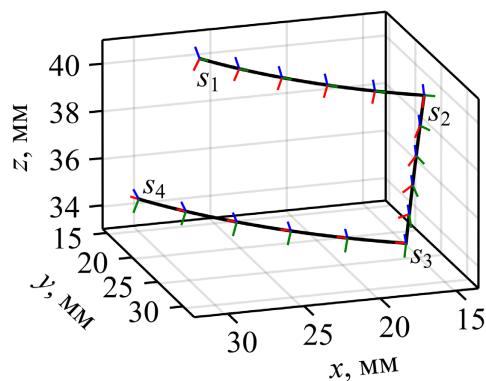


Рис. 5. Заданная пространственная траектория относительного движения

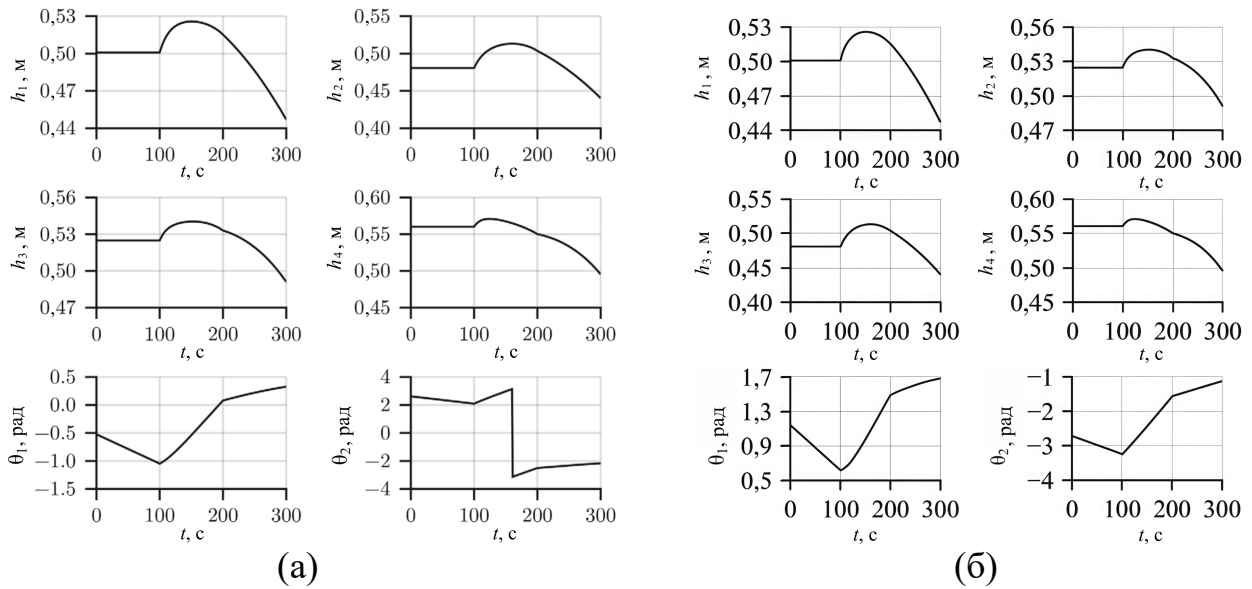


Рис. 6. Результаты решения задач обратной кинематики для систем относительного манипулирования с модулями 2-RRRRR/1-U (а) и 2-RUU/1-U (б)

На основе решения обратной кинематики разработан аналитический алгоритм построения рабочей зоны предложенной механической системы (рис. 3а) с учетом относительного движения модулей. Алгоритм основан на дискретизации параметров положения и ориентации выходных звеньев. В отличие от известных подходов, алгоритм учитывает все механические ограничения: ограничения перемещений кареток, ограничения углов поворота в сферических и вращательных шарнирах модулей, а также пересечение звеньев модулей (рис. 7). Для анализа столкновений звеньев использован алгоритм Гилберта – Джонсона – Кирти (GJK) с представлением звеньев в виде выпуклых многогранников (верхней платформы – прямоугольным параллелепипедом, нижней платформы и шатунов – цилиндрами, верхних рычагов – параллелепипедами (рис. 8)).

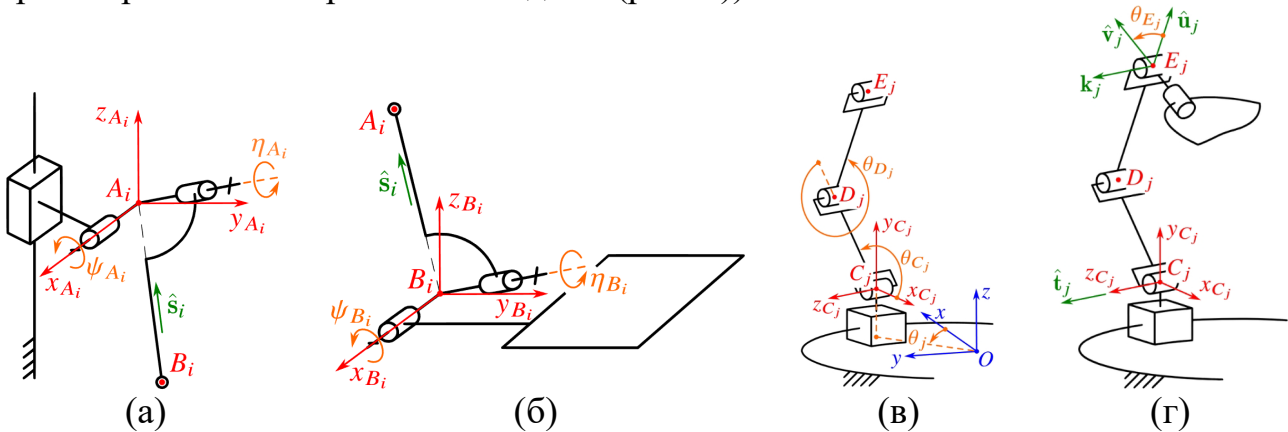


Рис. 7. Учитываемые ограничения углов поворота в сферических шарнирах кареток верхнего модуля (а), сферических шарнирах его выходного звена (б), в шарнирах боковой цепи нижнего модуля (в) и на его выходном звене (г)

Исследуемые углы определяются и лимитируются следующими уравнениями:

$$\psi_{Ai} = \text{atan2}(-s_i^y, s_i^z), \eta_{Ai} = \text{asin}(s_i^x), \psi_{\text{Amin}} \leq \psi_{Ai} \leq \psi_{\text{Amax}},$$

$$\eta_{Amin} \leq \eta_{Ai} \leq \eta_{Amax},$$

где s_i^x, s_i^y, s_i^z – составляющие вектора $\mathbf{s}_i$, направленного от B_i к A_i и выраженного в системе $Oxyz$, $\psi_{Amin}, \eta_{Amin}, \psi_{Amax}$ и η_{Amax} – минимальные и максимальные значения углов ψ_{Ai} и η_{Ai} , принимаемые одинаковыми для всех цепей.

Аналогично определяются углы ψ_{Bi} и η_{Bi} , которые лимитируются минимальными и максимальными значениями исходя из конструкции механизма.

Рассмотрены ограничения шарниров центральной цепи, которая имеет два вращательных шарнира. Угол α в первом шарнире не имеет ограничений: нижняя подвижная платформа может вращаться неограниченно вокруг оси круговой направляющей. С другой стороны, угол β ограничен конструкцией механизма:

$$\beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max},$$

где β_{min} и β_{max} – минимальное и максимальное значения угла β .

Углы в шарнирах нижнего модуля определяются следующими уравнениями:

$$\theta_{Cj} = \sigma_j - \xi_{1j}, \theta_{Cj} = \sigma_j + \xi_{1j}, \theta_{Dj} = \pi - \xi_{2j}, \theta_{Dj} = \xi_{2j} - \pi,$$

$$\sigma_j = \text{atan2}(y_j, x_j), \xi_{1j} = \arccos\left(\frac{\|\mathbf{p}_{Ej}\|^2 + l_{CD}^2 - l_{DE}^2}{2\|\mathbf{p}_{Ej}\|l_{CD}}\right), \xi_{2j} = \arccos\left(\frac{l_{CD}^2 + l_{DE}^2 - \|\mathbf{p}_{Ej}\|^2}{2l_{CD}l_{DE}}\right),$$

где $\mathbf{p}_{Ej} = [x_j \ y_j]^T$ – вектор положения точки E_j в системе $C_jx_cjy_cj$, l_{CD} и l_{DE} – длины звеньев C_jD_j и D_jE_j , принимаемые одинаковыми для всех цепей.

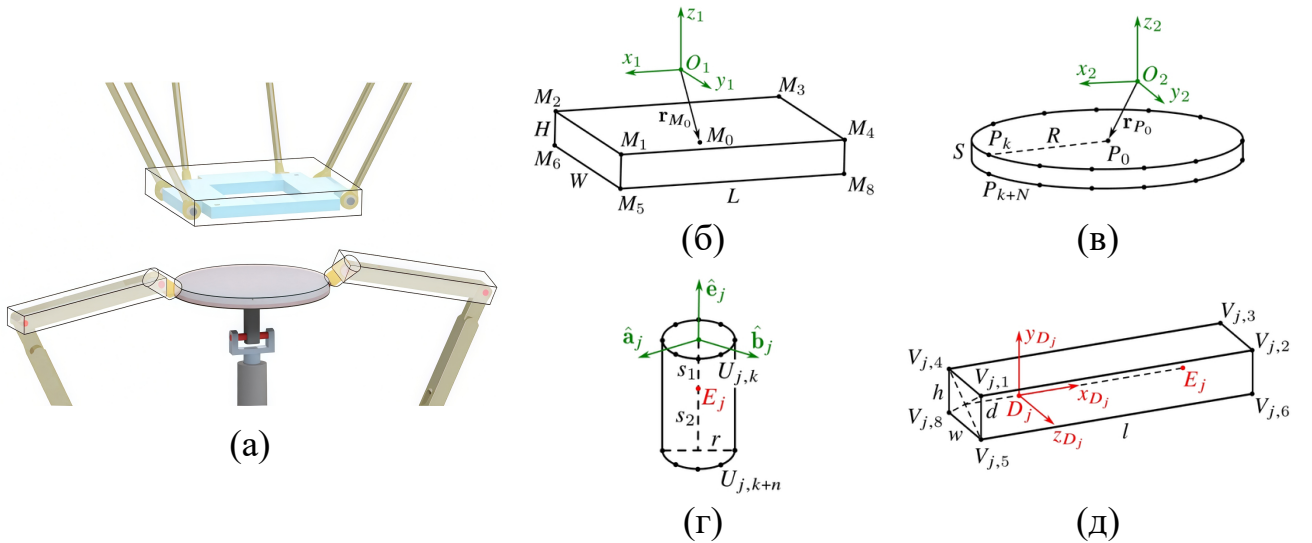


Рис. 8. Анализ интерференций звеньев верхнего и нижнего модулей: (а) выпуклые тела, охватывающие звенья, которые могут столкнуться; (б) параллелепипед, охватывающий платформу верхнего модуля; (в) цилиндр, охватывающий платформу нижнего модуля; (г) цилиндр, охватывающий j -й шатун; (д) параллелепипед, охватывающий j -й верхний рычаг

Выполнен анализ рабочих зон постоянной ориентации (при фиксированных углах азимута, наклона и кручения) и постоянного положения. Из полученных результатов (рис. 9) видно, что пересечение звеньев существенно ограничивает рабочую зону (красные области) и должно учитываться для ее корректной оценки.

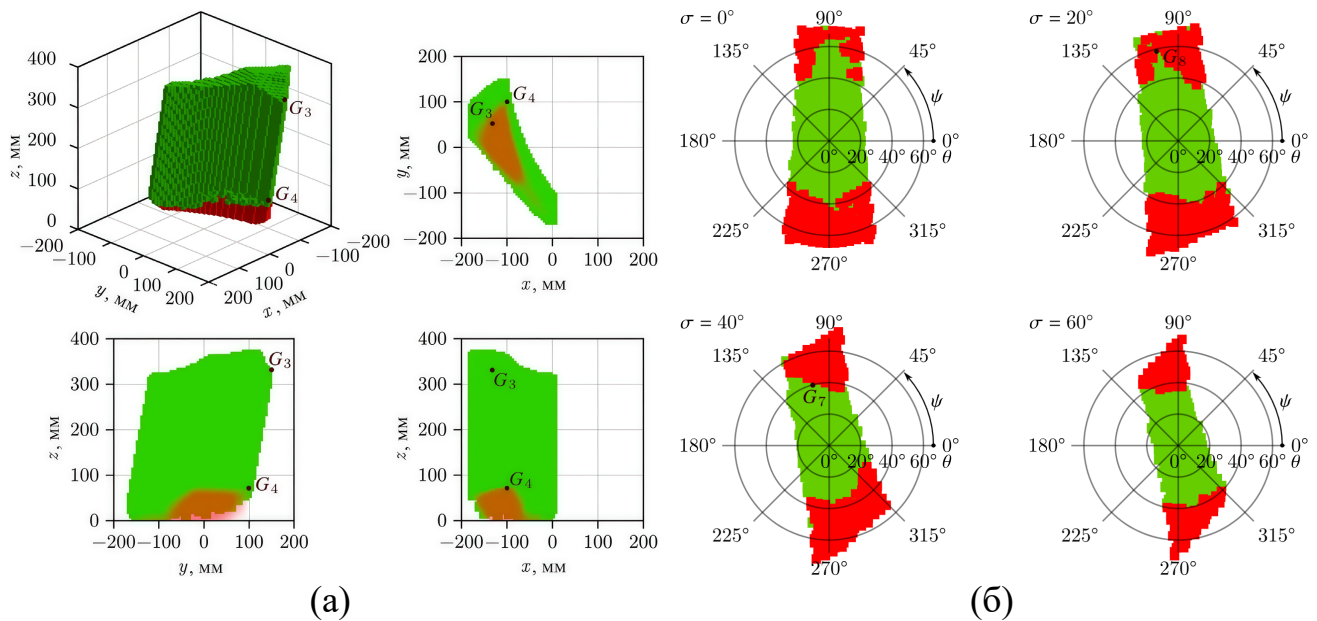


Рис. 9. Фрагмент результатов расчета рабочей зоны постоянной ориентации и ее проекции при $\psi = 30^\circ$, $\theta = -30^\circ$, $\sigma = 45^\circ$ (а) и рабочей зоны постоянного положения при $x = y = 0$ мм, $z = 75$ мм (б)

Проведена верификация результатов расчета в системе КОМПАС-3D для восьми характерных точек на границах рабочих зон, подтвердившая теоретические расчеты. На рис. 10 показаны конфигурации модулей для результатов по рис. 9.

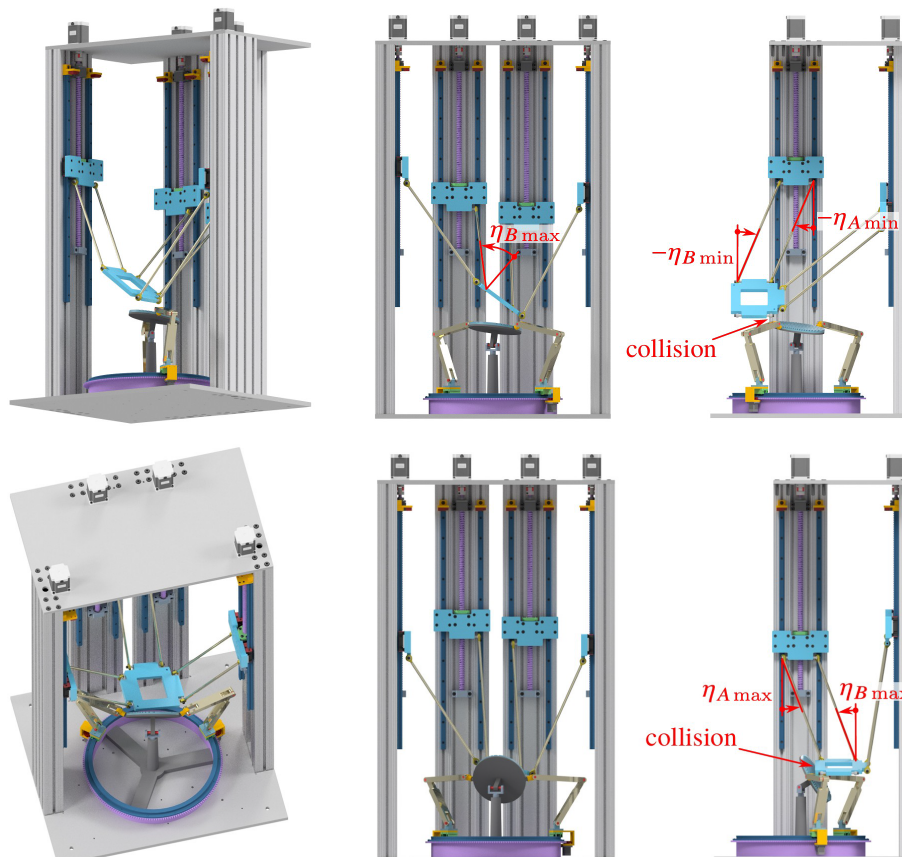


Рис. 10. Пример верификации результатов расчета рабочей зоны (по рис. 9) на виртуальном прототипе для граничных точек рабочей зоны при постоянной ориентации (верхний рисунок) и постоянном положении (нижний рисунок)

Разработаны алгоритмы анализа скоростей, устанавливающие зависимости между относительными линейными и угловыми скоростями модулей и скоростями в приводных шарнирах. Получены выражения для угловых скоростей платформ через производные углов поворота, а также соотношения для скоростей кареток верхнего модуля и кареток нижнего модуля, представленные следующими выражениями:

$$\dot{h}_i = \frac{\mathbf{v}_{Bi} \cdot \mathbf{p}_{BiAi}}{\hat{\mathbf{z}} \cdot \mathbf{p}_{BiAi}}, \quad \dot{\theta}_j = \frac{\mathbf{v}_{Ej} \cdot \hat{\mathbf{a}}_j}{d_j},$$

где $\mathbf{v}_{Bi}$, $\mathbf{v}_{Ej}$ – скорости точек B_i i -й цепи верхнего модуля и E_j j -й цепи нижнего модуля, $\hat{\mathbf{z}} = [0 \ 0 \ 1]^T$, $\mathbf{p}_{BiAi} = \mathbf{p}_{Ai} - \mathbf{p}_{Bi}$, параметры $\mathbf{p}_{Ai}$ и $\mathbf{p}_{Bi}$ определяют положения точек A_i и B_i в системе $Oxyz$, $\hat{\mathbf{a}}_j = [-\sin(\theta_j) \ \cos(\theta_j) \ 0]^T$ – единичный вектор, касательный к круговой направляющей в точке C_j , $d_j = \sqrt{x_{Ej}^2 + y_{Ej}^2}$ – кратчайшее расстояние от точки E_j до оси круговой направляющей.

Для системы относительного манипулирования с нижним модулем 2-RRRRR/1-U скорости кареток определяются через проекции скоростей точек на направление рычага, а для системы 2-RUU/1-U – через условие постоянства расстояния между точками крепления и вычисляются по следующей формуле:

$$\dot{\theta}_j = \frac{\mathbf{v}_{Cj} \cdot \mathbf{p}_{CjEj}}{R \hat{\mathbf{a}}_j \cdot \mathbf{p}_{CjEj}},$$

где $\mathbf{v}_{Cj}$ – скорость точки C_j j -й цепи, $\mathbf{p}_{CjEj} = \mathbf{p}_{Ej} - \mathbf{p}_{Cj}$, параметры $\mathbf{p}_{Ej}$ и $\mathbf{p}_{Cj}$ определяют положения точек E_j и C_j в системе $Oxyz$, R – радиальное положение точки E_j в системе $Oxyz$.

Проведены численные эксперименты для траекторий относительного движения (рис. 11), результаты которых (рис. 12а, б) совпали с данными численного дифференцирования перемещений, что подтверждает корректность разработанных алгоритмов.

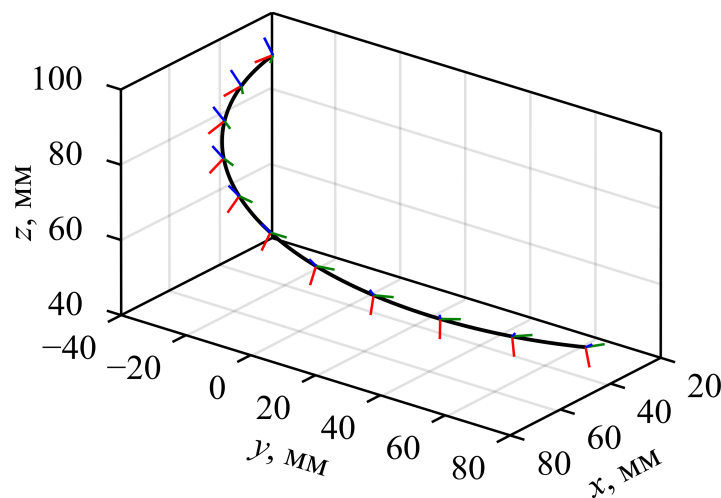


Рис. 11. Заданная пространственная траектория относительного движения

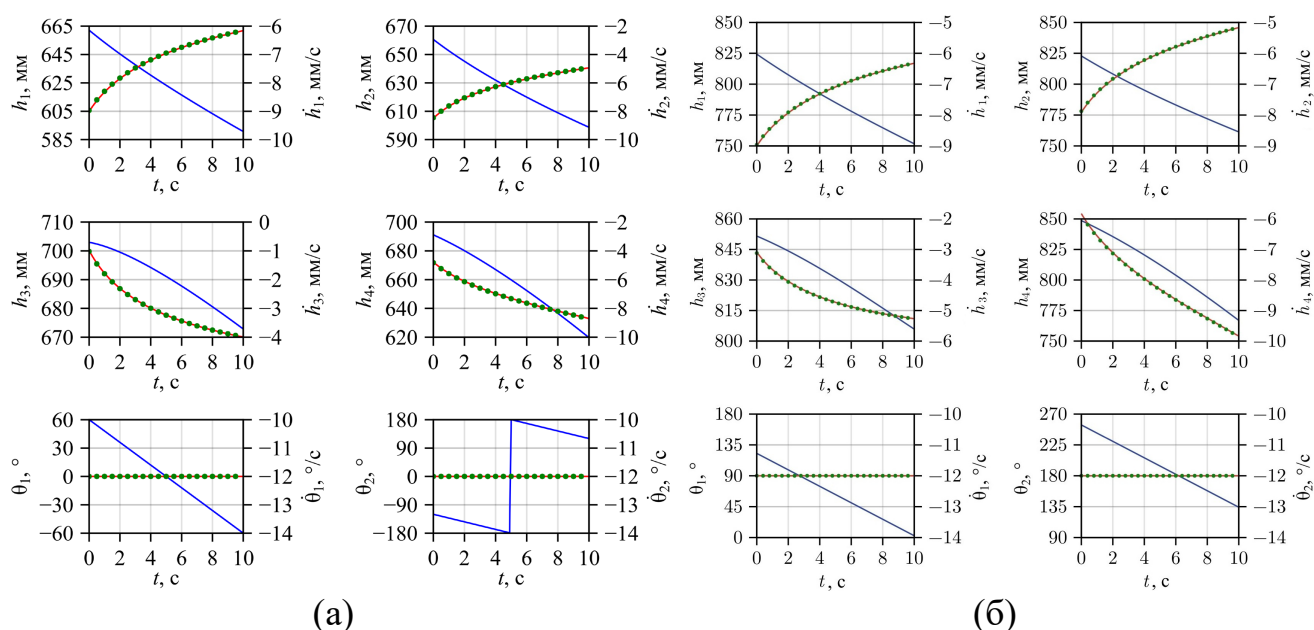


Рис. 12. Диаграммы анализа скоростей для систем относительного манипулирования с модулями 2-RRRRR/1-U (а) и 2-RUU/1-U (б)

В четвертой главе представлены результаты виртуального и физического прототипирования разработанной шестиподвижной механической системы относительного манипулирования, включающей верхний четырехподвижный модуль параллельной структуры типа «Дельта» и нижний двухподвижный модуль последовательной структуры с неограниченным вращением вокруг вертикальной оси.

Разработан виртуальный прототип (сборочная компьютерная модель) механической системы в САПР КОМПАС-3D, позволивший проработать компоновку узлов, спецификацию деталей и технологию сборки. Виртуальный прототип также позволил проверить отсутствие недопустимых пересечений звеньев при относительном движении модулей и подтвердил реализуемость конструкции.

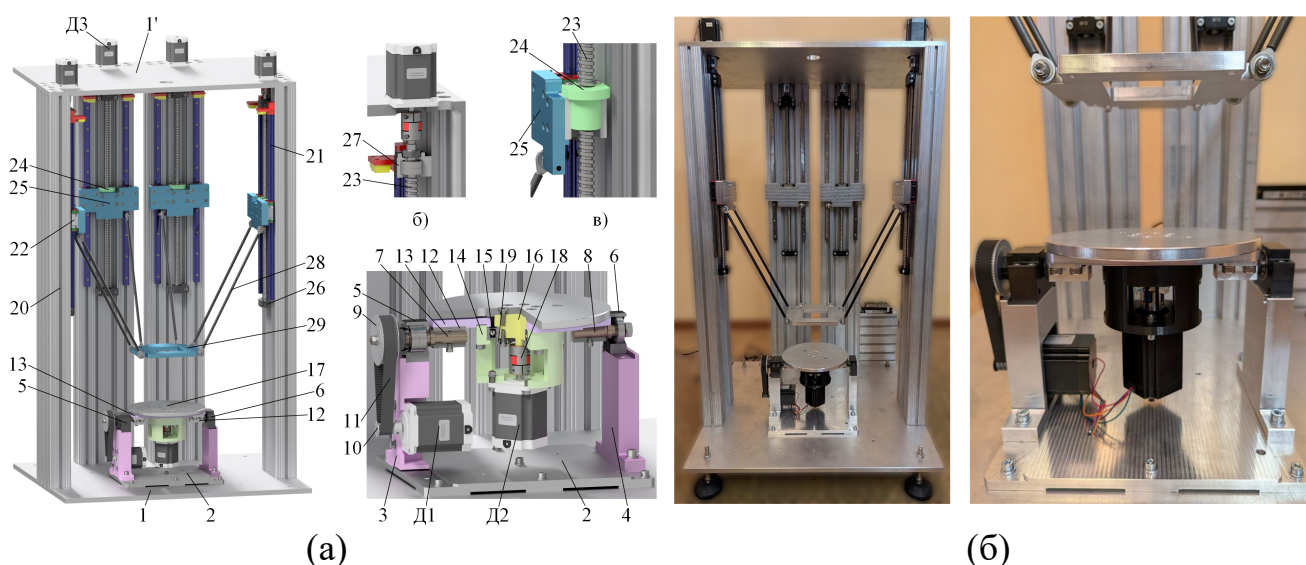


Рис. 13. Компьютерная модель предлагаемой системы относительного манипулирования (а) и созданный на ее основе физический прототип (б)

На основе виртуального прототипа изготовлен его физический аналог (рис. 13а, б) с использованием стандартных элементов (метизы, сферические шарниры, винты ШВП, рельсовые направляющие, подшипниковые опоры, шаговые двигатели NEMA23) и индивидуально изготовленных деталей из дюралюминиевого сплава Д16т (фрезерная обработка на станках с ЧПУ), конструкционной стали (токарная обработка), карбоновых трубок и PLA-пластика (3D-печать). В работе описана поэтапная последовательность узловой сборки сборочных единиц, входящих в состав прототипа.

Реализована экспериментальная методика оценки повторяемости ориентации выходного звена верхнего модуля с использованием инерциального измерительного модуля МГ-1 (трехосевой датчик угловой скорости, акселерометр, магнитометр). Исследование проведено для трех различных положений выходного

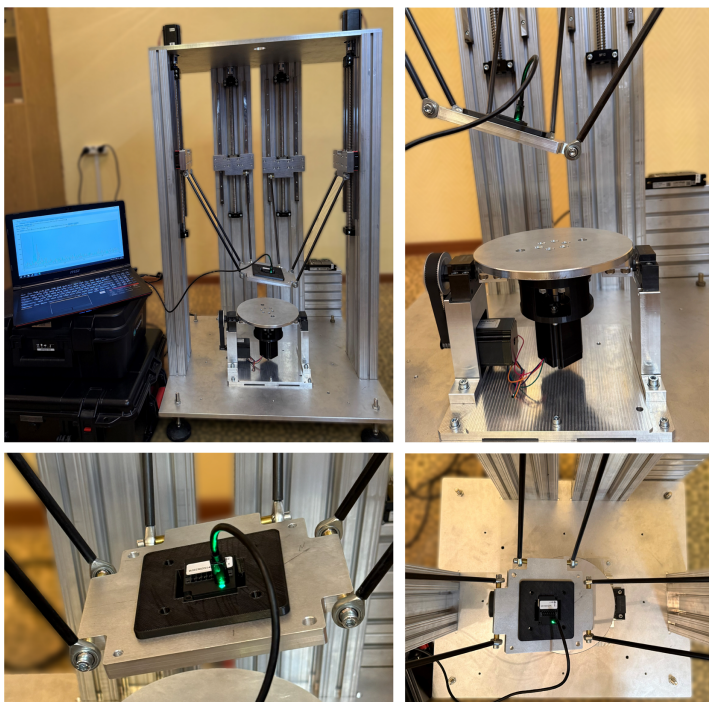


Рис. 14. Проведение эксперимента по определению повторяемости

звена в рабочей зоне с координатами (0; 0; 350 мм), (0; 60; 350 мм) и (45; 0; 350 мм). На рис. 14 показан процесс проведения эксперимента. Для каждого положения выполнялось по 10 измерений углов наклона вокруг горизонтальной оси для двух заданных ориентаций (положительный и отрицательный углы). По результатам измерений вычислялись среднее значение, среднеквадратичное отклонение и размах значений. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что среднеквадратичное отклонение угла наклона выходного звена во всех рассмотренных случаях не превышает $0,16^\circ$, а размах измеренных значений менее $0,5^\circ$.

Наименьшее рассеяние наблюдается для положения с углом наклона $10,86^\circ$ (среднеквадратичное отклонение $0,037^\circ$, размах $0,108^\circ$), наибольшее – для положения с углом наклона $-19,72^\circ$ (среднеквадратичное отклонение $0,157^\circ$, размах $0,497^\circ$), что может быть обусловлено различной нагрузкой звеньев, влиянием люфтов в передачах или неточностью калибровки.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточной повторяемости ориентации выходного звена физического прототипа для экспериментальной отработки разработанных моделей и алгоритмов, а также подтверждают возможность использования предложенной механической системы относительного манипулирования для задач механической обработки, полировки поверхностей и других технологических операций.

С учетом решения поставленных в диссертационной работе задач были получены следующие **основные результаты**:

1. Получены данные анализа технических решений существующих механических систем относительного манипулирования и методов их комплексного кинематического исследования. Разработаны структурные схемы новых двухмодульных механических систем относительного манипулирования, включающие четырехподвижный верхний модуль на основе механизма семейства «Дельта» и двухподвижный нижний модуль с возможностью неограниченного вращения. Показано, что предложенные комбинации модулей обеспечивают шесть степеней свободы в относительном движении.

2. Разработаны аналитические алгоритмы решения обратной кинематической задачи о положениях для синтезированных механических систем относительного манипулирования с учетом совместного движения верхнего и нижнего модулей. Получены аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между координатами выходного звена и управляемыми перемещениями в приводах обоих модулей.

3. Разработаны алгоритмы анализа скоростей, позволяющие определить линейные и угловые скорости выходных звеньев модулей механических систем относительного манипулирования и выявить особенности распределения скоростей в различных конфигурациях механизмов-модулей.

4. Разработан аналитический итерационный алгоритм построения рабочей зоны предложенной механической системы относительного манипулирования, учитывающий ограничения в шарнирах верхнего и нижнего модулей, а также интерференцию звеньев при относительном движении. Доказано, что учет относительного движения модулей и учет пересечения их звеньев значительно влияют на форму и размеры фактической рабочей зоны.

5. Определены особые (сингулярные) конфигурации исследуемых механических систем относительного манипулирования, при которых происходит потеря управляемости при сохранении подвижности отдельных модулей, что имеет важное значение для практического применения и планирования траекторий движения.

6. Разработаны сборочные компьютерные модели (виртуальные прототипы) синтезированных механических систем относительного манипулирования, на основе которых проведена верификация результатов кинематического анализа. Подтверждена корректность разработанных алгоритмов решения кинематических задач и построения рабочей зоны.

7. Изготовлен физический прототип механической системы относительного манипулирования, проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили адекватность теоретических моделей и возможность практической реализации предложенной конструкции.

По результатам работы сформулированы следующие **выводы**:

1. Использование четырехподвижного механизма семейства «Дельта» с возможностью поворота вокруг горизонтальной оси в сочетании с двухподвижными модулями позволило синтезировать новые, ранее не исследованные системы относительного манипулирования, обеспечивающие шесть степеней свободы и пригодные как для реализации формообразующих

операций, так и для интеграции в существующие технологические процессы при выполнении неформообразующих операций в гибких производственных системах и автоматических линиях.

2. На основе разработанных алгоритмов решения обратной кинематической задачи, построения рабочей зоны и анализа скоростей установлено, что предложенные шестиподвижные системы относительного манипулирования обеспечивают заданные угловые и линейные перемещения и скорости выходных звеньев модулей в пределах исследованной рабочей зоны с постоянной и наклонной ориентациями выходного звена. На примере разработанных систем относительного манипулирования показано, что использование средств автоматизированного проектирования позволяет верифицировать теоретические алгоритмы кинематического анализа (алгоритмы решения задач о положениях, скоростях и построения рабочей зоны).

3. При решении задачи об определении параметров рабочей зоны механической системы относительного манипулирования учет ограничений в шарнирах модулей и интерференции их звеньев оказывают существенное влияние на фактическую рабочую зону и приводят к результатам, принципиально отличающимся от оценок, получаемых традиционным методом построения рабочей зоны как области пересечения рабочих зон отдельных модулей.

4. Спроектированная сборочная компьютерная модель и изготовленный на ее основе физический прототип подтвердили работоспособность предложенной теоретической модели механической системы относительного манипулирования, наличие требуемого числа степеней свободы и наличие особых (сингулярных) положений, в которых механическая система теряет заявленное число степеней свободы при сохранении подвижности отдельных модулей, входящих в ее состав.

5. Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить повторяемость движения выходного звена верхнего модуля разработанной механической системы относительного манипулирования. Установлено, что среднеквадратичное отклонение угла наклона выходного звена во всех рассмотренных случаях не превышает $0,16^\circ$, а размах измеренных значений не превышает $0,5^\circ$.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

Статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Мухин К. С., Брем И. В., Антонов А. В., Фомин А. С. Анализ скоростей шестиподвижного манипулятора гибридной структуры, образованного двумя модулями с параллельной кинематикой // Машиностроение и инженерное образование. – 2026. – № 1 – С. 31–40.

2. Мухин К. С., Антонов А. В., Фомин А. С. Решение обратной кинематической задачи шестиподвижного робота относительного манипулирования, состоящего из двух модулей параллельной структуры // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2025. – № 8. – С. 3–11.

Статьи, индексируемых в международных наукометрических базах
Scopus и Web of Science

3. Mukhin K., Antonov A., Fomin A. Workspace analysis of a 6-degree-of-freedom hybrid robot with two parallel modules // Robotica. – 2025. – С. 1-29.

4. Mukhin K., Antonov A., Fomin A. Velocity analysis of a 6-DOF hybrid manipulator with two parallel modules // Proceedings of the CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics. – 2025. – С. 176-187.

5. Mukhin K., Antonov A., Fomin A. Mechanism design and inverse kinematics of a 6-DOF hybrid robot with two parallel modules // Proceedings of the 8th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics. – 2024. – С. 309-318.

6. Krasko A. S., Kovalev A. A., Filin M. A., Mukhin K. S., Baranova N. S. Optimization of workpiece maintenance discipline through simulation modeling of the functioning of automated technological complexes // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – Т. 52. – № Suppl 2. – С. S194-S202.

Статьи в изданиях, включенных в перечень РИНЦ

7. Мухин К. С., Брем И. В., Антонов А. В., Фомин А. С. Шестиподвижный робот относительного манипулирования, состоящий из модулей параллельной структуры // Материалы XVIII Всероссийской мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2025): в 3 т. – 2025. – Т. 1. – С. 75–78.

Патенты РФ на изобретения:

8. Патент № 2804502 Российская Федерация, МПК F16H 21/46, B25J 1/00. Пространственный механизм относительного манипулирования с двух- и четырехподвижным модулями параллельной структуры: № 2023103780: заявл. 20.02.2023: опубл. 02.10.2023 / А. С. Фомин, П. А. Ларюшкин, Д. В. Петелин, К. С. Мухин; заявитель и патентообладатель ИМАШ РАН.

9. Патент № 2804666 Российская Федерация, МПК F16H 21/00. Шестиподвижное пространственное устройство параллельной структуры относительного манипулирования: № 2023103781: заявл. 20.02.2023: опубл. 03.10.2023 / А. С. Фомин, К. С. Мухин; заявитель и патентообладатель ИМАШ РАН.