

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по подготовке кадров
высшей квалификации и технологическому
развитию федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Российский
государственный университет
им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн.
Искусство)» д.э.н., профессор



_____/А.В. Силаков/

«26» августа 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Мухина Кирилла Сергеевича

«Разработка и исследование механических систем относительного
манипулирования с применением механизмов семейства «Дельта»»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.2. Машиноведение

Актуальность темы диссертационной работы

В различных областях машиностроительного производства всё чаще возникает необходимость выполнения технологических операций над предметом производства с различных сторон и под произвольными углами. Реализация таких операций требует применения оборудования, обеспечивающего взаимное перемещение инструмента и заготовки, как правило, по шести степеням свободы. При этом использование одного механизма с шестью степенями свободы не всегда обеспечивает необходимый функционал, достаточное быстродействие, компактность и/или жесткость системы. Исходя из этого, разработка механических систем относительного манипулирования представляет как научный, так и практический интерес.

Комбинация механизмов, как отдельных модулей, в составе единой механической системы может обеспечить реализацию до шести степеней свободы, расширить функциональные возможности отдельно взятых модулей, повысить надежность и быстродействие оборудования. Перспективным является использование в таких системах механизмов параллельной структуры семейства «Дельта», использование которых позволяет расширить габариты рабочих зон, а также увеличить скорости и ускорения выходных звеньев при выполнении операций относительного манипулирования.

Анализ современных исследований показывает, что, несмотря на наличие важных функциональных свойств шестиподвижных механических систем относительного манипулирования с использованием механизмов параллельной структуры семейства «Дельта» число работ, посвящённых вопросам их синтеза, проектирования и исследования, остаётся весьма ограниченным. В связи с этим Мухиным К.С. разработана группа указанных механических систем, а также предложены алгоритмы их проектирования и комплексного кинематического исследования.

Содержание диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 120 наименований, 7 приложений. Объем диссертации составляет 184 страницы, включая 70 рисунков и 14 таблиц.

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, представлены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, поддержке и финансировании исследования, публикациях, структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору известных механических систем относительного манипулирования с различным числом степеней свободы, состоящих из нескольких модулей и работающих совместно. Рассмотрена классификация таких систем, предложенная Глазуновым В.А., а также проанализированы возможные комбинации типов движений модулей. Приведены и систематизированы примеры конструкций механических систем относительного манипулирования по числу степеней свободы (от трёх до шести) с учётом структуры входящих в их состав модулей (последовательной, параллельной и гибридной). Среди примеров представлены механизмы относительного манипулирования с тремя, четырьмя, пятью и шестью степенями свободы для различных отраслей реального сектора: агропромышленности, машиностроения, приборостроения, медицины и других областей.

Проведён обзор и анализ существующих методов кинематического исследования механических систем относительного манипулирования, включая методы решения прямой и обратной задач кинематики, построения рабочих зон и анализа скоростей. Рассмотрены как аналитические подходы, основанные на использовании преобразования систем координат, так и численные итерационные методы. Выполнен анализ современных научных работ, посвящённых разработке и исследованию механических систем относительного манипулирования и механизмов параллельной структуры.

По результатам проведенного обзора отмечается, что не все известные механизмы нашли практическое применение в промышленности, но, несмотря на это, механические системы относительного манипулирования с применением механизмов семейства «Дельта» активно внедряются в производства для решения множества технологических задач. Кроме того, в

ряде исследований, посвященных анализу рабочих зон таких механизмов, не учитывается относительное движение выходных звеньев модулей, что приводит к расхождению между расчетными и фактическими характеристиками рабочей зоны.

Проведенный обзор также показал, что шестиподвижные системы относительного манипулирования с использованием четырехподвижных модулей исследованы недостаточно, несмотря на высокий потенциал их применения в технике. В связи с этим обоснована актуальность разработки и комплексного кинематического анализа двухмодульных шестиподвижных систем относительного манипулирования, в составе которых один модуль реализован на основе четырёхподвижного механизма типа «Дельта», а второй — на основе двухподвижного поворотного механизма. При этом отмечается, что при проведении анализа необходимо учитывать совместное относительное движение указанных модулей.

Во второй главе обосновывается выбор шестиподвижной механической системы относительного манипулирования типа $(4 + 2)$ при сравнении с типами $(5 + 1)$ и $(3 + 3)$. В качестве верхнего четырехподвижного модуля рассматриваются различные механизмы семейства «Дельта». При этом сравнение ведется по следующим критериям: типы относительных движений выходного звена, приведенные размеры рабочей зоны вдоль горизонтальных и вертикальной осей, технологическая сложность сборки, область применения, а также учитываются особенности кинематики механизмов. В результате анализа выбирается механизм «Дельта» с возможностью поворота выходного звена вокруг горизонтальной оси, что в первую очередь обусловлено тем, что вращение вокруг вертикальной оси не является необходимым для большинства технологических операций, для которых предполагается применение разрабатываемой системы относительного манипулирования.

С учетом выбранного механизма верхнего модуля, обеспечивающего тип движения $3T1R$ (три линейных смещения и один поворот), выбирается нижний модуль для реализации двух дополнительных вращений. Представлены несколько групп таких двухподвижных механизмов: с неизменной и переменной ориентацией геометрических осей вращения. Среди критериев выбора были рассмотрены: возможность неограниченного вращения вокруг вертикальной оси, изменение ориентации горизонтальной оси вращения в зависимости от поворота вокруг вертикальной оси, сложность изготовления и уровень исследованности механизма. В результате были выбраны несколько механизмов с круговой направляющей для дальнейшего исследования.

На основе выбранных модулей для механической системы относительного манипулирования были разработаны их трехмерные компьютерные модели: с четырехподвижным механизмом семейства «Дельта» для верхнего модуля и двухподвижными механизмами $2\text{-RRRRR}/1\text{-U}$ и $2\text{-RUU}/1\text{-U}$ для нижнего модуля.

В третьей главе разработаны аналитические алгоритмы комплексного кинематического анализа шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, синтезированных в предыдущей главе.

Данные алгоритмы направлены на решение обратной кинематической задачи для предложенных механических систем относительного манипулирования. Представлены численные примеры, в которых рассчитаны приводные координаты механизмов в составе системы при заданных траекториях относительного движения модулей, включая случаи с изменяющейся ориентацией выходных звеньев друг относительно друга.

Кроме того, на основе решения обратной кинематической задачи разработан алгоритм расчёта рабочей зоны механической системы относительного манипулирования с учётом относительного движения модулей, основанный на дискретизации параметров положения и ориентации выходных звеньев и учёте конструктивных ограничений системы. Учтены ограничения в шарнирах верхнего и нижнего модулей, а также условия взаимного пересечения звеньев. Для выявления столкновений использован алгоритм Гилберта — Джонсона — Кирти с представлением звеньев в виде выпуклых многогранников, что позволило определить допустимые области рабочей зоны. Анализ полученных результатов показал, что учет пересечения звеньев и ограничения в шарнирах существенно влияют на форму и размеры рабочей зоны. Алгоритм построения рабочей зоны верифицирован с применением САПР КОМПАС-3D для ряда характерных точек на границах полученных рабочих зон. Примеры верификации проиллюстрированы сборками компьютерных моделей.

Также разработан алгоритм анализа скоростей механизмов при относительном движении модулей. Алгоритм реализован на численных примерах для двух комбинаций модулей. Корректность работы алгоритма верифицирована сравнением полученных результатов расчетов с численным дифференцированием заданной траектории.

В четвертой главе на основе синтезированного механизма разрабатывается его виртуальный прототип и изготавливается физическая модель, описываются особенности проектирования и сборки механизма. Виртуальный прототип синтезированного механизма разработан с использованием САПР КОМПАС-3D.

Проведен эксперимент по определению повторяемости ориентации разработанной механической системы относительного манипулирования с использованием инерциального модуля МГ-1. Определены средние значения, среднеквадратичные отклонения и размах угла ориентации выходного звена в трех исследуемых положениях. По результатам экспериментальных исследований установлено, что среднеквадратичное отклонение угла наклона выходного звена во всех рассмотренных случаях не превышает $0,16^\circ$, а размах измеренных значений менее $0,5^\circ$. Полученные экспериментальные результаты подтвердили принципиальную работоспособность механизма и возможность использования разработанной механической системы относительного

манипулирования для экспериментальной отработки кинематических параметров и алгоритмов управления.

В заключении обобщены результаты, подведены общие итоги исследования и сделаны выводы, имеющие научное и практическое значение.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

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.

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.

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

4. Разработан алгоритм проектирования шестиподвижных систем относительного манипулирования, в которых один из модулей выполнен в виде механизма параллельной структуры семейства «Дельта».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается использованием классических положений теории механизмов и машин, теоретической механики, робототехники и машиностроения, а также подтверждается применением общепринятых допущений и апробированных методик анализа, применением современного программного обеспечения (Mathcad, MATLAB, САПР КОМПАС-3D и Autodesk Inventor), верификацией полученных результатов через численные и натурные эксперименты.

Практическая значимость исследования состоит в том, что:

1. Разработана группа новых шестиподвижных механических систем относительного манипулирования для реализации различных формообразующих технологических задач и для исследования поверхностей деталей машин. При этом предполагается, что инструмент располагается на верхнем четырехподвижном модуле, а заготовка на нижнем двухподвижном модуле.

2. Создан физический прототип новой шестиподвижной механической системы относительного манипулирования на базе четырехподвижного механизма семейства «Дельта», обеспечивающего поворот выходного звена вокруг горизонтальной оси, и двухподвижного механизма, имеющего неограниченный угол вращения вокруг оси, перпендикулярной его выходному звену, и разработана необходимая документация для его производства и сборки.

3. На основе полученных решений задач кинематики для созданной механической системы относительного манипулирования разработаны практические алгоритмы управления движением выходных звеньев модулей, входящих в состав системы.

4. Результаты, полученные в работе, приняты к внедрению на АО «НПО «Пульс»» и ООО «ТОННЕЛИОН». Также результаты работы приняты к использованию в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана для подготовки студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 15.04.01 «Машиностроение». Кроме этого, результаты работы используются в научно-исследовательской работе сотрудников и аспирантов ИМАШ РАН.

Замечания по работе:

1. В практической значимости автор использует формулировку «оптимальное соотношение», не вводя критерии оптимальности в тексте самой работы.

2. Вопрос анализа особых (сингулярных) положений раскрыт недостаточно подробно. Несмотря на упоминание сингулярностей в выводах, их систематическое исследование не выделено в отдельный раздел.

3. В главе 3 приведено решение обратной задачи кинематики для двух механических систем относительного манипулирования. При этом решение прямой задачи отсутствует. Автор не приводит обоснования отсутствия данного раздела в работе.

4. При построении рабочей зоны синтезированной механической системы не исследовано влияние размеров звеньев модулей на неё.

5. В работе представлен эксперимент с исследованием повторяемости изготовленного физического прототипа механической системы относительного манипулирования, однако вывод о практической пригодности опережает результаты, так как испытания ограничены только исследованием кинематических параметров.

6. В главе 4 в разделе экспериментальных исследований не приведена процедура калибровки датчика МГ-1. Не исследованы погрешности изготовления и сборки механизма, влияние люфтов. Также нет исследований под нагрузкой.

7. В работе имеются незначительные опечатки. Например, на стр. 6 опечатка в слове «расширенные».

Приведенные замечания не снижают ценности выполненного исследования и полученных результатов. Замечания также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Мухина К.С. «Разработка и исследование механических систем относительного манипулирования с применением механизмов семейства «Дельта»», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение, является законченной научно-квалификационной работой и полностью соответствует

требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

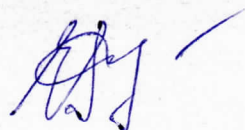
В работе сформулирована и решена научная задача, имеющая важное значение для развития методов проектирования и алгоритмов анализа механических систем относительного манипулирования, применяемых в различных отраслях промышленности. Полученные результаты являются новыми. Они в достаточной степени опубликованы автором в открытой печати и представлены на профильных научных конференциях.

Диссертация оформлена надлежащим образом, а ее содержание соответствует пунктам 1, 2 и 3 паспорта специальности 2.5.2. Машиноведение. Автореферат диссертации составлен по установленной форме и полностью отражает основное содержание работы. Результаты исследования представлены в 7 публикациях, из них 4 статьи в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 2 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, и 1 работа в издании, индексируемом в базе РИНЦ, получены 2 патента РФ на изобретения.

Диссертация «Разработка и исследование механических систем относительного манипулирования с применением механизмов семейства «Дельта»» соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Мухин Кирилл Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение.

Отзыв утвержден по результатам обсуждения на заседании кафедры автоматики и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), протокол № 1 от 25.08. 2026 г.

Заведующий кафедрой автоматики
и промышленной электроники,
д.т.н., доцент Рыжкова Е.А.



Контакты ведущей организации

Адрес: 119071, Москва, ул. Малая Калужская, д. 1, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)

Телефон: 8 (495) 811-00-01

Эл. почта: info@rguk.ru

