

В диссертационный совет 24.1.075.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института машиноведения им.
А.А. Благонравова Российской
академии наук (ИМАШ РАН)

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 (технические науки)

Структура и объем диссертации

Диссертация Мухина К.С. содержит 184 страницы, 70 рисунков и 14 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и семи приложений. По объему проведенных исследований, структуре, научной и практической новизне работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней и паспорту специальности 2.5.2. Машиноведение.

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация К.С. Мухина сфокусирована на решении актуальной научно-технической задачи — создании механических систем относительного манипулирования, востребованных в современном машиностроении. Внедрение данных систем позволяет существенно оптимизировать процессы аддитивного производства, механической обработки, сборки и контроля изделий. Использование механизмов параллельной структуры семейства «Дельта» в механических системах относительного манипулирования позволяет увеличить их быстродействие, точность и расширить рабочую зону при сохранении заданных габаритов оборудования.

Теоретическая часть исследования направлена на разработку алгоритмов анализа обратной кинематической задачи, алгоритма расчета рабочей зоны и алгоритма расчета скоростей шестиподвижных

механических систем относительного манипулирования с применением механизма параллельной структуры семейства «Дельта» в качестве механизма верхнего модуля.

Практическая значимость подтверждается полным циклом разработки: от проектирования и виртуального моделирования до создания физических прототипов и экспериментальной проверки теоретических положений. Постановка целей и задач исследования представляется логичной и обоснованной.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, связанная с необходимостью создания технологического оборудования, обеспечивающего взаимное перемещение инструмента и заготовки по шести степеням свободы. Отмечается, что применение традиционных многокоординатных механических систем, состоящих из одного модуля, в ряде случаев ограничивается сложностью конструкции и управления, недостаточной жесткостью и ограниченными размерами рабочей зоны. В качестве перспективного направления рассматриваются механические системы относительного манипулирования, состоящие из нескольких взаимодействующих модулей, совместное движение которых позволяет распределить степени свободы между инструментом и заготовкой и улучшить функциональные возможности оборудования.

В **первой главе** выполнен обзор известных механических систем относительного манипулирования, их конструктивных схем, областей применения и методов кинематического исследования. Рассмотрена классификация систем с различными комбинациями степеней свободы модулей, в том числе шестиподвижных систем с сочетаниями «5+1», «4+2» и «3+3». Проанализированы известные промышленные и исследовательские конструкции, применяемые при обработке материалов, в аддитивных технологиях, сварке, сборочных и контрольно-измерительных операциях. Показано, что двухмодульная структура позволяет разграничить функции позиционирования инструмента и заготовки и получить дополнительные возможности их относительной ориентации.

Рассмотрены методы решения прямой и обратной кинематических задач, методы построения рабочей зоны, а также подходы к анализу скоростей и особых положений механизмов. Особое внимание уделено специфике систем относительного манипулирования, в которых результирующее движение выходного звена определяется совместным относительным движением двух модулей. По результатам обзора установлено, что многие известные методы построения рабочей зоны рассматривают модули отдельно и не в полной мере учитывают их взаимное движение и возможную интерференцию звеньев. Также отмечена недостаточная изученность систем с четырехподвижными модулями. На основании проведенного анализа обоснована перспективность разработки шестиподвижных систем с четырехподвижным дельта-подобным верхним и двухподвижным нижним модулями.

Во второй главе рассматривается структурный синтез шестиподвижных механических систем относительного манипулирования. Сначала выполнено сравнение возможных комбинаций модулей с разным числом степеней свободы. В результате анализа функциональных требований к технологическому оборудованию выбран вариант «4+2», обеспечивающий наилучшие возможности пространственной ориентации заготовки и инструмента.

Для верхнего модуля проведено сравнение четырехподвижных механизмов семейства «Дельта» по совокупности конструктивных, кинематических и технологических характеристик. Рассмотрены различные варианты четырехподвижных дельта-механизмов, после чего в качестве наиболее рациональной для решения поставленных задач выбрана конструкция, обеспечивающая поступательные перемещения выходного звена и его наклон вокруг горизонтальной оси. Такое сочетание позволяет расширить возможности ориентации инструмента при сохранении преимуществ параллельной структуры.

Для нижнего модуля рассмотрены двухподвижные механизмы различных типов и разработаны варианты их совместного применения с выбранным верхним модулем. В результате синтезированы шестиподвижные системы относительного манипулирования с четырьмя степенями свободы верхнего модуля и двумя степенями свободы

нижнего модуля. Рассмотренные конструкции ориентированы на применение при механической обработке, аддитивном формообразовании, контрольно-измерительных и сварочных операциях.

Третья глава посвящена разработке и исследованию алгоритмов кинематического анализа синтезированных систем. Вначале разработаны алгоритмы решения обратной кинематической задачи для двух вариантов системы, отличающиеся конструкцией двухподвижного нижнего модуля: системы с механизмом 2-RRRRR/1-U и системы с механизмом 2-RUU/1-U. Алгоритмы позволяют определить управляемые приводные координаты по заданному относительному положению и ориентации выходных звеньев модулей. Работоспособность предложенных подходов продемонстрирована на численных примерах.

Особое место в главе занимает разработка алгоритма построения рабочей зоны системы с учетом совместного относительного движения модулей. При этом учитываются ограничения перемещений и углов в шарнирах, а также возможность столкновения звеньев верхнего и нижнего модулей. Разработанный подход позволяет определять достижимую область относительных положений и ориентаций выходных звеньев, в том числе рабочую зону при заданной ориентации и рабочую зону при заданном положении. Полученные результаты верифицированы посредством моделирования с применением САПР. Показано, что учет ограничений шарниров и интерференции звеньев может существенно изменять фактическую рабочую зону по сравнению с ее определением как простого пересечения рабочих зон отдельных модулей.

Далее разработаны алгоритмы анализа скоростей для обеих синтезированных систем относительного манипулирования. Получены зависимости, связывающие линейные и угловые скорости выходных звеньев модулей со скоростями приводных координат. Проведены численные исследования заданных траекторий относительного движения. Результаты, полученные предложенными аналитическими алгоритмами и результаты численного дифференцирования совпали, что подтверждает корректность разработанных методов.

В **четвертой главе** выполнено виртуальное и физическое прототипирование разработанной системы относительного

манипулирования. Для изготовления физического прототипа выбран вариант нижнего модуля последовательной структуры. Такой выбор обусловлен, в частности, технологическими и конструктивными преимуществами при изготовлении и сборке физического образца по сравнению с вариантом с круговой направляющей. На основе выбранной схемы создана сборочная компьютерная модель, позволившая проработать компоновку узлов, конструкцию деталей, спецификацию и технологию сборки, а также проверить результаты кинематического анализа и отсутствие недопустимых пересечений звеньев.

На основе виртуального прототипа разработана конструкторская документация и изготовлен физический прототип шестиподвижной механической системы, который подтвердил принципиальную реализуемость предложенной конструкции и возможность ее сборки в лабораторных условиях.

Экспериментальная часть работы посвящена исследованию повторяемости ориентации выходного звена верхнего модуля. Для измерений использован инерциальный измерительный модуль МГ-1. Исследования проведены в трех различных положениях выходного звена в рабочей зоне. Для каждого положения осуществлялось десять повторений для каждой из двух заданных ориентаций. В качестве количественных характеристик определялись среднее значение, среднеквадратичное отклонение и размах измеренных углов.

В **заключении** обобщены результаты проведенного исследования. Автором разработана группа новых двухмодульных шестиподвижных механических систем относительного манипулирования, включающая четырехподвижный верхний модуль на основе механизма семейства «Дельта» и двухподвижный нижний модуль, в том числе с возможностью неограниченного вращения. Разработаны аналитические алгоритмы решения обратной кинематической задачи и анализа скоростей, а также алгоритм построения рабочей зоны с учетом ограничений в шарнирах и интерференции звеньев при относительном движении модулей. Определены особые конфигурации, в которых система теряет часть управляемой подвижности при сохранении подвижности отдельных модулей.

Теоретические результаты верифицированы на виртуальных моделях и подтверждены при испытаниях физического прототипа. Разработанный и изготовленный образец подтвердил наличие требуемого числа степеней свободы и принципиальную работоспособность предложенной конструкции. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность практической реализации разработанной механической системы и адекватность предложенных теоретических моделей.

Научная новизна работы, заключается в том, что: разработаны схемы двухмодульных шестиподвижных систем, сочетающих механизм семейства «Дельта» (4 степени свободы) и двухподвижный модуль с неограниченным вращением; созданы универсальные аналитические алгоритмы решения обратных задач кинематики (положения и скорости) для данных систем; разработан итерационный метод построения рабочей зоны с учетом ограничений в шарнирах и интерференции звеньев; предложен алгоритм проектирования шестиподвижных систем относительного манипулирования на базе параллельных механизмов типа «Дельта».

Теоретическая ценность работы заключается в разработке новых двухмодульных систем относительного манипулирования на основе параллельных механизмов «Дельта» и алгоритмов их кинематического исследования.

Практическая значимость работы подтверждается проектированием и изготовлением физического прототипа шестиподвижной системы, включающей «Дельта»-механизм и двухподвижный модуль с неограниченным вращением. Эффективность предложенных решений подтверждена их внедрением в производственную деятельность АО «НПО «Пульс»» и ООО «ТОННЕЛИОН», а также использованием в образовательных программах МГТУ им. Н.Э. Баумана и научно-исследовательских проектах ИМАШ РАН.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и результатов. Научные положения и результаты работы являются обоснованными, достоверными и оригинальными. Работа основана на общепринятых допущениях, строгости математических

выкладок, применении апробированных методик кинематического анализа, а также сравнении теоретических и практических результатов исследования.

Соответствие направления и темы диссертационных исследований паспорту научной специальности. Представленная диссертация соответствует пунктам паспорта научной специальности 2.5.2. Машиноведение.

Замечания

1. Раздел 1.1.2 называется «Примеры структурных схем и прототипов механических систем относительного манипулирования», но из 15-ти рисунков раздела только один является структурной схемой, все остальные либо фотографии механизмов, либо компьютерные 3Д модели механизмов.

2. Во второй главе автор обосновывает целесообразность применения комбинации модулей «4+2» по сравнению с комбинацией «3+3», однако приведенное сравнение носит преимущественно качественный характер и не сопровождается количественной оценкой таких характеристик, как рабочая зона, жесткость, точность, количество сингулярных положений, масса подвижных звеньев и др.

3. В работе упоминается влияние особых положений на поведение механической системы относительного манипулирования, однако особенности работы механизма вблизи сингулярностей не рассмотрены.

4. В разделе 4.3 «Экспериментальные исследования разработанной механической системы относительного манипулирования» ничего не говорится о степени точности измерительного оборудования и о том, как погрешность измерений влияет на полученные результаты. Также неясно, чем обусловлен выбор модуля МГ-1 для экспериментальных исследований, если сам же автор на стр. 126 утверждает, что он не обеспечивает достаточную точность при определении линейных перемещений.

5. В третьем выводе в разделе 4.4 приводится формулировка: «Разработана и реализована экспериментальная методика оценки повторяемости ориентации выходного звена... », однако в предшествующих разделах работы описание данной методики отсутствует.

6. Неясно, почему список литературы состоит преимущественно из иностранных источников или публикаций российских ученых в иностранных изданиях, хотя на страницах 6 и 7 диссертации приведен внушительный список отечественных ученых, сделавших задел для настоящей работы.

Заключение

Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки рецензируемой работы. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы Мухиным К.С. в 7 публикациях, в числе которых 2 работы, включенные в перечень ВАК РФ, 4 статьи, индексируемые в Scopus и Web of Science и 1 работа, индексируемая в РИНЦ, а также получены 2 патента РФ на изобретения.

Диссертационная работа по объему проведенных исследований, актуальности, научной новизне и практической значимости удовлетворяет требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Мухин Кирилл Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Механика»
ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ



Воробьева Н.С.

Дата «11» сентября 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет»

Адрес: 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, 26

Телефон: +7 (8442) 41-18-49

E-mail: vgsxa@mail.ru

