

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Ждановой Юлии Ильдаровны

### **«Методы анализа, синтеза и алгоритмы управления антропоморфным захватным модулем сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев»**

по научной специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Актуальность темы** диссертации Ю.И. Ждановой по созданию антропоморфных захватных устройств для человекоподобных роботов обусловлена несколькими ключевыми факторами: необходимостью работы в технологических процессах, ориентированных на работу человека, используя отвёртку, ножницы, молоток, ручку, джойстик и другие предметы. Антропоморфная кисть представляет собой механизм, который может выполнять тысячи различных типов захватов (от силового до прецизионного пинцетного), тогда как промышленному захвату для каждой новой задачи нужна смена насадки. Решая задачу создания антропоморфных захватных устройств, также необходимо иметь в виду актуальную задачу протезирования. Оператор в экзоскелете должен чувствовать, что управляет «своей» рукой, при этом биоморфность механики снижает когнитивную нагрузку на оператора. При использовании индивидуальных приводов для каждого выходного звена антропоморфного захватного модуля увеличиваются его габаритные размеры и масса, снижаются грузоподъемность и функциональность, поэтому применение группового привода выходных звеньев является актуальной задачей.

**Научная новизна** полученных в диссертации Ю.И. Ждановой заключается в следующем.

1. Дополнен и развит метод анализа сложных систем с изменяемой структурной схемой, позволяющей идентифицировать способ обхвата объекта. Определены необходимые конструктивные составляющие, введение которых обеспечивает реализацию способа обхвата: щипкового, по контуру, комбинированного.

2. Предложен метод структурного синтеза антропоморфного захватного модуля по независимым уровням, учитывающий параметры, несвязанные иерархическими связями (патенты № 144196, № 218694).

3. Предложен и обоснован подход к построению исполнительной группы звеньев с изменяемой структурной схемой с введением дополнительных силовых элементов между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения, реализующий создание дополнительных силовых воздействий, удерживающих объект при обхвате и удержании (патенты № 2570597, № 185794).

4. Разработан метод параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходным звеньям, обеспечивающий уменьшение поперечных габаритов исполнительной группы звеньев и стабильное значение сил на выходных звеньях при обхвате объектов предельных размеров.

5. Разработан алгоритм управления двигателями оппозитных исполнительных групп звеньев при обхвате недетерминированного и незафиксированного объекта, исключая необходимость копирующего режима, выполняемого оператором.

6. Разработан алгоритм управления моментом на двигателях, обеспечивающий создание заданного усилия на выходных звеньях без установки на них датчиков сил.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации** подтверждается использованием апробированного математического аппарата, реализацией алгоритмов управления приводами в проектах, выполненных АО «НПО «Андроидная техника» по техническим заданиям ПАО «РКК «Энергия» (шифр СЧ ОКР – «ТЕЛЕДРОИД-НА»), ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» (проект «Каньон»), публикациях в открытой печати, а также апробацией и обсуждением результатов на всероссийских и международных конференциях.

#### ***Краткая характеристика основного содержания диссертации***

Диссертация Ю.И. представлена на 180 страницах, содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы из 157 наименований, 2 приложения, 74 рисунка и 13 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность и важность темы исследований, определены цели и решаемые задачи, сформулирована научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор существующих тенденций в создании захватных модулей сервисных роботов, методов структурного и параметрического синтеза антропоморфных захватных модулей, используемых алгоритмов управления при обхвате объекта и его удержании.

Показано, что сложности компоновки индивидуальных приводов выходных звеньев определили переход к новому классу механизмов с групповым приводом и изменяемой структурной схемой или так называемые «недостаточно управляемые захваты» (*underactuated grippers*). Определена цель и задачи диссертационной работы

**Вторая глава** посвящена решению задач, связанных с развитием метода анализа механизмов с групповым приводом с изменяющейся структурной схемой. Обоснована необходимость использования функциональных схем для исследования процессов захвата и идентификации способов обхвата объектов. В механизмах с изменяемой структурной схемой введены дополнительные связи строения - в виде кинематических соединений и связи функционирования – упругие элементы (пружины). Определены правила их отображения на функциональной схеме и реализуемости силовых действий между звеньями.

Функциональные схемы позволяют разъяснять взаимодействие подсистем исполнительной группы и отображать сопоставимым образом конструкции, построенные с использованием различных видов передачи движения.

Предложенный метод анализа механизмов с изменяемой структурной схемой, основанный на построении и исследовании функциональных схем, обеспечивает

разъяснение процессов взаимодействия между звеньями ее подсистем и внешним объектом. Метод позволяет идентифицировать способ обхвата по числу введенных дополнительных связей строения и функционирования, определить необходимые конструктивные компоненты для реализации обхвата: по контуру, щипковый, комбинированный.

**В третьей главе** решаются задачи, связанные со структурным и параметрическим синтезом антропоморфного захвата с групповым приводом. Определяющим фактором при этом является качество обхвата объекта, определяемое числом точек контакта, силовым взаимодействием выходных звеньев с объектом. Ограничивающими параметрами выступают масса и габариты, зависящие от числа степеней подвижности, массы и габаритов двигателей, а также систем передачи движения. Сформулированы ряд критериев оптимальности, определяющих «качество выполнения» обхвата объекта в виде отношения показателя качества к функции «затрат», выраженной через проектируемые параметры структурных схем.

Разработан алгоритм структурного синтеза антропоморфного захвата, отличающийся анализом возможных вариантов построения, с использованием индивидуальных критериев на каждом иерархическом уровне в виде совокупности проектируемых параметров, в функции затрат, к показателю, отражающему качество взаимодействия с объектом.

Предложен алгоритм параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходным звеньям, отличающийся обеспечением соразмерного значения усилия на выходном звене при обхвате объектов с предельными размерами.

Обоснован принцип построения исполнительных групп звеньев с групповым приводом, отличающийся тем, что дополнительные связи функционирования вводятся между звеньями подсистем, образованных выходными звеньями и звеньями системы передачи движения, что обеспечивает создание дополнительных силовых контуров, действующих на объект со стороны выходных звеньев на этапе обхвата и удержания.

**В четвертой главе** решаются задачи разработки алгоритмов управления двигателями исполнительных групп звеньев на этапах обхвата и удержания объекта.

Состояние объекта на опоре определяется по информации о контакте одного из выходных звеньев с внешним объектом и возможности дальнейшего движения ведущего звена привода. По данному показателю определяется закрепленность объекта.

Обхват зафиксированного объекта выполняется при одновременном независимом движении звеньев оппозитных исполнительных групп.

Управление двигателями обеспечивает поочередное движение звеньев, начиная с проксимальных, оппозитных исполнительных групп до их контакта с объектом. Алгоритм основан на непрерывном контроле и анализе изменения двух типов параметров: углов относительного поворота выходных звеньев – по показаниям энкодера и соответствие текущих моментов сопротивления движению. Если моменты сопротивления движению становится больше момента «свободного движения», который определяется предварительно, движение в текущей группе звеньев прекращается и выполняется движение в оппозитной группе звеньев до вступления в контакт с объектом следующего звена. Обхват, в общем случае,

завершается после достижения поверхности объекта всеми звеньями каждой исполнительной группы.

Предложен алгоритм управления двигателями, реализующими движение выходных звеньев оппозитных исполнительных групп, основанный на регистрации контакта звеньев и обеспечивающий обхват незакрепленных объектов без их смещения.

Разработан алгоритм непрямого управления усилием на выходном звене без использования датчиков силы, основанный на анализе значения текущего момента на двигателе и момента, рассчитанного (приведенного) по заданной величине усилия на выходном звене.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы** заключается в разработке принципиально новых методов анализа механизмов «с недостаточным приводом». На основе построения функциональных схем; формализации задачи структурного синтеза антропоморфного захватного модуля удалось разработать подход к построению группового привода антропоморфного захватного модуля с более эффективным силовым взаимодействием проксимального и медиальных звеньев с внешним объектом; управления заданным усилием на выходном звене, основанном на анализе приведенного момента.

В диссертационной работе решена важная для развития сервисной робототехники совокупность задач, направленная на разработку методов синтеза и управления антропоморфными захватными модулями, обладающих повышенными эксплуатационными возможностями, такими как обхват и удержание недетерминированных объектов без участия в управлении человека, функционирование в стесненных условиях и при наличии радиации. Предложенные алгоритмы и методики использованы при разработке исполнительных групп звеньев антропоморфного захвата и программ управления движением выходных звеньев в рамках проекта «ТЕДЕДРОИД», выполняемого АО «НПО Андроидная техника» (ПАО «РКК «Энергия»), что обеспечило взаимодействие с объектами, определенными в техническом задании и с размерами сечения от 22 мм до 89 мм. Алгоритмы управления оппозитными исполнительными группами применены при модернизации комплекса управления захватом «Мобильного роботизированного манипулятора для работы с радиоактивными отходами» (заказчик «РосРАО»).

Исполнительная группа звеньев с изменяемой структурной схемой является новым, мало изученным классом механизмов. Для их исследования впервые предложено использовать функциональные схемы. Это позволило разъяснить процессы, протекающие при их функционировании и найти новое решение качественно меняющегося силового взаимодействия при охвате объекта.

Предложенный метод исследования сложных механизмов, основанный на построении функциональных схем, может быть использован при анализе и создании новых устройств.

Следует отметить комплексный подход к решению задач синтеза. На этапе структурного синтеза, на основе обоснованного разделения на независимые иерархические уровни, построены алгоритмы формирования всех параметров, определяющих антропоморфный захватный модуль. В основу метода параметрического синтеза рычажной системы передачи движения обоснованно

сформированы функциональные ограничения, вытекающие из технического задания определяющие условия функционирования захвата.

В целом диссертация Ю.И.Ждановой является законченным исследованием, представляет решение актуальных задач, объединенных общим подходом, обеспечивающих создание антропоморфных хватных модулей с заданными характеристиками для сервисных роботов.

**Замечания по работе.** К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. Почему использовался термин «изменяемая структурная схема» а не «переменная»? Понятие переменность структурной схемы введено в курс ТММ еще в 1946 г В.В. Добровольским для механизмов, в которых в процессе работы меняется число кинематических пар и подвижных звеньев.

2. В соответствие с принятым критерием оптимальности сделан вывод о предпочтительности структурной схемы исполнительного модуля по варианту с четырьмя исполнительными группами звеньев – два оппозитно двум (рис. 3.2, стр. 84). Не дана сравнительная оценка данного варианта со структурной схемой присущей руке человека.

3. Кинематическая схема, принятая к реализации (рис.3.16, стр. 116) отличается от исследованной в п.3.3.5 (рис.3.15, стр. 113). Применительно к ней не приведены расчетные зависимости для выполнения параметрического синтеза аналогичные зависимостям (3.23) – (3.36)

4. В материалах диссертации не представлены расчеты, необходимые для выбора жесткости дополнительных связей функционирования.

5. В качестве дополнительных связей функционирования используются пружины. Отсутствуют указания на используемый тип (кручения, сжатия).

6. Не представлена информация о необходимой величине предварительной деформации дополнительных связей функционирования.

7. В п.4.5.2 используется термин «приведенный момент». Однако, по сути, определяется не приведенный, а движущий момент обеспечивающий работу исполнительной группы звеньев.

8. В п 4.5. рассмотрено VII вариантов взаимодействия выходных звеньев с объектом на этапе удержания. При этом не рассмотрен вариант соответствующий щипковому обхвату.

9. Имеются неточности в формулировках. В табл. 3.7 (стр.115) указываются размеры перечных сечения выходных звеньев. Хотя, по сути, представлены габаритные размеры звеньев по высоте.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Ю.И.Ждановой.

#### **Общее заключение.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 печатных работ, включая 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК по научной специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 7 публикаций в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 1 свидетельство на регистрацию ПрЭВМ, 1 патент на изобретение, 3 патента на полезные модели.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на нескольких конференциях

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации и результаты проведенных исследований.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Диссертация написана соискателем самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения, представленные для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе Ю.И. Ждановой в науку, а также содержит сведения о практическом использовании полученных соискателем научных результатов.

Диссертационная работа «Методы анализа, синтеза и алгоритмы управления антропоморфным захватным модулем сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата технических наук согласно пунктам 9 – 14, действующего «Положения о присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с актуальными на настоящий момент времени изменениями), а ее автор, Жданова Юлия Ильдаровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Официальный оппонент  
заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин  
доктор технических наук, профессор

*Игорь Владимирович Меркурьев*  
02.06.2026  
Меркурьев Игорь Владимирович

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Контактные данные тел.: +7 495 362-75-60, e-mail: MerkuryevIV@mpei.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:  
01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры  
Адрес места работы: 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14,  
стр. 1, <https://www.mpei.ru/>

Подпись И.В. Меркурьева удостоверяю:

« 6 » ЛИСТОВ	Вх. № 05-65-56 « 05 » 06 2026 г. ВолгГТУ
-----------------	--

*с одобрением*

*05.06.2026*

