

На правах рукописи



Жданова Юлия Ильдаровна

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА, СИНТЕЗА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
АНТРОПОМОРФНЫМ ЗАХВАТНЫМ МОДУЛЕМ СЕРВИСНОГО РОБОТА  
С ГРУППОВЫМ ПРИВОДОМ ВЫХОДНЫХ ЗВЕНЬЕВ**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Волгоград - 2026

Работа выполнена на кафедре «Системная инженерия» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор,  
**Романов Михаил Петрович.**

**Официальные оппоненты:** **Меркурьев Игорь Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва  
кафедра «Робототехники, мехатроники,  
динамики и прочности машин», заведующий.

**Захаров Евгений Николаевич,**  
кандидат технических наук, федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный аграрный  
университет»,  
кафедра «Педагогика и методика  
профессионального обучения», доцент.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского Российской академии  
наук (ИПМех РАН), г. Москва

Защита состоится «25» июня 2026 г. в 12.00 часов на заседании на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru) по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/01a/01ae58a3c4ebc3f3b3c527416ba4d376.pdf>

Автореферат разослан «24» апреля 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Попов Андрей Васильевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Антропоморфные роботы - активно развивающееся направление в робототехнике. Роботы данного типа относятся к классу сервисных (ГОСТ Р 60.0.0.4-2019) и предназначены для замены человека при работе с объектами в космосе, под водой, в сельском хозяйстве, на вредном и опасном производстве. Непосредственно действия с объектами выполняются антропоморфными захватными модулями. ГОСТ Р 60.2.0.3—2022 «Роботы и робототехнические устройства. Сервисные роботы. Биоморфные роботы. Термины и определения» определяет их как «функциональный модуль, реализующий взаимодействие с объектами внешней среды, имеющий кинематические и силовые характеристики, присущие кисти руки человека». Как правило, сервисный робот взаимодействует с объектами с изначально неопределенной формой и размерами. Их удержание возможно за счет создания силового контакта по значительному числу точек. Антропоморфный захватный модуль имеет несколько однотипных исполнительных групп звеньев и может включать до 15 выходных звеньев.

При использовании индивидуальных приводов для каждого выходного звена увеличиваются габариты и масса робота, снижаются его грузоподъемность и функциональность. Исключается возможность выполнения действий в стесненных условиях. В связи с этим, как правило, число выходных звеньев ограничивается до четырех в двух оппозитных исполнительных группах. При этом для надежного удержания недетерминированного объекта необходимо шесть и более выходных звеньев, управляемых согласованно.

В первых сервисных роботах преимущественно использовались антропоморфные захватные модули, структурно повторяющие построение кисти руки человека. Сложность одновременного управления значительным числом выходных звеньев определило применение копирующего способа с участием оператора. Современные требования к сервисному роботу предполагают работу без прямого управления оператором. Это определило переход к новым принципам построения антропоморфных захватных модулей. Приоритетным стало обеспечение адаптивности положения выходных звеньев к поверхности изначально недетерминированного объекта без использования внешнего управления, уменьшение массы и габаритов, расширение функциональных возможностей.

Таким требованиям соответствуют антропоморфные захватные модули с исполнительными группами звеньев с особым групповым приводом, названным в зарубежной литературе «underactuated grippers» («с недостаточным приводом»). В каждой исполнительной группе движение выходных звеньев обеспечивает один двигатель.

В настоящее время захватные модули «с недостаточным приводом» активно разрабатываются для роботов - ассистентов космонавтов: NASA с General Motors (США), NASA и DARPA (США), DFKI (Германия), European Space Agency, японского аэрокосмического агентства JAXA, ПАО «РКК «Энергия» совместно с ПАО «НПО «Андроидная техника», для роботов работающих под водой: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Китай), University of Illinois (США), Harvard University (США). Существующие технические решения и используемые алгоритмы управления не удовлетворяют в полной мере условиям взаимодействия с объектами в реальной

обстановке: неопределенности их исходного положения, формы и размеров, стесненности рабочей зоны, наличия радиации.

Степень разработанности научной проблемы. Исполнительные группы звеньев, построенных по принципу «с недостаточным приводом», являются новым классом механизмов, в которых в процессе обхвата объекта изменяется структурная схема и выходное звено, являющееся объектом управления. Каждая исполнительная группа представляет собой совокупность двух параллельных подсистем: выходных звеньев, передачи движения и дополнительно введенных силовых элементов в виде пружин. Традиционный метод анализа, проводимый по структурной схеме, не позволяет определить число степеней подвижности, выполнить анализ силового взаимодействия между звеньями подсистем и внешним объектом, оценить влияние вводимых дополнительных силовых элементов. По ней не идентифицируется важная характеристика захвата - способ обхвата объекта: по контуру, щипковый, комбинированный. Не определяются необходимые конструктивные элементы для реализации требуемого способа обхвата. Для исследования механизмов «с недостаточным приводом» необходим метод, позволяющий разьяснять процессы, протекающие при обхвате между звеньями подсистем и внешним объектом, идентифицировать реализуемый способ обхвата.

Для анализа многодвигательных механических систем А.Н. Макаров впервые предложил использовать функциональные схемы. Однако им не рассматривались вопросы представления и анализа механизмов с изменяющейся структурной схемой. В связи с этим развитие метода анализа сложных механических систем на основе функциональных схем является актуальной задачей.

Определяющий вклад в развитие основ построения антропоморфных хватных модулей, реализующих принцип «с недостаточным приводом», внесли Т. Laliberty, L. Birgleny, С. М. Gosselin из Universite Laval (Канада), предложившие базовую концепцию построения исполнительных групп с введением в систему дополнительных силовых связей в виде пружин между выходными звеньями.

Структурная схема антропоморфного хватного модуля определяется совокупностью параметров: числом исполнительных групп звеньев, классом кинематических пар, соединяющих их с основанием, числом выходных звеньев и степеней подвижности в каждой исполнительной группе. В научно - технической литературе не представлены работы, посвященные структурному синтезу антропоморфных хватных модулей. Это объясняется тем, что часть проектируемых параметров не имеют непосредственной связи между собой, что исключает возможность представления их в единой целевой функции. Кроме того, проектируемые параметры верхнего уровня не являются системой на последующем. Это не позволяет использовать традиционные методы проектирования по иерархическим уровням. Для синтеза структуры антропоморфного хватного модуля необходимо разработать метод, учитывающий перечисленные особенности.

Исследование известных и разработка новых конструкций исполнительных групп звеньев с использованием «недостаточного привода» ведется в следующих странах: Японии: Kanazawa University, Osaka University; США: University of Illinois, Harvard University; Канаде: Universite Laval, Китае: Tsinghua University, School of Robotics, Institute of Rehabilitation and Medical Robotics Huazhong, School of Mechanical Engineering and Automation Harbin Institute, Huazhong University of Science and Technology.

Наиболее значимые работы выполнены учеными: A. Zhang, L. Wang, J. Jin, D. Chen, R. Liu (University of Illinois), P. Yu, L. Wang, J. Jin, Z. Ye, D. Chen (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), N. Sinatra, C. Teeple, D. Vogt, K. Parker (Harvard University), Takumi Oku (Kanazawa University) Kensuke Harada (Osaka University), A. Kobayashi (Tohoku University).

Вопросы кинематики и силового анализа применительно к варианту построения исполнительных групп звеньев с введением дополнительных силовых элементов (пружин) между выходными звеньями представлены в работах: P. Rea (University of Cassino), D. Hirano, K. Nagaoka (Yale University) L. Kang, S. Kim, B. Yi (Nanjing University), W. Chen, C. Xiong, Y. Wang (Hunan University). Однако специфика силового взаимодействия выходных звеньев и объекта, возникающая при иных вариантах введения дополнительных связей, в частности между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения, не исследована.

В используемых алгоритмах управления движением выходных звеньев антропоморфных захватных модулей предполагается известное и фиксированное положение симметричного объекта. В реальной ситуации точное расположение объекта не определено. Кроме того, объект может смещаться под действием со стороны робота, что не учитывается в существующих алгоритмах управления. На этапе удержания объекта для управления двигателем наиболее часто используется метод контроля импеданса. Однако метод применим для деформируемых объектов и симметричном их положении относительно оппозитных исполнительных групп.

Повышение эксплуатационных возможностей антропоморфных захватных устройств с групповым приводом типа «недостаточный привод» предполагает решение совокупности актуальных задач: развитие метода анализа и построения такого типа систем, структурного и параметрического синтеза, разработки алгоритмов управления двигателями на этапах обхвата и удержания недетерминированных и незакрепленных объектов.

**Объектом исследования** является антропоморфный захватный модуль сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев.

**Предмет исследования** - методы анализа, синтеза и алгоритмы управления антропоморфным захватным модулем сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев.

**Цель исследования:** повышение эксплуатационных возможностей антропоморфного захватного модуля сервисного робота за счёт реализации обхвата жёстких недетерминированных объектов с широким диапазоном захватных сечений от 22 мм до 89 мм с адаптацией выходных звеньев к профилю поверхности.

Поставленная цель достигается решением совокупности задач:

- выполнить анализ антропоморфных захватных модулей сервисных роботов с групповым приводом выходных звеньев. Оценить степень соответствия их возможностей требованиям, предъявляемым к сервисным роботам, работающим в сложных условиях;

- разработать метод идентификации способов обхвата объекта исполнительными группами звеньев с групповым приводом. Определить требуемые конструктивные решения для их реализации;

- выполнить аналитическое исследование силового взаимодействия выходных звеньев на объект для возможных вариантов построения группового привода «с недостаточным приводом»;

- решить задачу структурного синтеза антропоморфного захватного модуля;
- разработать алгоритм управления оппозитными исполнительными группами звеньев при обхвате недетерминированных объектов;
- разработать математическую модель и алгоритм управления моментом на двигателе, создающего на выходных звеньях заданную по величине силу;
- разработать критерии и решить задачу параметрического синтеза рычажной системы передачи движения для группового привода исполнительной группы звеньев, с учетом стесненных условий рабочей зоны робота.

**Соответствие паспорту специальности** – материалы диссертации соответствуют п.1 «Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов» и п.5 «Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление» паспорта научной специальности 2.5.4 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

#### **Научная новизна результатов исследования:**

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.

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость заключается в формировании принципиально новых методов: анализа механизмов «с недостаточным приводом» на основе построения функциональных схем; формализации задачи структурного синтеза антропоморфного захватного модуля, позволяющий учесть совокупность параметров, не имеющих межуровневой связи; обоснования варианта построения группового привода с более эффективным силовым взаимодействием проксимального и медиальных звеньев с внешним объектом; управления заданным усилием на выходном звене, основанном на анализе приведенного момента.

**Практическая значимость.** Решена важная для развития сервисной робототехники совокупность задач, направленная на разработку методов синтеза и управления антропоморфными захватными модулями, обладающих повышенными эксплуатационными возможностями: обхват и удержание недетерминированных объектов без участия в управлении человека, функционирование в стесненных условиях и при наличии радиации. Предложенные алгоритмы и математический аппарат использованы при разработке исполнительных групп звеньев антропоморфного захвата и программ управления движением выходных звеньев в рамках проекта «ТЕЛЕДРОИД», выполняемого АО «НПО Андронидная 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»).

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач использовались аналитические методы: структурного и силового исследования рычажных механизмов, формализации задач оптимизации сложных систем, графического программирования в среде LabVIEW.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод анализа по функциональным схемам позволяет идентифицировать способ обхвата объекта. Установлено, что в исполнительную группу с тремя выходными звеньями для реализации обхвата по контуру следует ввести две дополнительные связи функционирования (пружины). Для выполнения комбинированного варианта обхвата следует ввести две дополнительные связи функционирования (пружины) и две дополнительные связи строения в виде кинематических соединений.
2. Установлено, что введение дополнительных связей функционирования между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения обеспечивает формирование дополнительных удерживающих силовых контуров, действующих с проксимального и медиального звеньев на объект.
3. Метод структурного синтеза антропоморфного захватного модуля позволил определить оптимальную схему, имеющую четыре попарно оппозитные исполнительные группы с двенадцатью выходными звеньями и групповым приводом в каждой из них.
4. Метод параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходным звеньями обеспечивает обхват объекта с диаметром от 20 мм при высоте звеньев 0,35 % от суммарной длины исполнительной группы.
5. Алгоритм управления движением выходных звеньев оппозитных исполнительных групп при обхвате отличается сохранением исходного положения незакрепленного и недетерминированного объекта.
6. Разработанный алгоритм непрямого управления заданным усилием на выходном звене отличается исключением необходимости установки на них датчиков силы, что уменьшает габариты звеньев и позволяет захватному модулю функционировать в условиях радиации.

**Достоверность исследования** подтверждается использованием апробированного математического аппарата, реализацией алгоритмов управления приводами в проектах, выполненных АО «НПО «Андронидная техника» по техническим заданиям ПАО «РКК

«Энергия» (шифр СЧ ОКР – «ТЕЛЕДРОИД-НА»), ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» (проект «Каньон»), а также апробацией и обсуждением результатов на всероссийских и международных конференциях.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах в период с 2018 по 2024 г.: Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (ER(ZR)), 2018 г.; MATEC Web of Conferences (EDP) 2018 г.; Международная конференция 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", 2019 г.; Международная конференция Mechanical and Automation Engineering (MIP), 2019 г.; Международная конференция Advanced Technologies in Material Science, Международная конференция Metrological Support of Innovative Technologies, 2020 г.; Международная конференция Materials Science and Engineering Modeling of technical systems. (CAD / CAM / CAE), 2020 г.; XIV Всероссийская научно-технической конференция «Робототехника и искусственный интеллект» г. Железногорск, 2022 г.; X Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике», 2023 г.; Международная конференция Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics, 2024 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 20 печатных работ, включая 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК: Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления (К3); Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки (К3); Современная наука и инновации (К2); Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки (К2); Автоматизация в промышленности (К2); Computational Nanotechnology (К2), 7 публикаций в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 1 свидетельство на регистрацию ПрЭВМ, 1 патент на изобретение, 3 патента на полезные модели. Полный перечень публикаций соискателя по теме исследования представлен в приложении А диссертационной работы.

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, теоретические выводы и практические решения, сформулированы и изложены автором самостоятельно.

Представленные в диссертации: метод анализа исполнительных групп звеньев антропоморфных захватных модулей с переменной структурной схемой по функциональным схемам [1], метод структурного синтеза антропоморфного захватного модуля [3, 4, 9], алгоритмы управления движением выходных звеньев оппозиционных исполнительных групп звеньев [2] получены автором лично. Публикации некоторых результатов выполнены совместно с соавторами, вклад автора в этих работах является определяющим.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа включает введение, 4 главы, заключение, список литературы и 2 приложения, список литературы (157 наименований), содержит 74 рисунка и 13 таблиц. Объем основного текста диссертации 180 страниц.

### **Основное содержание работы**

**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.

Установлено, что сформировался переход к созданию антропоморфных захватных модулей с принципиально новым типом исполнительных групп звеньев, в которых используется специальный групповой привод - «underactuated grippers» («недостаточный привод»). Техническая сущность привода в большей степени отражается понятием – «с изменяемой структурной схемой», так как в каждый момент времени имеет место совпадение числа двигателей и числа выходных звеньев. При этом текущая структурная схема и выходное звено определяется внешними условиями. Исполнительная группа представляет собой совокупность двух параллельных подсистем: выходных звеньев и передачи движения дистальному звену от двигателя, установленного вне выходных звеньев, и дополнительных силовых элементов – пружин. Принятое конструктивное решение обеспечивает выполнение независимых движений выходных звеньев от одного двигателя.

Существующий метод анализа механизмов, основанный на исследовании структурных схем, не позволяет определять свойства и характеристики такого типа систем: число степеней подвижности, силовое взаимодействие между звеньями и объектом. Это обусловлено тем, что структурная схема механизма изменяется в процессе обхвата объекта. Для исследования следует разработать метод, основанный на построении функциональных схем, позволяющий определять перечисленные характеристики. Кроме того, метод анализа должен обеспечивать идентификацию нового качества, присущего захватным модулям – способ обхвата: по контуру, щипковый, комбинированный и конструктивные решения, необходимые для их осуществления.

Остаются нерешенными, применительно к антропоморфным захватным модулям с изменяемой структурной схемой, методы структурного и параметрического синтеза, алгоритмы управления при обхвате незакрепленных и недетерминированных объектов, контроля силового взаимодействия выходных звеньев и объекта без использования датчиков силы. Это ограничивает возможности использования сервисного робота при выполнении действий в реальной обстановке. Для решения определенных проблем и достижения поставленной цели сформулированы задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена решению задач, связанных с развитием метода анализа механизмов с групповым приводом с изменяющейся структурной схемой. Традиционный метод анализа по структурной схеме определяет их как механизмы с избыточной подвижностью, что не соответствует фактическому положению. Обоснована необходимость для разъяснения процессов и идентификации способов обхвата, использования функциональных схем, впервые предложенных как метод анализа многодвигательных механических систем А.Н. Макаровым.

В механизмах с изменяемой структурной схемой вводятся дополнительные связи строения - в виде кинематических соединений и связи функционирования – в виде пружин. Определены правила их отображения на функциональной схеме и реализуемых при этом силовых действий между звеньями (рисунок 1).

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

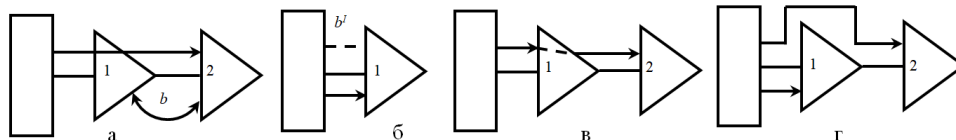
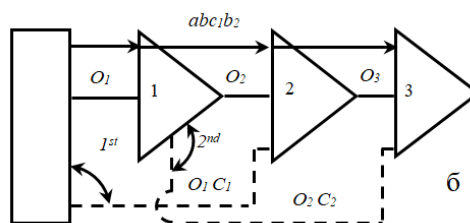
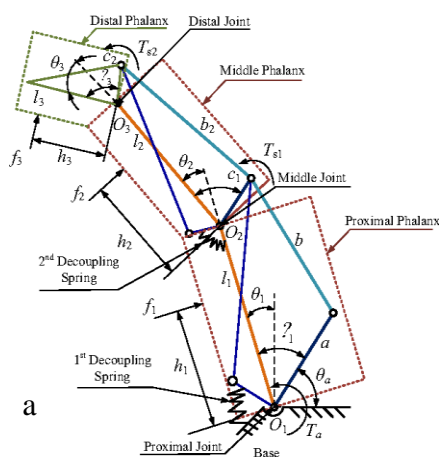


Рисунок 1 – Графическое представление: а - дополнительной связи функционирования  $b$ , введенной между звеном 1 и 2; б - дополнительной связи строения  $b^l$ , введенной между стойкой и звеном 1; в - кинематически зависимого движения звена 2 от движения звена 1; г - передачи движущего момента звену 2 без образования подвижных соединений привода со звеном 1

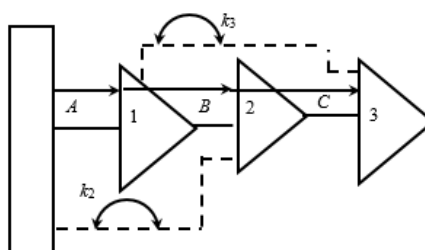
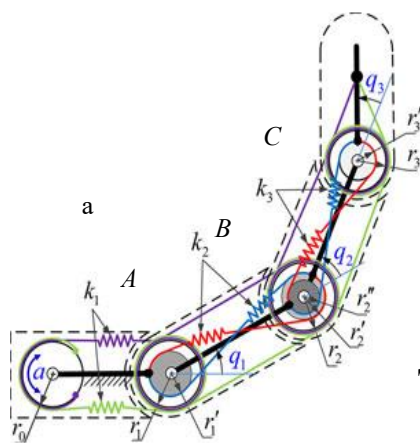
На рисунках 2 и 3 представлены структурные схемы исполнительных групп звеньев с рычажной и тросовой системой передачи движения и соответствующие им функциональные схемы. В соответствии с описанием работы представленных авторами конструкций оба варианта исполнительных групп звеньев реализуют комбинированный способ обхвата. Общность признаков, выявленная при анализе функциональных схем, определяется введением двух дополнительных связей строения и функционирования.

Идентификация способа обхвата выполняется по числу вводимых дополнительных связей строения и функционирования (таблица 1).



Дополнительные связи строения:  $O_1C_1, O_2C_2$   
Дополнительные связи функционирования:  $1^{st}, 2^{nd}$

Рисунок 2 – Исполнительная группа звеньев Tsinghua University с комбинированным способом обхвата: а - структурная схема; б - функциональная схема



Дополнительные связи строения: две замкнутые канатные передачи  
Дополнительные связи функционирования:  $k_2, k_3$

Рисунок 3 - Исполнительная группа звеньев (Huazhong University) с тремя выходными звеньями, реализующая комбинированный способ обхвата: а - структурная схема; б - функциональная схема

Таблица 1 - Идентификация способов обхвата

Число выходных звеньев	Дополнительные связи строения	Дополнительные связи функционирования	Способ обхвата
n = 2	-	1	По контуру
	1	1	Комбинированный
n = 3	1	1	По контуру для двух звеньев
	-	2	По контуру
	2	2	Комбинированный

Для обхвата по контуру в исполнительную группу с тремя выходными звеньями следует ввести две дополнительные связи функционирования (пружины). Для комбинированного обхвата по две дополнительные связи: функционирования (пружины), связи строения - в виде кинематических соединений.

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, двигателей, систем передачи движения.

Структурная схема антропоморфного захвата является многоуровневой. Синтез ведется от исполнительного модуля - уровень  $a1$  до системы передачи движения - уровень  $d1$  (рисунок 4). По завершении выполняется синтез модуля управления  $a2$ .

На каждом уровне формируются структурные схемы:  $a1$  - исполнительного модуля, состоящего из исполнительных групп звеньев,  $b1$  - исполнительной группы звеньев,  $c$  - выходных звеньев ( $c1$ ), привода ( $c2$ ).

Структурная схема привода включает силовую составляющую - двигатель и редуктор, которые рассматриваются как единая компонента и систему передачи движения. Последняя используется для силовой взаимосвязи двигателя и  $j$  выходного звена при наличии между ними  $j - 1$  выходных звеньев.

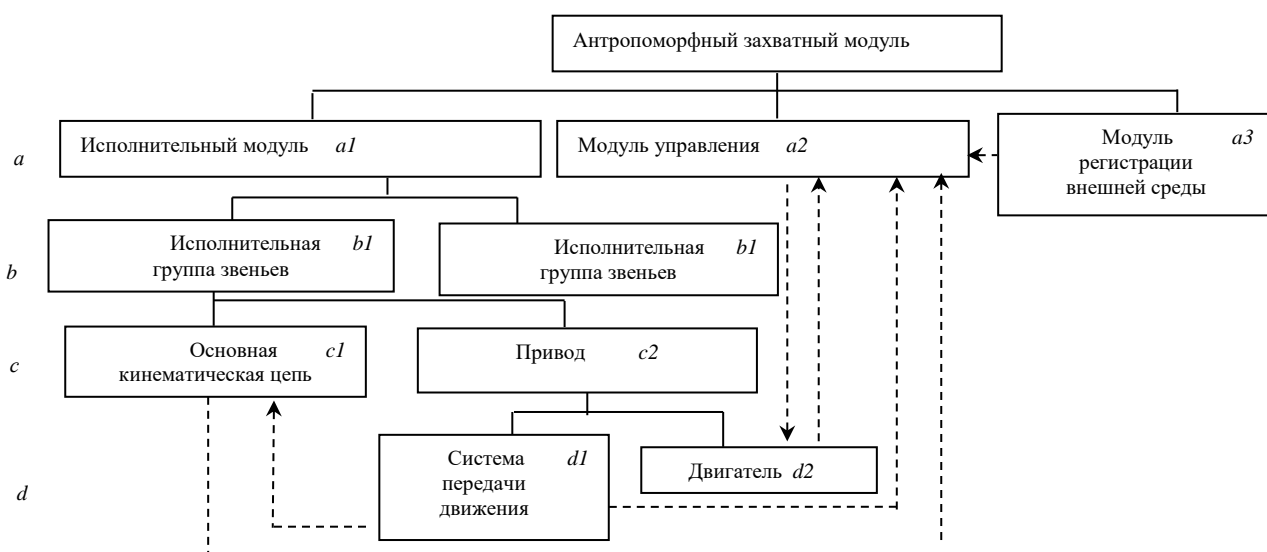


Рисунок 4 – Схема построения и взаимодействия частей антропоморфного захватного модуля

Проектируемые параметры каждого уровня не связаны межуровневыми, иерархическими связями, т.е. проектируемый параметр верхнего уровня не является системой для последующего. Для каждого  $i$  уровня формируется индивидуальный критерий оптимальности  $Y_i$ , определяющий «качество выполнения» обхвата объекта в виде отношения показателя качества  $K_i$  к функции «затрат»  $f(x_{ij})$ , выраженной через проектируемые параметры структурой схемы данного уровня  $x_{ij}$ :

$$Y_i = K_i / f(x_{ij}) . \quad (1)$$

На уровне  $a1$  выходными (проектируемыми) параметрами являются число исполнительных групп звеньев и схема, определяющая их соединение с основанием антропоморфного захвата. В качестве показателя качества  $K_1$  принята площадь поверхности, в пределах которой может находиться внешний объект в исходном положении исполнительных групп звеньев (рисунок 5). Критерием оптимальности является величина «относительного обхвата»  $Y_1$ :

$$Y_1 = K_1 / (N \cdot R), \quad (2)$$

где  $N$  – число исполнительных групп звеньев, входящих в захватный модуль;  $R$  – число степеней подвижности, образованных исполнительными группами звеньев и основанием.

Зависимость  $f(x_{ij})$ , связывающая проектируемые параметры, принята в виде произведения. Это обусловлено тем, что имеет место мультипликативное увеличение «затрат» - числа кинематических пар, в зависимости от числа исполнительных группы звеньев. В таблице 2 представлено значение критерия оптимальности  $Y_1$  для вариантов построения структурных схем (см. рисунок 5).

Характеристикой структуры исполнительной группы звеньев (уровень  $b1$ ) является число точек контакта с объектом  $K_2$ , совпадающее с числом выходных звеньев. Проектируемыми параметрами являются: число двигателей  $t$ , число независимо изменяющихся при обхвате обобщенных координат  $r$ . В структурной схеме может быть реализовано равенство проектируемых параметров  $t = r$  - индивидуальные приводы,  $t > r$  – избыточный привод,  $t < r$  – групповой привод.

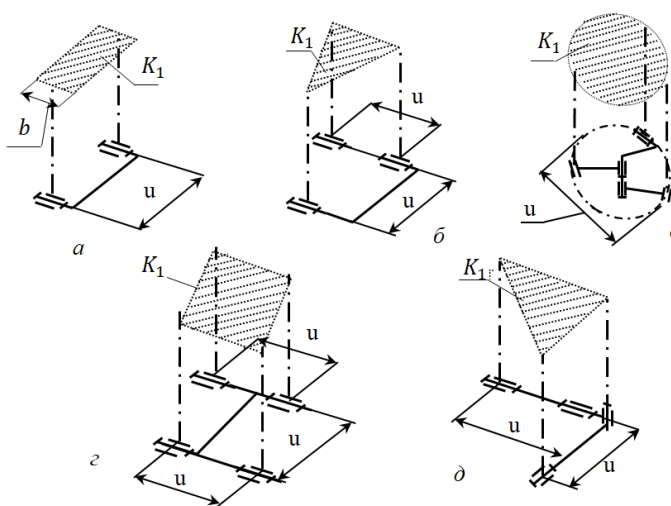


Рисунок 5 – Варианты построения структурных схем исполнительного модуля

Таблица 2 - Критерий оптимальности для вариантов построения исполнительного модуля

Вариант	N	R	$K_1$	$Y_1$
<i>a</i>	2	2	$b \cdot u$	$0,02 u^2$
<i>б</i>	3	3	$0,5 u^2$	$0,056 u^2$
<i>в</i>	3	5	$0,25 \pi u^2$	$0,052 u^2$
<i>г</i>	4	4	$u^2$	$0,063 u^2$
<i>д</i>	3	4	$0,5 u^2$	$0,042 u^2$

Критерий оптимальности имеет вид

$$Y_2 = K_2 / (t/r) . \quad (3)$$

Проектируемые параметры  $t$  и  $r$  являются «конфликтными», поэтому функциональная зависимость между ними принята в виде «отношения».

В таблице 3 представлены значения критерия  $Y_2$  в зависимости от сочетания параметров и соответствующий ему тип структурной схемы исполнительной группы звеньев.

Для двухзвенной исполнительной группы оптимальным является использование одного двигателя, обеспечивающего движение звеньев - III. Для исполнительной группы с тремя выходными звеньями предпочтителен вариант с одним двигателем и возможностью независимого изменения трех обобщенных координат – VII.

Синтез на уровне  $c_2$  выполняется для структурной схемы исполнительной группы, соответствующей оптимальному варианту сочетания параметров на уровне  $b_1$ . При этом определяется структурная схема привода: число и положение двигателя относительно приводимого в движение звена. Показателем качества функционирования приводов  $K_3$  является контакт максимального числа выходных звеньев с внешним объектом. Это обеспечивается числом независимо изменяющихся углов относительного поворота звеньев при обхвате  $r$ , т.е.  $K_3 = r$ . Проектируемыми параметрами является вариант размещения двигателя на звене основной кинематической цепи и число систем передачи движения, обеспечивающих движение. Параметр, определяющий расположение двигателя, выражается через коэффициент «утяжеления»  $k$ . Коэффициент принимает значения при размещении двигателя на основании – 1, проксимальном звене - 2, медиальном - 3. На одном выходном звене может располагаться несколько двигателей.

Для двухзвенной исполнительной группы оптимальным является использование одного двигателя, обеспечивающего движение звеньев - III. Для исполнительной группы с тремя выходными звеньями предпочтителен вариант с одним двигателем и возможностью независимого изменения трех обобщенных координат – VII.

Синтез на уровне  $c_2$  выполняется для структурной схемы исполнительной группы, соответствующей оптимальному варианту сочетания параметров на уровне  $b_1$ . При этом определяется структурная схема привода: число и положение двигателя относительно приводимого в движение звена. Показателем качества функционирования приводов  $K_3$  является контакт максимального числа выходных звеньев с внешним объектом. Это обеспечивается числом независимо изменяющихся углов относительного поворота звеньев при обхвате  $r$ , т.е.  $K_3 = r$ . Проектируемыми параметрами является вариант размещения двигателя на звене основной кинематической цепи и число систем передачи движения, обеспечивающих движение. Параметр, определяющий расположение двигателя, выражается через

коэффициент «утяжеления»  $k$ . Коэффициент принимает значения при размещении двигателя на основании – 1, проксимальном звене - 2, медиальном - 3. На одном выходном звене может располагаться несколько двигателей.

Таблица 3 - Сочетание проектируемых параметров и значение  $Y_2$

$K_2$	Переменные параметры		Критерий оптимальности $Y_2$	Обозначение варианта сочетания параметров	Тип структурной схемы исполнительной группы звеньев
	$t$	$r$			
2	1	1	1	I	Кинематически зависимый
		2	4	II	Изменяемая
	2	2	2	III	Индивидуальным приводом
3	1	1	3	IV	Кинематически зависимый
		2	6	V	Изменяемая для двух звеньев, зависимый для дистального
		3	9	VI	Изменяемая
	2	2	3	VII	Индивидуальным приводом двух звеньев, зависимый для дистального звена
		3	4,5	VIII	Индивидуальным приводом + изменяемая структурой для двух звеньев
	3	3	3	IX	Индивидуальным приводом

Параметром, характеризующим привод, является наличие системы передачи движения и расположение ее звеньев -  $l$ . При расположении всех звеньев передачи движения в пределах одного выходного звена  $l = 1$ , при расположении на двух подвижных звеньях  $l = 2$ .

Критерий оптимальности и функция «затрат» имеют вид

$$Y_3 = K_3 / f(x_{3j}), \quad (4)$$

$$f(x_{3j}) = (\sum_{i=1}^3 (n_i k_i) + \sum_{j=1}^2 (e_j l_j)), \quad (5)$$

где  $n_i$  - число двигателей на звене;  $e_j$  - число звеньев системы передачи движения на  $i$  звене.

В таблице 4 представлены значения параметров, определяющие структурную схему привода и критерии оптимальности для предпочтительных вариантов исполнительных групп (см. таблицу 3).

Таблица 4 - Сочетание проектируемых параметров и критерия оптимальности

Вариант схемы привода	$K_3 = r$	$t$	$n_i$	$k_i$	$e_j$	$l_j$	$Y_3$
II	2	1	1	1	1	1	1
VI	3	1	1	1	1	2	1
VIII	3	2	1	1	1	2	0,75

Структурный синтез, выполненный по трем первым иерархическим уровням, показал, что оптимальным является использование четырех исполнительных групп звеньев с оппозитным расположением  $2 * 2$ , каждая из которых имеет по три выходных звена с движением, обеспечиваемым одним двигателем, расположенном на основании, через групповой привод.

Синтез системы передачи движением выполняется для VII типа структурной схемы. Основные варианты размещения дополнительной связи функционирования представлены применительно к рычажной системе передачи движения (рисунок б).

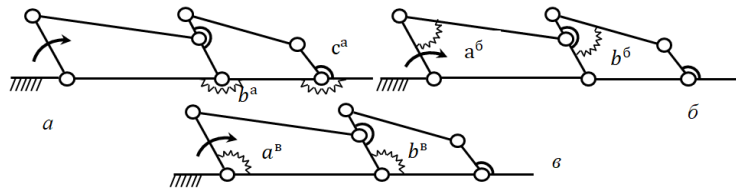


Рисунок 6 – Основные варианты построения структурных схем исполнительных групп звеньев с рычажной системой передачи движения

Силовое взаимодействие выходных звеньев и объекта определяется местом установки дополнительных связей функционирования. Усилия, действующие на объект со стороны выходных звеньев, определяются силовыми контурами, в которых замыкание ведется на объекте (рисунок 7).

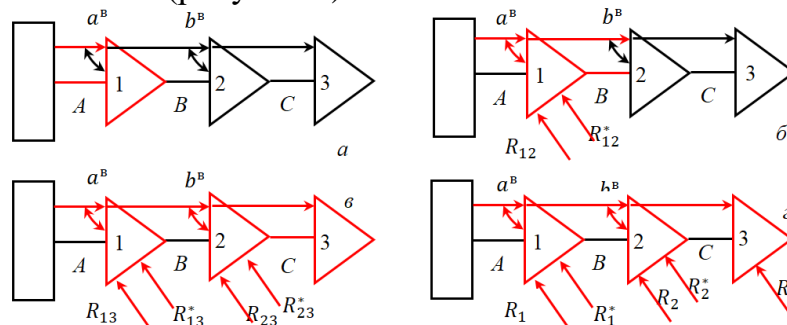


Рисунок 7 - Силовые контуры, возникающие на этапах обхвата для структурной схемы на рисунке 6, в: а - движения звена 1; б - движение звена 2; в - движение звена 3; г - обхвата объекта

Проектируемыми параметрами на данном уровне являются число двигателей -  $x_{14}$  и число вводимых дополнительных связей функционирования -  $x_{24}$ . Показатель качества  $K_4$  – суммарное количество силовых контуров на этапе обхвата ( $K_{41}$ ) и удержания ( $K_{42}$ ) объекта. Критерий оптимальности имеет вид

$$Y_4 = K_4 / (x_{14} + x_{24}) . \quad (6)$$

В таблице 5 представлены проектируемые параметры и соответствующее значение критерия оптимальности.

Таблица 5 - Сочетание проектируемых параметров и критерия оптимальности

Вариант общей схемы (см. рисунок 6)	$K_{41}$	$K_{42}$	$K_4$	$x_{14}$	$x_{24}$	$Y_4$
а	0	3	3	1	2	1
б	0	3	3	1	2	1
в	2	5	7	1	2	2,3

Введение дополнительных связей функционирования между звеньями системы передачи движения и выходными звеньями (патенты № 2570597, № 185794) обеспечивает формирование дополнительных сил, действующих со стороны проксимального и медиального звеньев на объект на этапах обхвата и удержания.

Параметрический синтез выполнен применительно к варианту с рычажной системой передачи движения. В качестве критерия оптимальности принято обеспечение угла между шатуном и ведомым коромыслом  $\beta_i$ , близким к  $\pi/2$ . В связи с изменением угла  $\beta_i$  при различных углах относительного поворота выходных звеньев в качестве целевой функции выступает зависимость

$$F = \min \sum_1^2 (k_{1s} (|\pi/2 - \beta_{sh}|) + (k_{2s} (|\pi/2 - \beta_{sk}|))) , \quad (7)$$

где  $\beta_{SH}$  и  $\beta_{SK}$  - углы между шатуном и ведомым коромыслом, соответствующие минимальному и максимальному углу относительного поворота между выходными звеньями, имеющими место при обхвате объектов с предельными размерами;  $k_{1s}$ ,  $k_{2s}$  – коэффициенты, определяющие приоритетность создания усилия выходным звеном при минимальном или максимальном угле относительного поворота.

В качестве прямого ограничения принято значение коромысел менее 0,35 от суммарной длины выходных звеньев, что соответствует отношению поперечного размера пальца к его длине в перчатке космонавта.

Найденные значения проектируемых параметров обеспечили отклонение величины момента от среднего значения в кинематических парах: для проксимального звена - 20,2 %, медиального - 7,8 %, дистального - 8,3%.

**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. При идентификации объекта как свободного выполняется согласованное движение звеньев оппозитных исполнительных групп (рисунок 8).

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  $T_{ij}$  с моментами «свободного движения», определяемыми предварительно  $[T_{ij}]$ . При  $T_{ij} \geq [T_{ij}]$  движение в текущей группе звеньев прекращается и выполняется движение в оппозитной группе звеньев до вступления в контакт с объектом  $i$  звена. Обхват, в общем случае, завершается после достижения поверхности объекта всеми звеньями каждой исполнительной группы.

После завершения этапа обхвата на объект может одновременно воздействовать несколько выходных звеньев, но наибольшая по величине сила создается управляемым звеном, имеющим максимальное значение  $i$ . Параметром управления выступает сила  $F_I$ , создаваемая звеном на объект. Ее значение задается изначально, а для контроля, без использования датчиков силы, предлагается использовать непрямой метод.

По информации о положении звеньев на завершающем этапе обхвата идентифицируется один из семи возможных вариантов взаимодействия с объектом. Для каждого варианта получены аналитические зависимости приведенного момента  $T_{PI}$  при заданном значении силы  $F_I$  на управляемом звене. Зависимости получены для исполнительной группы с рычажной системой передачи движения и введением дополнительных связей функционирования по варианту  $v$  (см. рисунок 6).

Управление моментом на двигателе основывается на сравнении текущего значения  $T_D$  с приведенным  $T_{PI}$ . При выполнении условия  $T_D - T_{PI} \leq \delta T$ , где  $\delta T$  - допустимое отклонение приведенного момента, рассчитываемого через допустимую разницу силы, создаваемой на объекте -  $\delta F_I$ , условие удержания с заданной силой обеспечивается.

Для реализации алгоритма управления достаточно минимального аппаратного оснащения: датчиков контакта на звеньях, энкодера на валу двигателя. Программное обеспечение формируется в зависимости от используемого на работе комплекса. При этом адаптация алгоритмов управления не требуется.

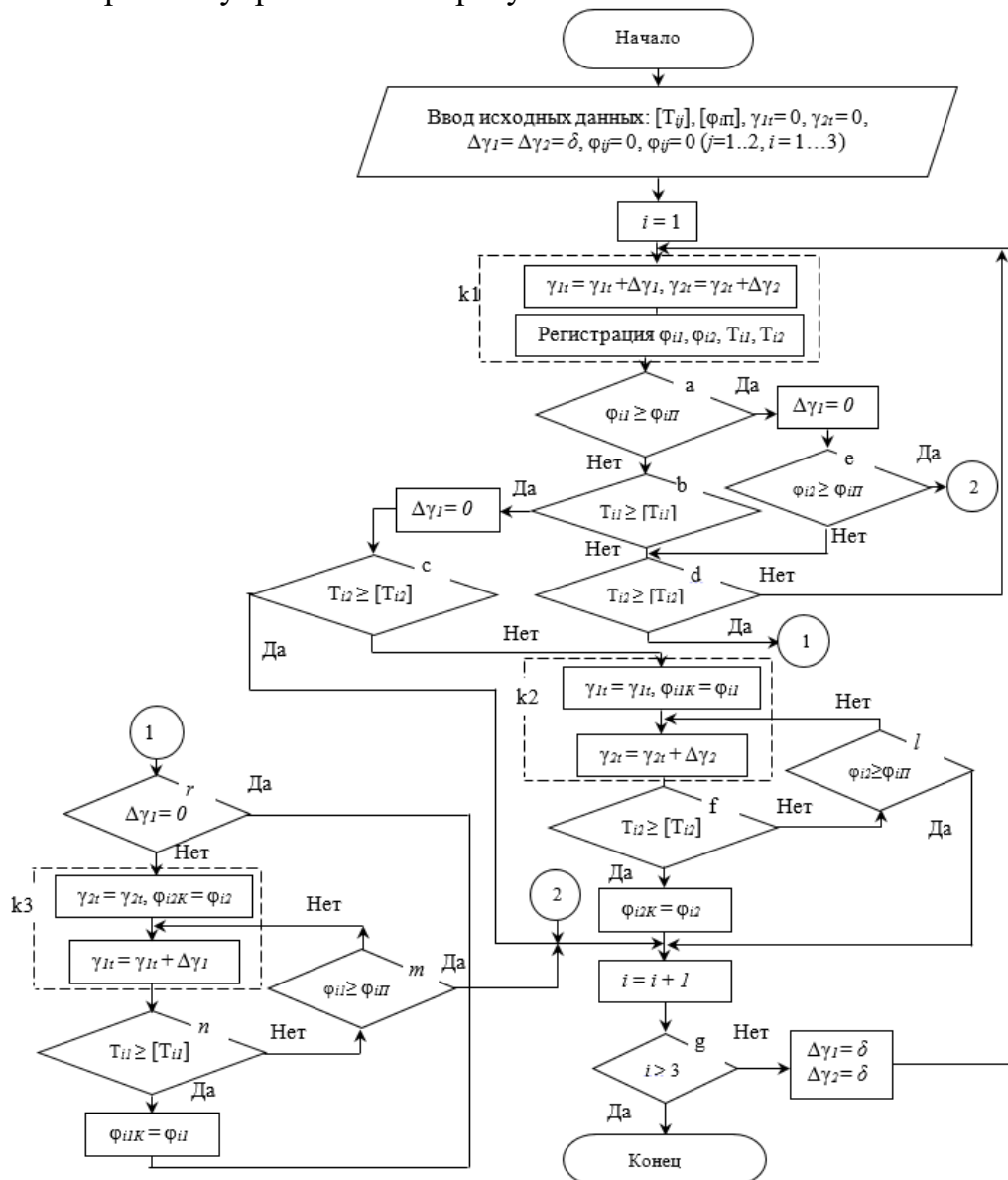


Рисунок 8 - Блок - схема алгоритма управления двигателями оппозитных исполнительных групп звеньев на этапе обхвата объекта, не зафиксированного на опоре

### Заключение

Совокупность предложенных моделей, алгоритмов представляют собой решение актуальной научно-технической задачи создания адаптивных антропоморфных захватных модулей, способных взаимодействовать с недетерминированными объектами без участия оператора, имеющими важное значение для выполнения работ сервисными роботами в условиях, потенциально опасных для человека:

1. Анализ известных антропоморфных захватных модулей показал, что повышение эффективности сервисных роботов определяется снижением массы захватного модуля, возможностью взаимодействия с недетерминированными объектами: без участия оператора, в стесненных условиях, при наличии радиации.

Обоснована актуальность разработки методов анализа свойств нового типа группового привода как механизма с изменяемой структурной схемой, структурного и параметрического синтеза, методов управления при действии с недетерминированными объектами.

2. Разработан метод идентификации способа обхвата по числу введённых дополнительных связей строения и функционирования, позволяющий определить необходимые конструктивные компоненты для реализации обхвата: по контуру, щипковый, комбинированный. 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.

3. Выполнено аналитическое исследование силового взаимодействия выходных звеньев на объект. 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.

4. Решена задача структурного синтеза антропоморфного захватного модуля. Разработан алгоритм, 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.

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

6. Разработана математическая модель и 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.

7. Разработаны критерии и алгоритм параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходным звеньям, отличающийся обеспечением соразмерного значения усилия на выходном звене при обхвате объектов с предельными размерами, с учетом стесненных условий рабочей зоны робота.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Публикации в рецензируемых изданиях входящих в Перечень ВАК РФ:**

1. Жданова, Ю.И. Методика построения антропоморфного захвата с адаптивным управлением / Ю.И. Жданова – Текст: непосредственный // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. -2020. - № 3. - С. 24-30. (К3)

2. Жданова, Ю. И. Структурный синтез антропоморфного захвата с адаптивным управлением движением выходных звеньев/ Ю.И. Жданова – Текст: непосредственный // Современная наука и инновации. – 2020. – №. 4. – С. 18-27 (К3).

3. Жданова, Ю.И. Алгоритм адаптивного управления оппозитными исполнительными системами с переменной структурой / Ю.И. Жданова – Текст: непосредственный // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические Науки. – 2021. -№ 2. - С. 51-57. (К3)

4. Жданова, Ю.И. Обоснование структурной схемы исполнительской группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев / Ю.И. Жданова, Е.А. Дудоров, А.А. Богданов. – Текст: непосредственный // Известия вузов. Северо - Кавказский регион. Технические науки. - 2022. - № 2 (214). - С. 30-36. (К2).

5. Жданова, Ю.И. Алгоритмы управления двигателями антропоморфного захвата с групповым приводом // Ю.И. Жданова, В.В. Мошкин, М.П. Романов. – Текст: непосредственный // Computational Nanotechnology. - 2023. Т. 10. № 4. С. 72–83. (К2).

6. Жданова, Ю.И. Развитие метода анализа механических систем с изменяемой структурой / Ю.И. Жданова В.В. Мошкин, М.П. Романов. – Текст: непосредственный // Автоматизация промышленности. - 2024. - № 5. – С. 26-31. (К2)

**Статьи в изданиях, включенных в базы данных Web of Science и Scopus:**

7. Zhdanova, Y. Research of kinematics of an actuating group of an anthropomorphic gripper with a common drive / A. Bogdanov, A. Permyakov, Y. Zhdanova. – Текст: электронный // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 224. – С. 01029. doi.org/10.1051/mateconf/201822401029: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38632896> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

8. Zhdanova, Y. I. Synthesis of Structure of Actuating Link Group with Common Drive Based on Formation and Analysis of Scheme of Functioning / A. Bogdanov, A. Permyakov, Y. Zhdanova. – Текст: электронный // 2019 International Science and Technology Conference" EastConf". – IEEE, 2019. – С. 1-5. doi: 10.1109 / EastConf.2019.8725323: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41696707> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

9. Zhdanova, Y. I. Parametric synthesis of system of transmission of motion to links of anthropomorphic gripper of variable structure / Y. Zhdanova. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 537. – №. 3. – С. 032089. doi:10.1088/1757-899X/537/3/032089: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41220758> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

10. Zhdanova, Y. Synthesis of structural scheme of drive of adaptive multiple-link gripper / A. Bogdanov, A. Permyakov, Y. Zhdanova. – Текст: электронный // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 161. – С. 03009. doi.org/10.1051/mateconf/201816103009: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35529874> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

11. Zhdanova, Y. I. Method of adaptive gripper drive control signal formation / Y. I. Zhdanova, V. V. Moshkin, I. G. Zhidenko – Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 4. – С. 042046. doi:10.1088/1742-6596/1515/4/042046: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43062353> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

12. Zhdanova, Y. I. Method of optimization synthesis of parameters of actuating system of anthropomorphic gripper with adaptive control / Y. I. Zhdanova, V. V. Moshkin – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 971. – №. 4. – С. 042065. (CAD / CAM / CAE). doi:10.1088/1757-

899X/971/4/042065: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54020434> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

13. Zhdanova, Y. Construction of Anthropomorphic Grippers with Adaptive Control / E. Dudorov, I. Zhidenko, V. Moshkin, A. Eryomin, E. Magid, A. Permyakov – Текст: электронный // Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics. 2024. Т. 29. С. 174–177. doi.10.5954/ICAROB.2024.OS5-6: сайт. <https://alife-robotics.co.jp/members2024/icarob/data/html/data/OS/OS5-6.pdf> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная библиотека Google Академия.

#### **В иных изданиях:**

14. Жданова, Ю.И. Антропоморфный захват с групповым приводом звеньев смежных исполнительных групп / Е.А. Дудоров, Ю.И. Жданова, И.Г. Жиденко – Текст: электронный // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием г. Железногорск, 26. 11. 2022 г. Робототехника и искусственный интеллект. – 2022. - С.9-15: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50345270> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

15. Жданова, Ю.И. Алгоритм не прямого управления антропоморфным захватом по параметру усилия на выходном звене / Ю.И. Жданова, М.П. Романов, В.В. Мошкин – Текст: электронный // Необратимые процессы в природе и технике. Труды Десятой Всероссийской конференции. Москва, 31.01.2023 -3.02.2023. - С.50 -53: сайт. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54020434> (дата обращения: 04.09.2024). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

#### **Патенты РФ о регистрации авторских прав:**

16. Патент № 144196 Российская Федерация. МПК В25J 15/10. Захват: № 2014113274/02: заявл. 04.04.2014; опубл. 10.08.2014 / Богданов А.А., Кутлубаева Ю.И., Пермяков А.Ф. А.Ф. Пермяков: заявитель А.Ф. Пермяков. – 8 с.:ил. – Текст: непосредственный.

17. Патент № 2570597 Российская Федерация. МПК В25J 15/12, А61F 2/54. Захват: № 2014123568/02 заявл. 09.06.2014; опубл. 10.12.2014 / А.А. Богданов, И.Г. Жиденко, Ю.И. Кутлубаева, А.Ф. Пермяков: заявитель и патентообладатель А.Ф. Пермяков. – 12 с.:ил. – Текст: непосредственный.

18. Патент № 185794 Российская Федерация. МПК В25J 15/08. Адаптивный привод группы звеньев захвата: № 2018100908 заявл. 10.01.2018; опубл. 19.12.2018 / А.Ф. Пермяков, А.А. Богданов, Ю.И. Жданова, заявитель и патентообладатель А.Ф. Пермяков. – 9 с.:ил. – Текст: непосредственный.

19. Пат. № 218694 Российская Федерация. МПК В25J 15/08. Адаптивный захват: № 2018100908 заявл. 06.06.2022; опубл. 06.06.2023 / А.Ф. Пермяков, А.А. Богданов, Е.А. Дудоров, И.Г. Жиденко, Ю.И. Жданова, Б.Б. Макаров, заявитель и патентообладатель А.Ф. Пермяков. – 6 с.:ил. – Текст: непосредственный.

20. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2022612029 Российская Федерация. Моделирование антропоморфного захвата ("Захват") / Жданова Ю. И., Мошкин В. В. Дата регистрации: 07.02.2022. Номер и дата поступления заявки: 2021668929, 19.11.2021. Дата публикации: 07.02.2022.