


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

На правах рукописи



Жданова Юлия Ильдаровна

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

Специальность 2.5.4 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры проблем управления РТУ МИРЭА
Романов Михаил Петрович

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5	
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ И УПРАВЛЕНИЮ АНТРОПОМОРФНЫМИ ЗАХВАТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ		
1.1 Анализ построения антропоморфных хватных устройств ...	20	
1.2 Анализ структуры приводов исполнительных групп звеньев антропоморфных хватных устройств	28	
1.3 Анализ применимости традиционной модели описания к сложным механизмам с изменяющейся структурной схемой	36	
1.4 Анализ методов параметрического синтеза систем передачи движения рычажного типа в механизмах с изменяющейся структурой....	40	
1.5 Анализ методов управления исполнительной группой звеньев с изменяемой структурной схемой	45	
1.6 Постановка задачи диссертационной работы	50	
ГЛАВА 2 МЕТОД АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ СОСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ		55
2.1 Общие принципы построения функциональных схем многодвигательных механических систем	55	
2.2 Особенности построения захватов с групповым приводом и их отображение на функциональных схемах	59	
2.3 Идентификация реализуемого обхвата объекта на основе анализа функциональной схемы	75	
2.4 Выводы по главе 2	77	
ГЛАВА 3 СТРУКТУРНО – ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АНТРОПОМОРФНОГО ЗАХВАТА С ГРУППОВЫМ ПРИВОДОМ.....		79
3.1 Формирование критериев и синтез структурной схемы антропоморфного захвата	79	
3.1.1 Схема построения антропоморфного захвата и последовательность выполнения структурного синтеза	79	

3.1.2 Принципы формирования критерия оптимальности структурных схем	81
3.1.2.1 Обоснование критерия для оценки структурных схем	81
3.1.2.2 Синтез структуры исполнительного модуля	82
3.1.2.3 Синтез структуры исполнительной группы звеньев	85
3.1.2.4 Синтез основной кинематической цепи	87
3.1.2.5 Определение типа структурной схемы привода	87
3.2 Синтез структурной схемы исполнительной группы звеньев с групповым приводом	90
3.2.1 Определение кинематических параметров исполнительной группы звеньев с групповым приводом	90
3.2.2 Синтез структурной связи между подсистемами исполнительной группы: выходных звеньев и звеньев системы передачи движения	94
3.3 Параметрический синтез рычажной системы передачи движения исполнительной группе с групповым приводом	106
3.3.1 Варианты построения исполнительной группы звеньев	106
3.3.2 Проектируемые параметры	108
3.3.3 Обоснование критерия оптимальности	108
3.3.4 Формализация условий связи и критерия оптимальности для исполнительной группы с двумя выходными звеньями	110
3.3.5 Формализация условий связи и критерия оптимальности для исполнительной группы с тремя выходными звеньями	112
3.3.6 Расчет параметров рычажной системы передачи движения по критерию оптимальности	115
3.3.7 Выводы по главе 3	117
ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ	
ОППОЗИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГРУПП ЗВЕНЬЕВ НА ЭТАПАХ	
ОБХВАТА И УДЕРЖАНИЯ	
119	
4.1 Особенности управления исполнительными группами антропоморфного захвата с изменяемой структурной схемой	119

4.2 Идентификация положения внешнего объекта на опоре	121
4.3 Алгоритм управления исполнительной группой звеньев при обхвате объекта, фиксированного от смещения по опоре	123
4.4 Алгоритм управления исполнительными группами звеньев при обхвате свободного внешнего объекта без изменения его положения на опоре	125
4.5 Управление усилием на выходном звене адаптивной исполнительной группы при удержании объекта	129
4.5.1 Алгоритм непрямого управления усилием на выходном звене при удержании внешнего объекта	130
4.5.2 Аналитические зависимости приведенного момента на двигателе от усилия на выходном звене исполнительной группы	135
4.5.2.1 Зависимости, определяющие расчетное положение звеньев исполнительной группы и дополнительных связей функционирования	135
4.5.2.2 Зависимости приведенного момента при контакте трех выходных звеньев на объекте управления	138
4.5.2.3 Определение вида зависимости приведенного момента при контакте с внешним объектом проксимального и медиального выходных звеньев	144
4.5.2.4 Определение приведенного момента при контакте с объектом проксимального выходного звена	147
4.5.2.5 Определение приведенных моментов для вариантов обхвата при достижении проксимальным звеном предельного положения	148
4.5.2.6 Определение приведенного момента при VII варианте обхвата	150
4.6 Выводы главе 4	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	154
Список литературы	158
Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационного исследования	178

Введение

Особенностью начала XXI века стало активное развитие сервисной робототехники [1, 2]. Первые разработанные роботы использовались для развлечений [3], испытания одежды [4]. Роботы оснащались примитивными захватными модулями или их имитаторами. Несколько позже стали разрабатываться антропоморфные роботы, ориентированные на совместную работу с человеком и объектами свойственной ему инфраструктуры [5]. Это определило новый подход к построению захватов, приближающихся по возможностям к кисти руки человека. Характерным для этого периода является захват, созданный в Gifu University (Japan) [6]. Захват Gifu включает пять исполнительных групп звеньев с 16-ю степенями подвижности (две из них в аналоге запястья). Движение по каждой степени обеспечивалось от индивидуальных серводвигателей, размещённых на выходных звеньях.

Успешное решение комплекса вопросов, связанных с построением и управлением антропоморфными роботами открыло широкие перспективы их применения для замены человека в опасных для него областях деятельности. Создаются роботы с антропоморфными захватными модулями для работы в космосе [7, 8], под водой [9], в составе подразделений МЧС [10 - 12].

Требования к захватному модулю стали определяться параметрами объектов, относящимся к инфраструктуре человека и изначально неопределёнными по форме и размерам. Их удержание возможно за счет создания силового контакта по значительному числу точек. Наиболее предпочтительными для этого являются антропоморфные захватные модули. 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 изначально неопределённой формы и размеров.

Их удержание возможно за счет создания силового контакта по значительному числу точек.

В соответствии с определением антропоморфный захватный модуль является сложной системой, взаимодействующей с недетерминированными объектами через значительное число выходных звеньев - аналогов фаланг. Аналогом пальцев при этом выступают исполнительные группы.

В общем случае антропоморфный захватный модуль может включать до 15 выходных звеньев, каждое из которых является независимым объектом управления. Параметрами управления при этом являются углы относительного поворота – на этапе обхвата, усилия, создаваемые на объекте, – на этапе удержания.

Создание антропоморфных захватных модулей и систем управления ими определило необходимость детального изучения взаимодействия кисти с объектами, кинематики и силовых параметров руки человека. Этому посвящены, в частности, работы [13 - 15].

Кисть человека имеет пять структурных составляющих (пальцев) и включает 15 суставов с 20 - ю степенями подвижности [16]. Движение по каждой степени подвижности реализуется через независимый привод. Прямое моделирование структурной схемы кисти в антропоморфном захватном модуле затруднительно. Это обусловлено несовершенством системы управления и габаритами существующих двигателей необходимой мощности. Неврологические исследования, выполненные в Columbia University (США), показали, что обхват человеческой кистью одного и того же объекта может выполняться с большой вариативностью [17]. С использованием специального индекса, предложенного для оценки алгоритма управления движением при выполнении обхвата, определена возможность использования минимального числа степеней подвижности. Авторы выделили подвижности, являющиеся необходимыми, – движения фаланг в суставах с параллельными осями. К аналогичному решению, но с практической точки зрения, пришли исследователи из Gifu University (Япония) [6]. Эти работы показывают, что

антропоморфный захватный модуль может иметь меньшее число степеней подвижности при сохранении основных возможностей.

В последнее десятилетие созданы мощные антропоморфные роботы: Walkman в Istituto Italiano di Tecnologia (Италия) (рисунок 1, а) [18], S-One/JAXON в The University of Tokyo Bunkyo-ku (Япония) [19], HRP-2 Kai в National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Япония) (рисунок 1, б) [20]. Манипуляторы этих роботов обладают мощностью приводов достаточной для перемещения грузов массой до 10 кг.

Антропоморфный робот TALOS, созданный в 2016 году совместно со специалистами Universit'e de Toulouse, CNRS, (Франция) и PAL - Robotics, (Испания), способен удерживать объект массой в 6 кг на полном вылете манипулятора (рисунок 1, в) [21]. Захватный модуль робота обеспечивают выполнение действий с ручной дрелью. Исследователи отмечают недостаточные эксплуатационные возможности захватного модуля и значительную массу.

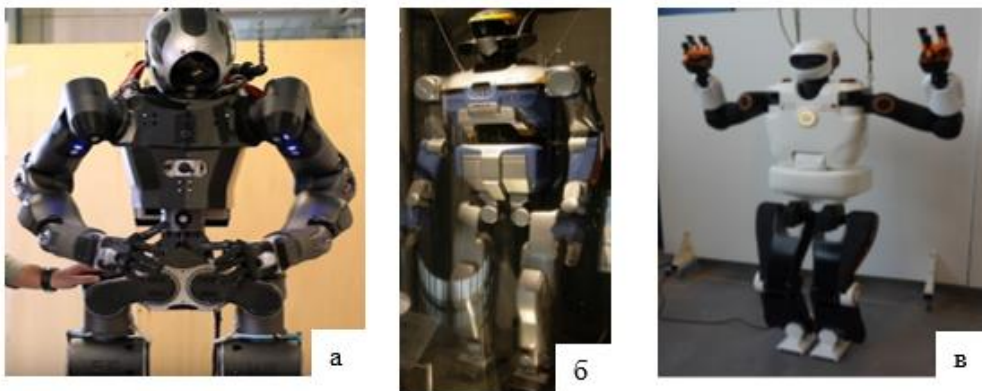


Рисунок 1 - Антропоморфные роботы: а - WALK-MAN [18]; б - HRP-2 [20]; в - TALOS [21]

Наиболее простая структурная схема антропоморфного захватного модуля включает две оппозитные исполнительные группы с двумя выходными звеньями в каждой из них (рисунок 2).

Такая схема была использована при создании робота – манипулятора для выполнения работ под водой в University of Calabria (Италия) (рисунок 2, а)

[22]. Движение четырех выходных звеньев обеспечивается двумя двигателями.

Антропоморфный захват Robotiq с двумя исполнительными группами разработан в компании Robotiq Inc (Канада) [23]. Каждая исполнительная группа имеет два выходных звена и две степени подвижности, движение которых обеспечивается от одного двигателя (рисунок 2, б) [24].

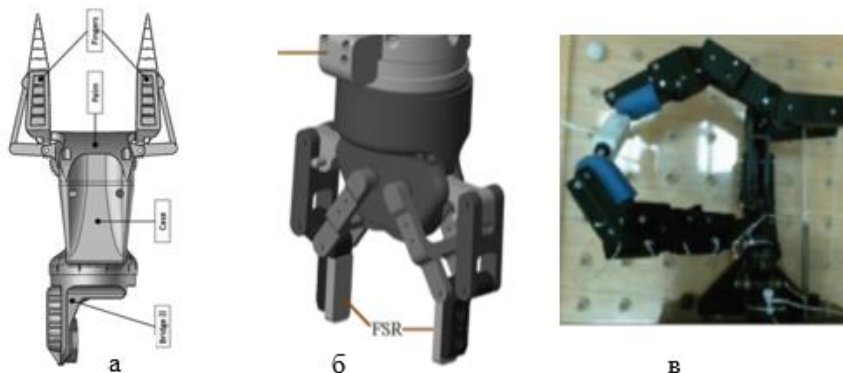


Рисунок 2 - Антропоморфные захваты: а - HRP-2 [22]; б - Robotiq [23]; в - Yale University [25]

В Yale University (США) разработан антропоморфный захватный модуль с двумя идентичными исполнительными группами звеньев (рисунок 2, в) [25], каждая из которых имеет две степени подвижности, обеспечиваемые через групповой привод одним двигателем. Дополнительно реализовано качание проксимальных звеньев, что позволяет ориентировать объект в пределах исполнительных групп звеньев.

Четыре выходных звена обеспечивают взаимодействие с объектами, имеющими, как правило, плоские поверхности. Обхват и надежное удержание объекта с недетерминированной формой можно обеспечить при наличии шести и более выходных звеньев. При этом система управления положением выходных звеньев должна адаптировать их к форме объекта.

Основные практические разработки и теоретические исследования выполняются применительно к антропоморфным захватным модулям, структурно повторяющим построение кисти руки человека. При этом

значительное число объектов управления определило использование копирующего способа с участием оператора.

При этом выполняются три способа обхвата объекта: по контуру объекта, щипковый, комбинированный (рисунок 3).

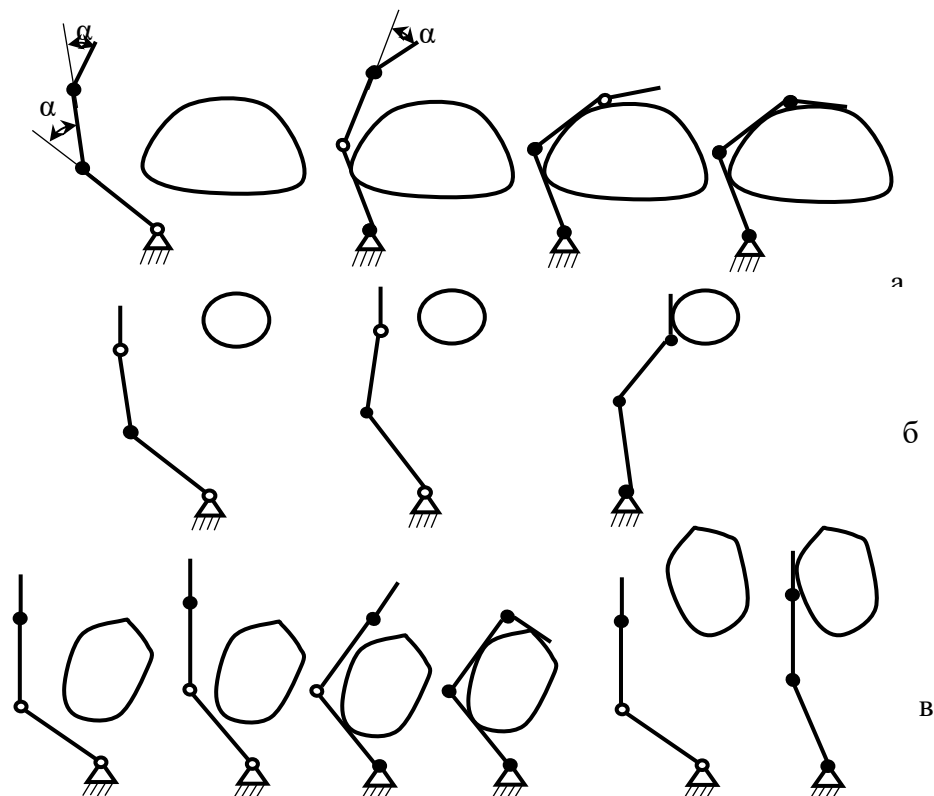


Рисунок 3 – Взаимодействие выходных звеньев на этапах обхвата объекта: а - по контуру; б - щипковый; в - комбинированный

При обхвате по контуру выходные звенья движутся последовательно, начиная с проксимального (рисунок 3, а). Движение последующего звена реализуется после остановки предшествующего на поверхности объекта. Щипковый способ обхвата характеризуется сохранением исходного положения дистального звена в процессе движения проксимального (рисунок 3, б). При комбинированном способе дистальное звено сохраняет свое исходное положение при отсутствии контакта с объектом проксимального и/или медиального звена, вплоть до контакта с объектом. В ином случае реализуется обхват по контуру (рисунок 3, в). Выполнение комбинированного

обхвата возможно только после специальных тренировок оператора. При этом такой способ обхвата является эффективным при отсутствии зрительного контроля за процессом обхвата.

Необходимость создания автономных роботов с более высокими эксплуатационными возможностями определило переход к новым принципам построения захватных модулей и методам управления ими. Приоритетным стало повышение грузоподъемности за счет снижения собственной массы, обхват и удержание изначально недетерминированных объектов без использования внешнего управления.

Данным требованиям удовлетворяют антропоморфные захватные модули, образованные исполнительными группами звеньев с групповым специальным приводом «underactuated grippers» (недостаточным приводом). Их особенностью является использование одного двигателя, и изменяемая в процессе обхвата объекта структурная схема исполнительной группы. Исполнительная группа состоит из двух параллельных подсистем: выходных звеньев, звеньев передачи движения и дополнительных силовых элементов - пружин.

Исследования антропоморфных захватных модулей, реализующих построение по типу «underactuated grippers», ведутся в рамках разработки роботов - ассистентов космонавтов, способных работать автономно: NASA совместно с General Motors, NASA и DARPA, DFKI (Германия), European Space Agency, японское аэрокосмическое агентство JAXA, ПАО «РКК «Энергия» совместно с АО «НПО «Андроидная техника». Антропоморфные захваты разрабатываются для выполнения работ под водой: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Китай), University of Illinois at Urbana-Champaign (США), Harvard University (США). Повышенный интерес к таким захватам объясняется тем, что такие системы имеют незначительную массу, способны выполнять обхват недетерминированных объектов в автономном режиме.

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 является объектом управления. Каждая из них представляет собой совокупность двух параллельных подсистем: выходных звеньев, системы передачи движения и дополнительно введённых 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 важнейшая характеристика захвата - способ обхвата объекта: по контуру, шипковый, комбинированный. Не определяются необходимые конструктивные элементы для реализации требуемого способа обхвата. Для исследования механизмов «с недостаточным приводом» следует разработать метод, позволяющий разъяснять процессы, протекающие при взаимодействии звеньев подсистем между собой и внешним объектом, идентифицировать реализуемый способ обхвата.

Метод анализа по функциональным схемам, многодвигательных механических систем изложен в докторской диссертации А.Н.Макарова. Однако в нем не исследованы вопросы представления и анализа механизмов с изменяющейся в процессе работы 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 «underactuated grippers», внесли Т. Lalibertey, L. Birgleny, С. М. Gosselin из Universite Laval (Canada), предложившие базовую концепцию построения исполнительных групп с введением в систему дополнительных силовых связей в виде пружин между выходными звеньями.

Структурная схема антропоморфного захватного 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 захватных модулей. Это объясняется, в частности, тем, что большая часть проектируемых параметров не имеет непосредственной связи, что исключает возможность представления их в единой целевой функции. Кроме того, проектируемые параметры верхнего уровня не являются системой на последующем, что не позволяет использовать традиционные методы. При синтезе структуры антропоморфного захватного модуля необходимо разработать метод, учитывающий перечисленные особенности.

Исследования известных конструкций исполнительных групп звеньев и построение новых ведутся в: Японии: Kanazawa University, Osaka University; США: University of Illinois, Harvard University; в Канаде: Universite Laval; Китае: Tsinghua University, School of Robotics, Institute of Rehabilitation and Medical Robotics Huazhong University of Science and Technology, School of Mechanical Engineering and Automation Harbin Institute of Technology, Huazhong University of Science and Technology. Наиболее значимые работы выполнены учеными: W. Zhang, D Liang, Z Sun, W. Chen, Y. Wang, C. Xiong, G. Jia, B. Li, H. Huang, G. Li, Q. Cao, Y. Wu.

Новые решения при создании антропоморфных захватных модулей, использующих принцип построения «underactuated grippers», отражены в работах 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 одному из вариантов 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 of Science and Technology), W. Chen, C. Xiong, Y. Wang (Hunan University). Однако специфика функционирования механизма, 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 хватных модулей предполагается известное и фиксированное положение симметричного объекта. В реальной ситуации точное расположение объекта не определено. Кроме того, объект может смещаться под действием 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 хватных устройств с групповым приводом типа «с недостаточным приводом» 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 хватный модуль сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев.

Предмет исследования - методы анализа, синтеза и алгоритмы управления антропоморфным хватным 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 антропоморфных 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 зоне 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 сложной системы с изменяемой структурной схемой, позволяющий идентифицировать способ обхвата объекта. Впервые определены необходимые конструктивные составляющие введение которых обеспечивает реализацию обхвата: щипкового, по контуру, комбинированного.

2. Предложен и обоснован вариант построения 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 (патент: № 2570597, № 185794).

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

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, исключающий 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 меж иерархической связи; обоснования варианта построения группового привода с более эффективным силовым взаимодействием проксимального и медиальных звеньев с 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, обладающими 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 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»).

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 способы обхвата объекта. Установлено, что в

исполнительную группу с тремя выходными звеньями для реализации обхвата по контур 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 захвата, позволил определить оптимальную схему, имеющую четыре попарно оппозитных исполнительных группы с двенадцатью выходными звеньями и групповым приводом в каждой из них;

4. Метод параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходными звеньями обеспечивает обхват объекта с диаметром 20 мм при высоте звеньев 0,35 % от суммарной длины исполнительной группы;

5. Алгоритм управления движением выходных звеньев оппозитных исполнительных групп отличается сохранением при обхвате 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 «Андроидная 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 конференциях и семинарах в период с 2018 по 2024 г: Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (ER(ZR)) 2018, MATEC Web of Conferences (EDP) 2018, Международная конференция 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", 2019, Международная конференция Mechanical and Automation Engineering (MIP), 2019, Международная конференция Advanced Technologies in Material Science, Международная конференция Metrological Support of Innovative Technologies, 2020, Международная конференция Materials Science and Engineering Modeling of technical systems. (CAD / CAM / CAE), 2020, XIV Всероссийская научно-технической конференция Робототехника и искусственный интеллект г. Железногорск, 2022 г., X Всероссийской конференции «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 в 20 печатных работах, 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. 2023 (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 [114], метод структурного синтеза антропоморфного захватного модуля [126, 146], алгоритмы управления движением выходных звеньев оппозитных исполнительных групп звеньев [64] 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 178 страниц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ И УПРАВЛЕНИЮ АНТРОПОМОРФНЫМИ ЗАХВАТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

1.1 Анализ построения антропоморфных хватных устройств

Необходимость расширения возможностей антропоморфных хватных модулей определило активизацию работ по их исследованию. Их создание, отвечающее в полной мере требованиям ГОСТ Р 60.2.0.3 – 2022, сопряжено с решением комплекса взаимосвязанных задач по разработке:

- структурной схемы антропоморфного хвата;
- схемы размещения приводов выходных звеньев;
- системы передачи движения выходным звеньям;
- системы управления движением выходных звеньев и силовым взаимодействием с объектом.

Особую остроту приобретают вопросы управления антропоморфным хватным модулем, взаимодействующим с изначально недетерминированными по форме и положению объектами. Такое представление объектов является характерным для роботов, работающих в космосе, под водой, в условиях чрезвычайных ситуаций.

Структурная схема антропоморфного хвата определяется:

- числом исполнительных групп звеньев, классом и видом кинематических пар, соединяющих их с основанием;
- структурной схемой исполнительной группы: числом выходных звеньев, видом кинематических пар их соединяющих.

Важным является выполнение параметрического синтеза - определение параметров определяющих систем передачи движения.

Число исполнительных групп звеньев варьируется в существующих конструкциях от двух до пяти. При этом схемы, объединяющие их в единую систему, характеризуются большим разнообразием.

Общим свойством антропоморфных хватных модулей с двумя исполнительными группами является простая конструкция, малый вес, и

простая система управления. Вместе с тем захват не обеспечивает надежного удержания объектов, особенно имеющих несимметричную форму [26]. Этот фактор определил более активное использование структурных схем с тремя исполнительными группами звеньев.

В University of Patras (Греция) создан антропоморфный захватный модуль с тремя исполнительными группами, с двумя выходными звеньями в каждой из них (рисунок 1.1, а) [27]. Движение по восьми степеням подвижности обеспечивается от индивидуальных приводов. Две крайние исполнительные группы обладают дополнительной подвижностью относительно основания. Принятая структурная схема обеспечивает адаптивность выходных звеньев к профилю объекта. Захват имеет большой вес - 5 кг.

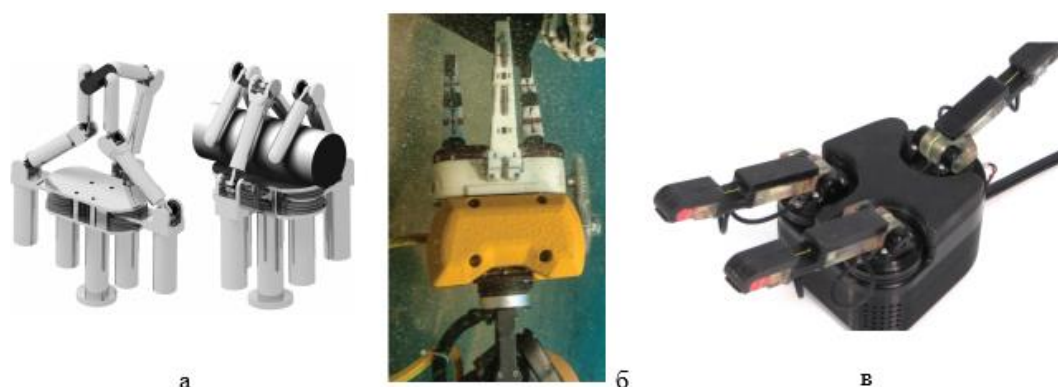


Рисунок 1.1 - Антропоморфные захватные модули с тремя исполнительными группами звеньев, разработанные в: а - University of Patras [27]; б - Stanford University [28]; в - Harvard University совместно с iRobot Corporation [29]

В Stanford University (США) создан антропоморфный робот для выполнения работ под водой [28]. Робот имеет два манипулятора с антропоморфными захватными модулями. Каждый из них включает три исполнительные группы с 11 - ю степенями подвижности (рисунок 1.1, б). В пределах каждой группы звеньев движение в кинематических парах с параллельными осями обеспечиваются от одного двигателя через гибкие тяги. Для обеспечения большей зоны обхвата проксимальные звенья двух исполнительных групп звеньев оснащены дополнительными степенями

подвижностями. С помощью робота успешно выполнены исследования поверхности грунта на глубине 91 м.

Антропоморфный захватный модуль с тремя исполнительными группами и восемью степенями подвижности создан Harvard University (США) совместно с iRobot Corporation (рисунок 1.1, в) [29]. Использование групповых приводов позволило реализовать движения по всем степеням подвижности пятью двигателями. В конструкции захвата вместо шарниров использованы упругие пластины, обеспечивающие в том числе и возврат в исходное положение.

Характерной особенностью использования структурных схем с тремя исполнительными группами является введение дополнительных степеней подвижности двух проксимальных звеньев. Как следствие, это привело к увеличению массы захвата и числа исполнительных двигателей, что затруднило их компоновку на основании [21, 27].

Реализуемые структурные схемы антропоморфных захватных модулей следует разделить на две подгруппы. К первой следует отнести модули, повторяющие построение кисти руки человека, но без одного пальца (рисунок 1.2).

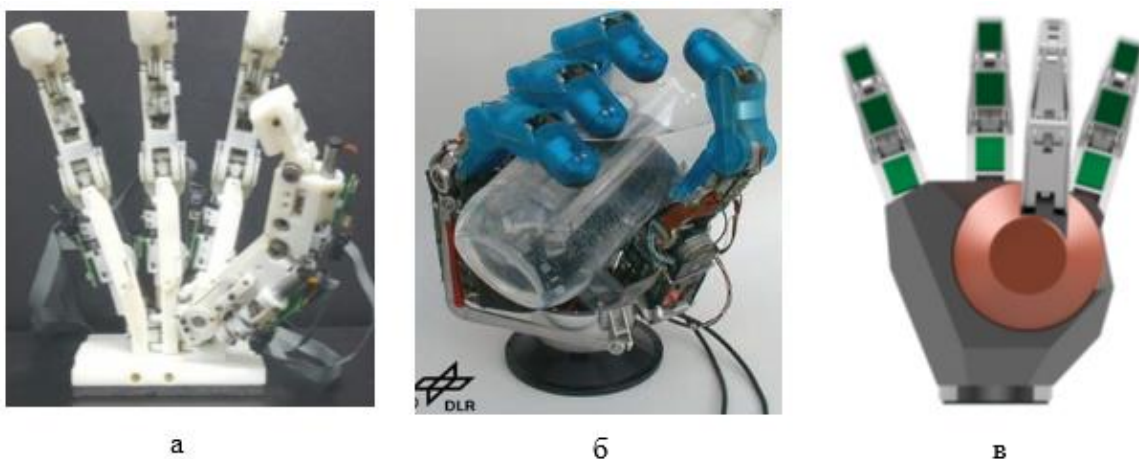


Рисунок 1.2 - Антропоморфные захватные модули с четырьмя исполнительными группами, разработанные в: а - Korea University of Technology and Education [30]; б - German Aerospace Center [31]; в - DFKI [32]

Ко второй группе относятся захватные модули, имеющие исполнительные группы, располагаемые параллельно.

Структурная схема антропоморфного захватного модуля, построенная в Korea University of Technology and Education, относится к первой группе [30].

Захватный модуль обладает 12 - ю степенями подвижности. Движение по каждой степени подвижности обеспечивается от индивидуального двигателя. Аналогичная структурная схема использована специалистами DLR Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center (Германия) (рисунок 1.2, б) [31] и DFKI Robotics Innovation Center (Германия) (рисунок 1.2, в) [32] при создании антропоморфных захватных модулей для роботов, предназначенных для работы на космических станциях.

Вторая группа антропоморфных захватных модулей, включающая четыре исполнительные группы, в свою очередь, может быть разделена на две подгруппы.

К первой подгруппе следует отнести захватные модули, имеющие структурную схему с попарно - оппозитными исполнительными группами [33, 34]. В захватном модуле, созданном University of Auckland (Новая Зеландия), оппозитные исполнительные группы выполнены с некоторым смещением в осевом направлении (рисунок 1.3, а) [33]. Это обусловлено спецификой компоновки системы передачи движения через гибкие тяги.

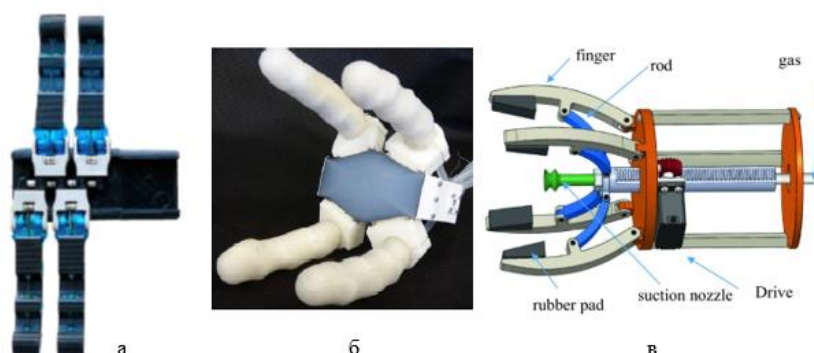


Рисунок 1.3 - Антропоморфные захватные модули с четырьмя исполнительными группами разработанные в: а - University of Auckland [33]; б - Kanazawa University [34]; в - SPIRAS [35]

В захватном модуле, созданном Kanazawa University (Япония), использована аналогичная система передачи движения через гибкие тяги (рисунок 1.3, б) [34].

Ко второй подгруппе относятся антропоморфные захватные модули, изначально ориентированные на взаимодействие со сферическими объектами. Такой захватный модуль создан в SPIRAS (рисунок 1.3, в) [35].

Структурные схемы, построенные по аналогии с кистью руки человека, были широко использованы при создании антропоморфных захватных модулей, предназначенных для выполнения работ в составе антропоморфных роботов космического назначения [36 - 40].

Антропоморфный захватный модуль, созданный для робота Robonaut 2 специалистами NASA совместно с General Motors, имеет пять исполнительных групп с общим числом степеней подвижности, равным 20 (рисунок 1.4, а) [36, 37]. Структурная схема представляет собой пять однотипных исполнительных групп. Отличием в построении структуры обладает аналог большого пальца за счет введения дополнительной подвижности вокруг оси, параллельной основанию.

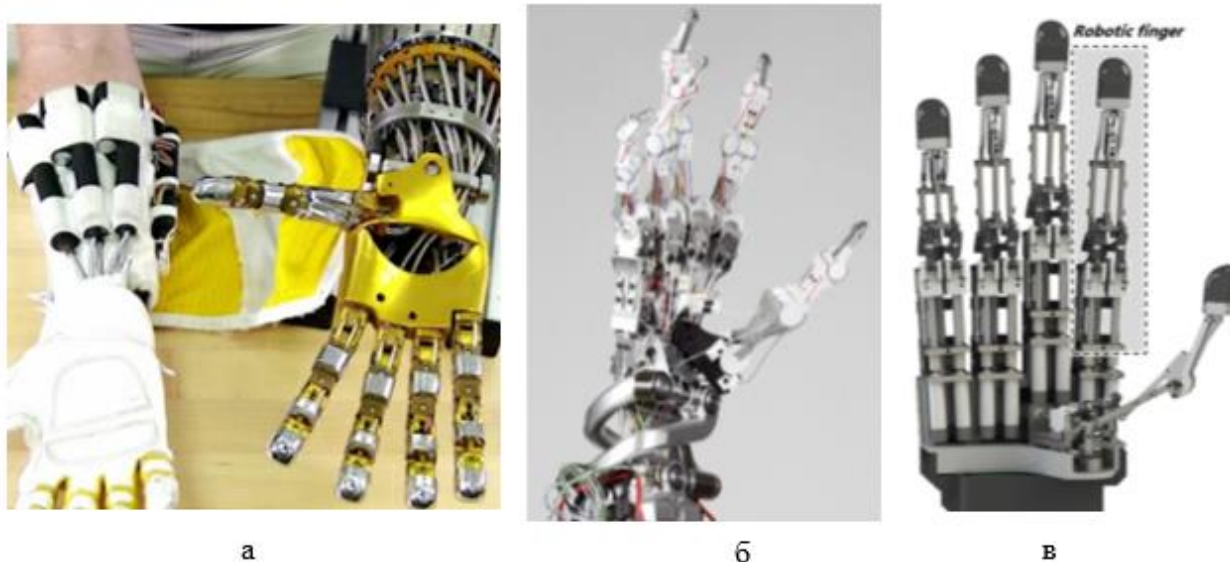


Рисунок 1.4 - Антропоморфные захватные модули с пятью исполнительными группами: а - робота Robonaut 2 [36]; б - DLR [39]; в - Ajou University (Korea) [44]

Аналогичная структурная схема использована специалистами Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center (Германия) при создании антропоморфного захватного модуля DLR (рисунок 1.4, б) [39].

Основным фактором, определяющим выбор структурной схемы с пятью исполнительными группами, является использование копирующего способа управления (рисунок 1.4, а). В этом случае упрощается управление антропоморфным захватным модулем, реализуемое кистью оператора. Кроме того, это позволяет использовать обратную силовую связь, обеспечивая непосредственный контроль оператором усилия, создаваемого выходным звеном на объекте [41]. В обновленной версии DLR AWIWI II обеспечивается контроль момента в каждой кинематической паре [42]. На конце дистальных выходных звеньев создается усилие до 9 Н. Захват отличается сложностью конструкции (рисунок 1.5). Для обеспечения движения всех выходных звеньев в каждой исполнительной группе используется от 6 до 8 гибких тяг.

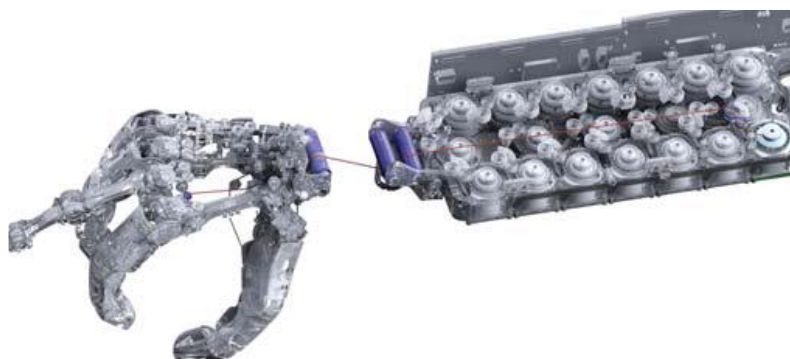


Рисунок 1.5 - Антропоморфный захват DLR AWIWI II [42]

Специалистами Korea University of Technology and Education (Корея) в созданном ими антропоморфном захватном модуле RoboRay реализована возможность контроля усилий оператором [43]. Захват имеет пять исполнительных групп звеньев, 14 степеней подвижности, 7 исполнительных двигателей вынесены на звено манипулятора, а 5 двигателей размещены на выходных звеньях. При небольшой массе - 1,59 кг, без учета массы вынесенных двигателей усилие на дистальном звене обеспечивается в 15 Н.

Особенностью антропоморфных хватных модулей с пятью исполнительными группами является размещение части или всех исполнительных двигателей на звене манипулятора. Как следствие, захваты обладают сложной системой передачи движения. Антропоморфный хватный модуль DLR имеет 65 шкивов для прокладки гибких тяг на звене манипулятора и 38 шкивов непосредственно на захвате [39].

Движение выходных звеньев в каждой исполнительной группе в захвате, созданном в Ajou University (Корея), обеспечивается тремя линейными двигателями (рисунок 1.4, в) [44]. Захват имеет 20 степеней подвижности. Пятнадцать двигателей обеспечивают независимые движения пятнадцати выходных звеньев. Движение пяти дистальных звеньев является кинематически зависимым от движения медиальных звеньев.

Задача структурного синтеза захватов решается при известном наборе возможных вариантов схем. Анализ известных антропоморфных захватов показал, что решение вопроса о числе исполнительных групп звеньев принимается конструктивно, без использования критерия для качественной или количественной оценки.

Непосредственно структурный синтез антропоморфного захвата выполнен с использованием Matlab Simulink в Indian Institute of Technology (Индия) [45]. В качестве объекта были приняты цилиндрические детали трех диаметров. Была получена структурная схема, включающая четыре однотипные исполнительные группы (рисунок 1.6). Три из них с тремя выходными звеньями и параллельными осями вращения располагаются параллельно. Четвертая с двумя выходными звеньями располагается оппозиционно средней. Общее число степеней подвижности равно 11.

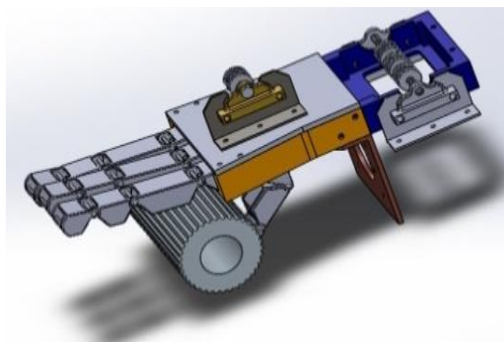


Рисунок 1.6 - Конечная версия антропоморфного захвата, полученная с использованием Matlab Simulink [45]

Задача синтеза структурных схем решалась без использования какого-либо критерия. Ограниченный набор обхватываемых объектов, принятых при моделировании, не позволяет считать данную структурную схему оптимальной.

В связи с изложенным решение задачи структурного синтеза, определяющего число исполнительных групп и схему их соединения с основанием, является актуальным.

Следующим в иерархическом делении антропоморфного захватного модуля является определение структурной схемы исполнительной группы: числа выходных звеньев, вида кинематических пар их соединяющих, длин звеньев и углов относительного поворота.

Длины звеньев и углы относительного поворота определяются на этапе параметрического синтеза. В этой части структурно - параметрического синтеза предпочтительно использовать результаты оптимизации, выполненной в ходе эволюции кисти руки человека [46]. Анализ, выполненный в рамках создания экзоскелета кисти, показал, что дистальная фаланга имеет длину от 18 до 29 мм, медиальная от 29 до 38 мм, проксимальная от 43 до 62 мм [47]. Установлено, что соотношение длин фаланг соответствует «золотому сечению». Средними значениями длин следует считать соответственно 25, 32, 53 мм. Аналогичные рекомендации получены в работе [48]: 25, 30 и 57 мм.

В отношении углов относительного поворота следует использовать результаты исследования, выполненные Robotics and Mechatronics, German

Aerospace Centre (Германия), которые показали что, максимальный угол поворота имеют медиальные фаланги - 123° , проксимальные - 101° , дистальные – 23° [49]. Зарегистрированные значения являются характерными для мужчин в возрасте до 30 лет.

В сочетании с длинами звеньев, рекомендованными в работах [47, 48], это обеспечивает обхват и удержание объектов с внешним размером от 3 до 130 мм.

1.2 Анализ структуры приводов исполнительных групп звеньев антропоморфных хватных устройств

Анализ известных конструкций антропоморфных хватов показал, что число выходных звеньев в исполнительной группе варьируется от двух [50, 51] до трех [52, 53].

Исполнительные группы с большим числом звеньев - четыре [54] и десять [55] следует считать исключением. При этом оба этих варианта предполагается использовать для захвата объектов в открытом космосе.

Экспертная оценка, выполненная совместно исследователями Harvard University и University of Auckland (США), выявила, что исполнительные группы, имеющие три выходных звена, обеспечивают по сравнению с вариантом двух звеньев [56]:

- более равномерное силовое воздействия на объект;
- большую устойчивость объекта в захвате;
- обхват габаритных объектов.

Исходя из более высоких функциональных возможностей, предпочтительно иметь структурную схему исполнительной группы с тремя выходными звеньями. Их пространственное положение обеспечивается изменением трех обобщенных координат. В общем случае это достигается за счет использования трех двигателей.

При традиционной схеме построения антропоморфных хватных устройств с тремя исполнительными группами они оснащаются девятью двигателями. При этом существенно усложняется система управления за счет

необходимости согласования их движений. Компоновка привода является сложной задачей, определяющей габариты захвата и его массу. На выбор структурной схемы исполнительной группы влияет схема размещения двигателей и система передачи движения от двигателя к выходному звену. В связи с этим процедуру структурного синтеза исполнительной группы следует вести по критериям, учитывающим перечисленные факторы.

Возможными схемами компоновки двигателей являются:

- непосредственно на выходных звеньях;
- на звене манипулятора;
- комбинированный вариант.

Наиболее просто реализуется первый вариант [30, 57, 58]. Антропоморфный захватный модуль, созданный совместно специалистами из Tsinghua University и University of Hong Kong (Китай), имеет пять исполнительных групп [57]. Каждая из них включает два выходных звена (рисунок 1.7, а). Двигатели установлены на проксимальных звеньях. Реализован групповой привод. Для этого в систему передачи движения введена пружина.

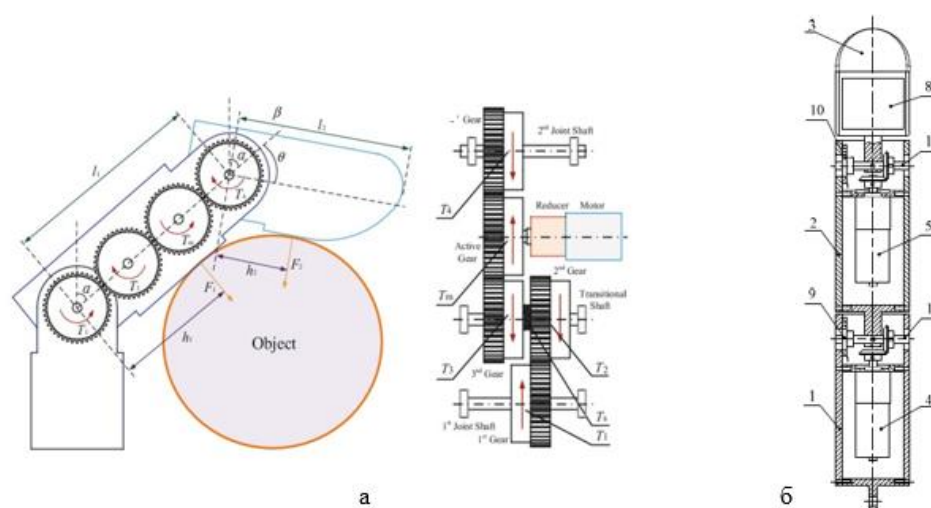


Рисунок 1.7 - Исполнительные группы с приводами на выходных звеньях:
а - COSA-FBA hand [57]; б - E-COSA [58]

В Tsinghua University (Китай) разработан захват с исполнительными группами, имеющими по два выходных звена. Их движение обеспечивается

индивидуальными приводами (рисунок 1.7, б) [58]. В состав системы передачи движения входит коническая передача. Как следствие, снижается жесткость конструкции и имеет место зона нечувствительности, обусловленная зазором в передаче.

Для робота, работающего под водой, в University of Illinois at Urbana-Champaign (США) разработан антропоморфный захват с пьезоэлектрическим приводом [59]. Аналогичный подход использовали исследователи в University of Macau Macau (Китай) [60]. При использовании пьезоэлектрического привода движение на выходные звенья передается без передаточных механизмов, что существенно упрощает конструкцию. Однако такие приводы имеют малую мощность и не обеспечивают создание на выходном звене необходимых усилий. В частности, исполнительная группа захвата University of Illinois at Urbana-Champaign создает на выходных звеньях моменты от 10,98 до 11,38 мН·м [59].

В настоящее время создание исполнительных групп с приводами на выходных звеньях практически не развивается. Основная причина - невозможность обеспечения достаточных усилий на выходном звене.

Основные исследования и практические разработки сосредоточены на разработке исполнительных групп с двигателями, вынесенными на звено манипулятора. При этом все решения разделяются на две категории. К первой относятся конструкции, использующие индивидуальные приводы [36, 39, 44, 61]. Ко второй группе относятся исполнительные группы, использующие групповой привод.

Исполнительные группы, относящиеся к первой категории, имеют сложную конструкцию (рисунок 1.5). В них используются гибкие тяги, вносящие дополнительное усложнение из-за необходимости организации обратного движения. Значительное число двигателей, размещаемое на звене манипулятора, увеличивают его массу и габариты. Система управления должна учитывать взаимовлияние при одновременном движении в нескольких

приводах. Имеющиеся сложности определили переход к созданию конструкций с групповым приводом.

Основной особенностью таких систем является использование одного двигателя для обеспечения движения нескольких выходных звеньев. Такой подход позволяет качественно снизить число применяемых двигателей. В свою очередь, конструкции с групповым приводом разделяются по принципу передачи движения выходным звеньям на две подгруппы: кинематически зависимые [62], кинематически независимые - адаптивные [63 - 67].

Все захватные модули, относящиеся к первой подгруппе, имеют единый подход к построению группового привода. Движение с привода передается на проксимальное звено, далее через дополнительный механизм на медиальное звено. При использовании в качестве дополнительного механизма рычажной системы медиальное звено через шатун соединено со стойкой. Дистальное звено так же через шатун соединено вращательной парой с проксимальным звеном. При обхвате объекта все выходные звенья совершают относительные движения одновременно. По такой схеме построена исполнительная группа звеньев робота ASIMO (рисунок 1.8, а) [62]. Применение рычажного механизма обеспечивает повышенную жесткость. Используемая модель описания исполнительной группы – структурная схема, позволяющая в полной мере проанализировать кинематику, силовое взаимодействие выходных звеньев и звеньев системы передачи движения.

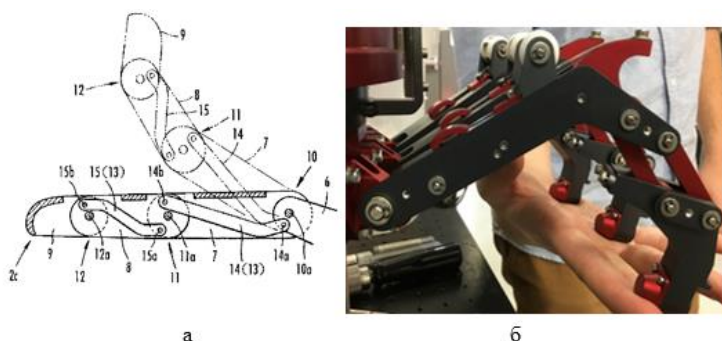


Рисунок 1.8 - Исполнительные группы с групповым приводом, реализующим кинематически зависимые движения выходных звеньев: а - ASIMO [62]; б -

JPL-Nautilus Gripper [68]

Тот же подход, но с использованием гибких тяг, реализован в захвате, созданном для выполнения работ под водой в NASA Jet Propulsion Laboratory [68]. Захватное устройство включает 16 исполнительных групп. Каждая из них имеет два выходных звена (рисунок 1.8, б). С приводом связано проксимальное звено, дистальное звено через гибкую тягу соединено с основанием. Движение всех исполнительных групп осуществляется через общую платформу, совершающую поступательное движение.

Независимо от числа выходных звеньев в исполнительной группе данного типа, объектом управления является только одно проксимальное звено. Углы относительного поворота остальных выходных звеньев являются функцией его угла поворота. Надежный обхват с контактом всех выходных звеньев реализуется только для определенного размера объекта. Исполнительная группа звеньев не обладает свойством адаптивности к профилю объекта.

Для достижения эксплуатационных возможностей, присущих исполнительной группе с индивидуальным приводом выходных звеньев, групповой привод должен обеспечивать:

- движение всех выходных звеньев с независимым параметром, определяющим их положение;
- адаптивность положения выходных звеньев к профилю объекта;
- возможность контроля силового взаимодействия выходного звена с объектом.

Перечисленным требованиям отвечает новый класс механизмов, получивший название в иностранной литературе «underactuated grippers» - «с недостаточным приводом». Основы их построения были сформулированы в работе, выполненной в Universite Laval (Канада) [63].

Исполнительная группа представляет собой совокупность двух параллельных подсистем:

- основная схема, образованная выходными звеньями;
- система передачи движения от двигателя к дистальному звену.

Выходные звенья соединены между собой дополнительными силовыми элементами – пружинами.

Предложенный принцип построения был реализован и исследован на захватных модулях, имеющих три идентичные исполнительные группы, каждая из которых имела два или три выходных звена (рисунок 1.9, а). Пружины устанавливались между выходными звеньями, ограничивая их относительное движение. Обхват объекта осуществлялся при неизменном режиме движения двигателя. При этом объектом управления в исполнительной группе с тремя выходными звеньями поочередно выступало проксимальное, медиальное и дистальное звено. Изменение объекта управления обеспечивалось изменением внешних условий – достижением (остановкой) текущим движущимся выходным звеном внешнего объекта. Обхват стационарного и симметричного объекта выходными звеньями реализуется при простой схеме управления. Последовательность изменения объектов управления для исполнительной группы с двумя выходными звеньями представлена на рисунке 1.9, в. Движение с двигателя передается на ведущее звено a_1 , далее через звено a_2 на выходное звено 2. При этом пружина g блокирует движение звена 2 относительно звена 1. Вся совокупность звеньев, как одно целое, поворачивается в паре A в направлении к объекту.

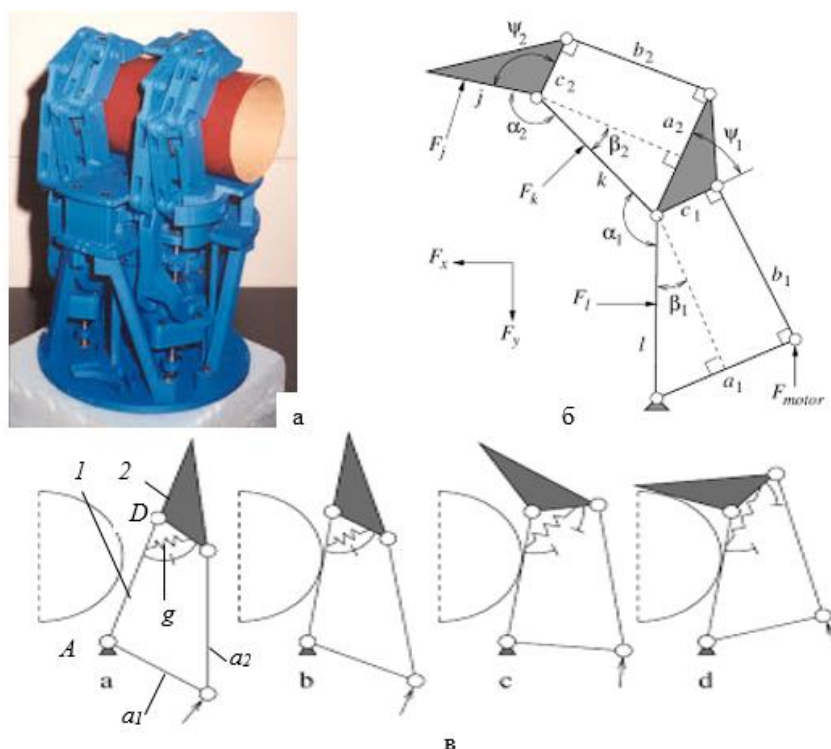


Рисунок 1.9 - Антропоморфный захватный модуль с «underactuated grippers» [63]: а - общий вид; б - структурная схема исполнительной группы; в) последовательность изменения объекта управления

На рисунке 1.9, б представлена исходная схема исполнительной группы, включающая: выходные звенья l , k , g ; звенья системы передачи движения a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 . Реализация адаптивного режима движения звеньев обеспечивается введением пружин между выходными звеньями l и k , k и j .

Данная концепция построения исполнительной группы звеньев получила активное развитие. Ее использование обеспечивает:

- упрощение системы управления по сравнению с используемой в схемах с индивидуальными приводами выходных звеньев;
- движение трех выходных звеньев вокруг параллельных осей от одного двигателя;
- независимое изменение координат, определяющих относительное положение выходных звеньев;
- надежное удержание объекта за счет контакта трех выходных звеньев.

В настоящее время созданы исполнительные группы, различающиеся:

- используемой системой передачи движения: рычажной (рисунок 1.10, а) [64, 65], зубчатыми передачами (рисунок 1.10, б) [57]; гибкими тягами (рисунок 1.10, в) [66]; комбинированной, включающей рычажный механизм и гибкие тяги (рисунок 1.10, г) [67];

- вариантами взаимодействия между звеньями подсистем через установку пружин: между выходными звеньями (см. рисунок 1.10, в) [66]; между звеньями системы передачи движения (см. рисунок 1.10, г) [67];

- используемыми пружинами сжатия (рисунок 1.11, а) [65, 69] и растяжения (рисунок 1.11, б) [68]. В процессе обхвата на каждом этапе выполняется движение только в одной кинематической паре, образованной выходным звеном. Для исполнительной группы с тремя выходными звеньями последовательно реализуется три варианта структурных схем. Конструкции с групповым приводом и введёнными пружинами являются системами с изменяемой структурной схемой [64].

Значительная вариативность построения подсистемы передачи движения не исследована на сравнительный анализ предпочтительности возможных вариантов. Особенно важным является влияние способа установки пружин на условия взаимодействия объектов управления - выходных звеньев, с внешним объектом.

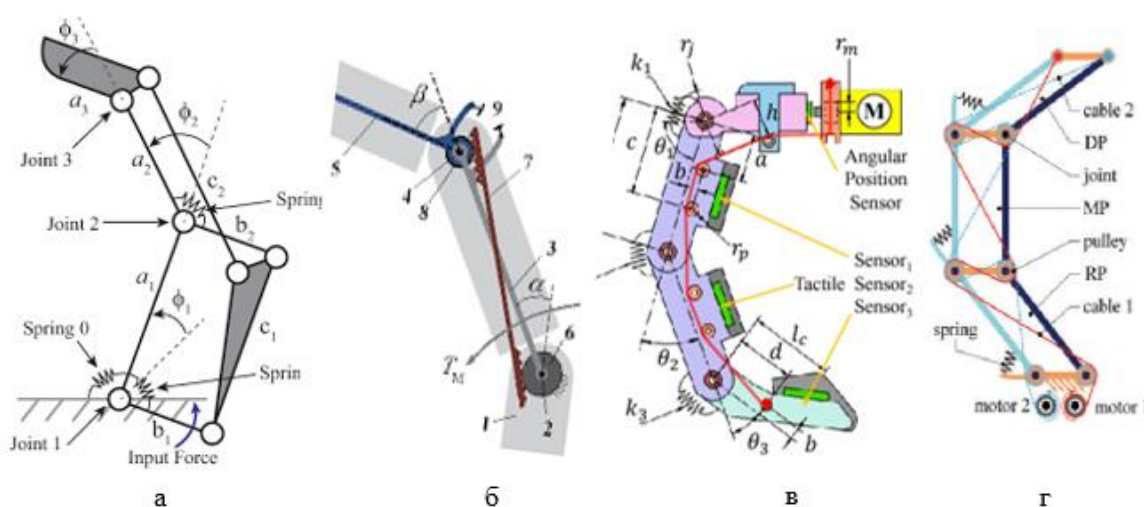


Рисунок 1.10 - Исполнительные группы с групповым приводом и системой передачи движения выходным звеньям: а - рычажной [65]; б - зубчатой [57]; в - гибкой тягой [66]; б - комбинированной [67]

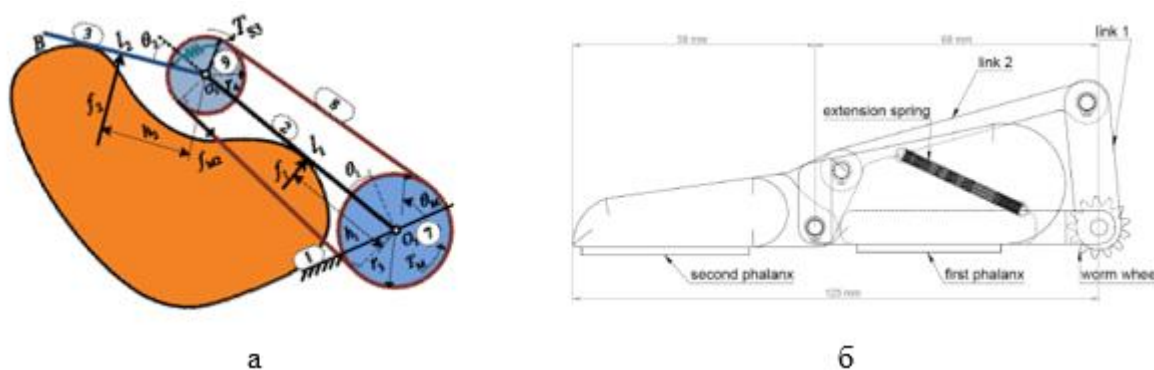


Рисунок 1.11 - Исполнительные группы с групповым приводом и используемой пружиной: а - сжатия [69]; б - растяжения [68]

1.3 Анализ применимости традиционной модели описания к сложным механизмам с изменяющейся структурной схемой

Характерным для исследований существующих вариантов построения данного типа группового привода является недостаточность модели анализа, выполняемого по структурной схеме. При исследовании систем с числом выходных звеньев, совпадающим с числом двигателей, она позволяет определять: число степеней подвижности, выходное звено, реализуемую кинематику – последовательность движения, силовое взаимодействие между звеньями. В механизмах «underactuated grippers» структурная схема не отображает перечисленные характеристики в силу изменения выходного звена на различных этапах обхвата объекта. Не представляется возможным по ней определить способ обхвата при анализе известных конструкций и необходимые составляющие для их реализации на этапе разработки.

Исследователи из Tsinghua University (Китай) совместно со специалистами из University of Calabria (Италия) разработали конструкцию исполнительной группы, использующую рычажную систему передачи движения (рисунок 1.12, а) [70].

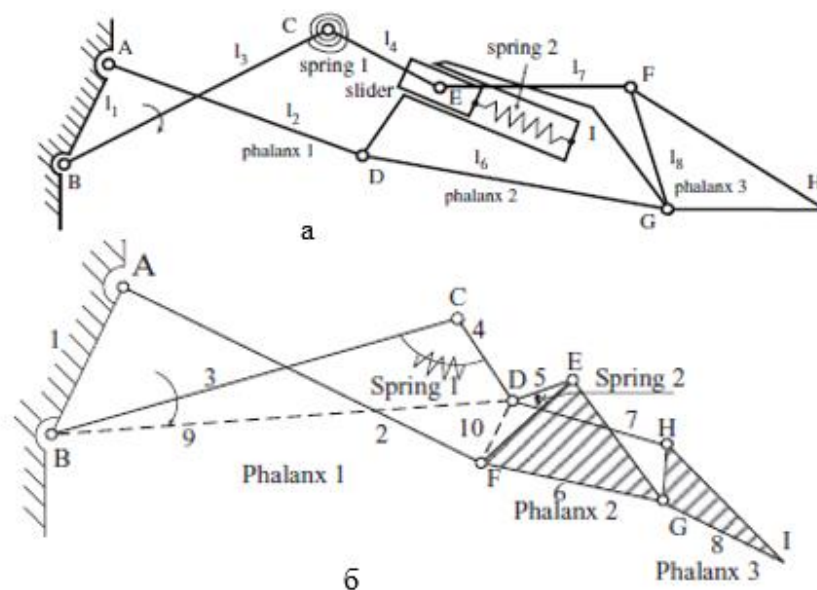


Рисунок 1.12 - Структурная схема исполнительной группы: а - Tsinghua University и University of Calabria [70]; б - Minzu University of China [71]

В соответствии с традиционным методом анализа число степеней подвижности W определяется по известной зависимости:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1.1)$$

где n - число подвижных звеньев; p_5 - число кинематических пар пятого класса; p_4 - число кинематических пар четвертого класса.

В исполнительной группе (см. рисунок 1.12, а) $n = 7$, $p_5 = 9$, $p_4 = 0$, и $W = 3$. Следовательно, для работы механизм должен иметь три ведущих звена. При этом работа исполнительной группы обеспечивается только одним ведущим звеном BC . В соответствии со значением $W = 3$ для однозначного определения положения всех звеньев в пространстве необходимо также пять обобщённых координаты. Однако положение всех звеньев определяется углом поворота звена BC и профилем внешнего объекта после остановки звена AD и DG . В отношении силового взаимодействия также имеется неопределенность. Усилие от ведущего звена BC через звено CE одновременно передаваться на выходное звено DG и GH . Наличие пружин spring 1 и spring 2 не учитывается в силовом взаимодействии выходных звеньев и в реализуемой последовательности их движения.

Структурная схема исполнительской группы, созданная в Minzu University of China, представлена на рисунке 1.12, б и имеет 7 подвижных звеньев и 9 кинематических пар пятого класса p_5 [71]. Соответственно, число степеней подвижности $W = 3$. При этом фактическое число степеней подвижности в каждый момент времени равно единице. Однако на различных этапах взаимодействия с объектом эта подвижность реализуется последовательно в парах A , B , G . Особенностью конструкции является использование двух пружин, установленных между звеньями системы передачи движения: 3 – 4 и 5 – 7.

Из анализа структурной схемы исполнительской группы, представленной на рисунке 1.10, а, следует: число подвижных звеньев $n = 7$, число кинематических пар пятого класса $p_5 = 9$, а число степеней подвижности $W = 3$. При этом функционирование обеспечивается одним ведущим звеном b_1 . Силовое воздействие с ведущего звена b_1 передается одновременно на три выходных звена: a_1 , a_2 , a_3 .

Способ установки пружин определяет силовое взаимодействие выходного звена и объекта. Данный аспект не отражается на структурной схеме и не позволяет оценить эффективность способа их установки с точки зрения распределения усилий, передаваемых выходными звеньями на объект. В частности, анализ только структурной схемы (рисунок 1.10, в) не отражает влияние пружин на воздействие выходных звеньев на объект. Деформация пружин снижает эффективность действия привода на объект через звенья 2 и 3. Однако это не следует из структурной схемы.

Перечисленные особенности механизмов с изменяемой структурой характерны для всех возможных вариантов построения системы передачи движения [72]. В исполнительской группе, созданной Fukushima University (Япония) (рисунок 1.13, а), влияние пружины, установленной в паре D между звеном системы передачи движения и стойкой, на силовом взаимодействии выходных звеньев и объекта по структурной схеме не отражается [73].

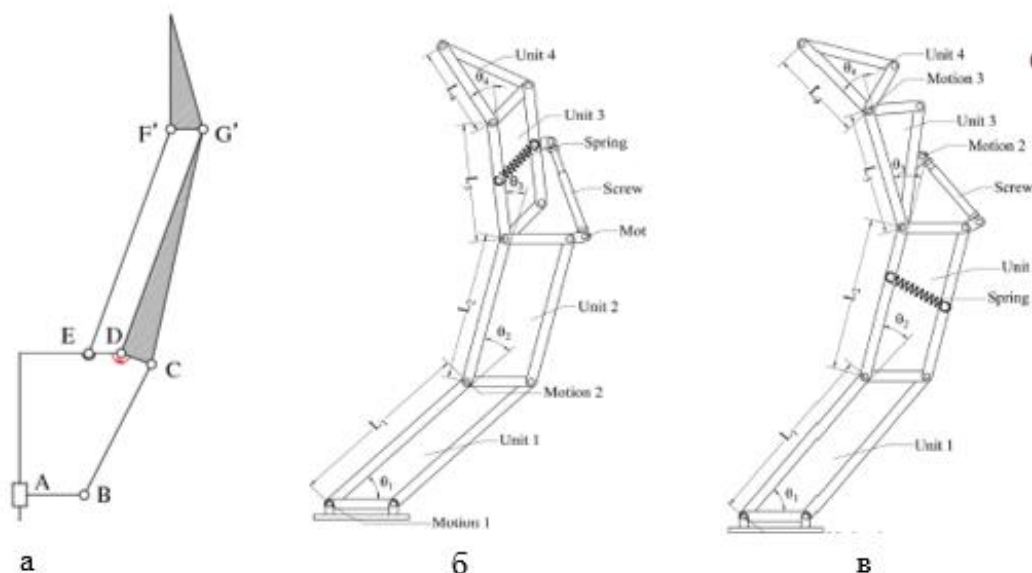


Рисунок 1.13 - Схемы исполнительных групп звеньев захватов созданных: а - Fukushima University [73]; б, в - Harbin Institute of Technology [74]

Недостаточность модели анализа, выполняемой по структурной схеме, наглядно характеризуется на примере исполнительной группы захватного модуля, созданного Harbin Institute of Technology (рисунок 1.13, б, в) [73, 74]. Было разработано два варианта исполнительных групп с четырьмя выходными звеньями и линейным приводом, установленным над звеном l_3 . Варианты различались схемой установки пружин. Анализ кинематики и силового взаимодействия выполнялся с использованием моделирования в программе Adams software. Было установлено, что вариант, представленный на рисунок 1.13, б, предпочтительней, в силу того, что в этом случае выходные звенья имеют меньшие скорости. Исполнительная группа имеет 12 подвижных звеньев и 16 кинематических пар пятого класса. В соответствии с зависимостью (1.1) число степеней подвижности $W = 4$. При этом положение всех звеньев определяется изменением только одного параметра – хода штока «Screw».

Для исследования нового класса механизмов «underactuated grippers» следует иметь метод анализа, использующий модель представления, дополняющую структурную схему. При этом метод должен отображать

силовое взаимодействие между звеньями с внешним объектом, идентифицировать реализуемый способ обхвата объекта.

1.4 Анализ методов параметрического синтеза систем передачи движения рычажного типа в механизмах с изменяющейся структурой

Как отмечалось ранее, наибольшее распространение получили системы передачи движения рычажного типа и с гибкими тягами.

Преимуществом систем передачи движения, использующих гибкие тяги, является компактность и постоянная величина момента, создаваемого приводом в кинематических парах во всем диапазоне углов поворота выходных звеньев. Однако, в силу ограничения на диаметр гибких тяг, величина усилия, создаваемого на выходных звеньях, существенно уступают варианту с рычажной схемой [55]. Кроме того, их использование требует постоянной корректировки вытяжки, что исключает их применение в рабочих зонах с закрытым доступом для людей.

Особенностью систем передачи движения, использующих рычажные механизмы, является зависимость момента, создаваемого в кинематических парах от угла относительного поворота выходных звеньев. В связи с этим актуальной является задача параметрического синтеза рычажного механизма, обеспечивающего относительно стабильную величину момента, уменьшение габаритов, формируемых звеньями системы передачи движения.

Подход к решению перечисленных проблем был выполнен в рамках создания системы передачи движения звеньям исполнительной группы антропоморфного захватного модуля Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand в University of Cassino (Италия) [75].

В качестве критерия оптимальности использовалась искусственная функция «the transmission defect» - «качество силовой передачи» в кинематических парах E и B . Прямыми ограничениями были приняты: углы поворота соответственно: проксимального $Q_1 = 83^\circ$; медиального $Q_2 = 105^\circ$;

дистального $Q_3 = 78^0$; длины выходных звеньев соответственно: $m_1 = 43$ мм; $m_2 = 25$ мм; $m_3 = 23$ мм. Ведущее звено системы передачи движения совершает поступательное движение.

Для оценки найденных параметров можно использовать показатель коэффициента «компактности» K_l как отношение максимального размера по высоте к суммарной длине выходных звеньев. Соотношение полученных пропорций длин звеньев системы передачи движения отражено на рисунке 1.14. Коэффициент K_l составляет 0,6.

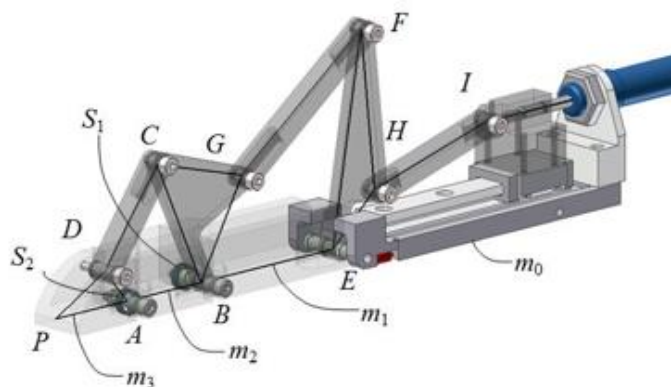


Рисунок 1.14 - Конструктивное исполнение группы звеньев при найденных оптимальных значениях длин системы передачи движения [75]

Разработчики из University of Technology (Ирак) для выбора параметров исполнительной группы с рычажной системой передачи движения использовали многокритериальную оптимизацию [76, 77]. В качестве частных критериев были приняты геометрические и силовые характеристики:

- суммарный угол поворота выходных звеньев;
- отношение суммарной силы, передаваемой всеми звеньями к максимальной силе, действующей на одном выходном звене;
- обхват тремя выходными звеньями цилиндра минимального диаметра;
- минимизация габаритов системы передачи движения.

Целевая функция была сформирована с использованием аддитивного способа с использованием весовых коэффициентов. Поиск экстремума выполнялся методом градиентного спуска. В качестве исходных данных были

приняты длины выходных звеньев: проксимального - 64 мм, медиального – 37 мм, дистального – 32 мм.

Получены следующие результаты: высота ведущего коромысла - 116 мм, высота коромысла медиального звена – 75 мм, суммарный угол поворота выходных звеньев при обхвате цилиндра диаметром 30 мм составил 280° , максимальное усилие 14,82 Н (рисунок 1.15). Коэффициент «компактности» $K_l = 0,89$.

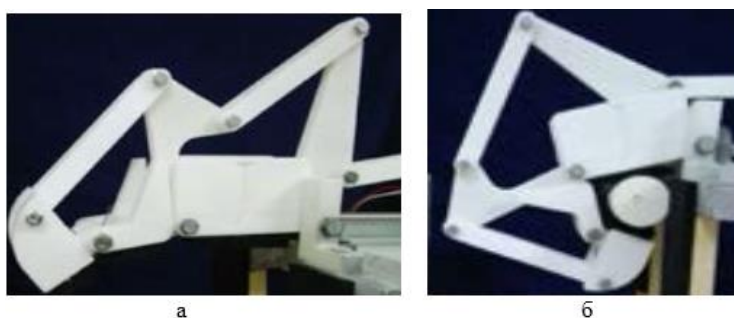


Рисунок 1.15 - Исполнительная группа звеньев с оптимизированными параметрами системы передачи движения: а - в исходном положении; б - при обхвате цилиндра диаметром 30 мм [76, 77]

Следует отметить, что используемые для определения параметров рычажной системы передачи методы оптимизации приводят к соотношению поперечных габаритов, соизмеримых с линейными. Такие параметры неприемлемы при создании антропоморфных захватных устройств, действующих в ограниченной рабочей зоне. В частности, предельными внешними размерами для исполнительной группы в захватах роботов космического назначения следует считать параметры, характерные для перчатки космонавта [78]. Максимальная высота в зоне проксимальной фаланги составляет 48 мм, медиальной 32 мм.

В Huazhong University of Science and Technology (Китай) применительно к исполнительной группе с тремя выходными звеньями была решена задача параметрического синтеза рычажной системы передачи движения [79]. Для анализа и расчета использовались инструменты генетического алгоритма в MATLAB. В качестве исходных данных были приняты: длина проксимального

звена 60 мм, медиального 40 мм, дистального 32 мм. За критерий оптимальности была принята величина разности усилий, создаваемых выходными звеньями на объекте диаметром 70 и 100 мм.

В результате были получены следующие значения длин коромысел: $EB = 45$ мм, $FG = 38$ мм, $IH = 18$ мм (рисунок 1.16). Соответственно, величина усилий на звеньях составила при обхвате цилиндра диаметром 70 мм на проксимальном звене 12,59 Н, на медиальном 11,41 Н, на дистальном 11,56 Н. Значение коэффициента «компактности» составляет $K_l = 0,35$.

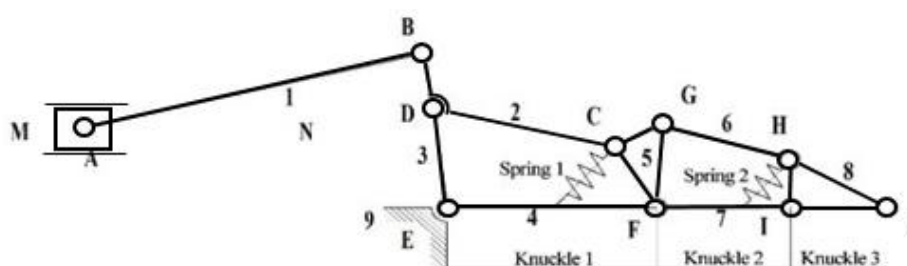


Рисунок 1.16 - Структурная схема исполнительной группы звеньев, принятая для оптимизации в Huazhong University of Science and Technology [79]

Использованный подход обладает рядом специфических аспектов: в качестве прямых ограничений использовались параметры объекта достаточно большой величины (70 и 100 мм), использовалось ведущее звено с поступательным движением. Последний фактор ограничивает возможность использования более простого варианта с вращательным движением. Кроме того, не обеспечивается обхват объектов размером менее 70 мм.

Существующие методики параметрического синтеза систем передачи движения рычажного типа не позволяют определить длины звеньев, реализующих обхват объектов размером от 30 мм с приемлемыми поперечными размерами. В связи с этим следует разработать методику параметрического синтеза, обеспечивающую относительно стабильные крутящие моменты в кинематических парах при минимальных размерах системы передачи движения и обхвате объектов начиная с 20 мм.

В соответствии с техническим заданием на разработку «ТЕЛЕДРОИД» (заказчик АО «ЦНИИмаш») следует выполнять действия с объектами, представленными на рисунке 1.17. Максимальные силовые воздействия определены на заворачивание и отворачивание маховиков механических замков с моментом силы не более 24 Н·м.

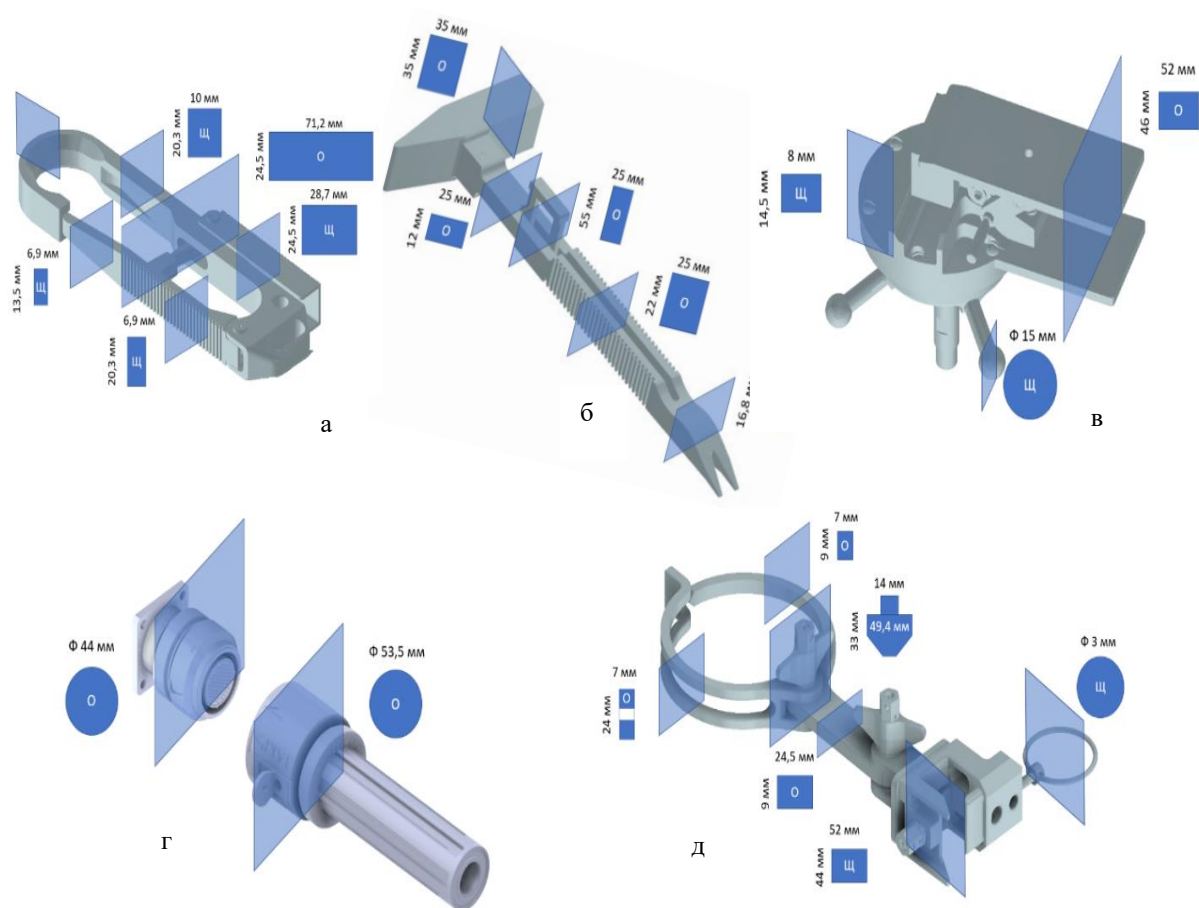


Рисунок 1.17 - Объекты для обхвата: а - карабин с защелкой; б - молоток; в - механический замок; г - штепсельный разъём низкочастотного электросоединителя; д - карабин типа «наручник»

В таблице 1.1 представлен анализ размеров объектов, подлежащих обхвату в соответствии с техническим заданием.

Таблица 1.1 – Перечень объектов взаимодействия и действий, требуемых к выполнению

Наименование, тип и марка макета инструмента	Требуемые к выполнению действия	Поперечные сечения в местах обхвата, мм
Карабин с защелкой	Установка на квадратный поручень сечением 25х25 мм	24,5х71,2
	Снятие с квадратного поручня 25х25 мм	24,5х28,7
Молоток	Удержание	55х25
		22х25
Электросоединитель вилка	Удержание	Φ 44
Электросоединитель розетка ВКД блочная	Стыковка	Φ 53,5
	Расстыковка	
Карабин типа «наручник»	Установка на квадратный поручень сечением 25х25 мм	44х89
	Снятие с квадратного поручня 25х25 мм	49,4х33

Это соответствует габаритам штекерных разъемов и карабинов, с которыми взаимодействуют захваты антропоморфных роботов, предназначенных для работы на космических станциях.

1.5 Анализ методов управления исполнительной группой звеньев с изменяемой структурной схемой

Алгоритм управления двигателями, обеспечивающими групповой привод оппозитными исполнительными группами звеньев, принципиально отличается от варианта с индивидуальным приводом и является более сложным. Для его упрощения в ряде хватных устройств выполнено сочетание индивидуального и группового принципа построения приводов выходных звеньев. В хватном устройстве, разработанном и исследованном в Nanyang University ERICA (Корея), реализован групповой кинематически зависимый привод для медиального и дистального звеньев, а проксимальное звено выполнено с индивидуальным приводом [80]. Аналогичный подход использован в конструкции антропоморфного захвата Robonaut 2 [81].

Упрощение системы управления было обеспечено в захвате с двумя исполнительными группами, созданном в State Key Laboratory of Tribology Tsinghua University (Китай), за счет использования специальной системы

передачи движения, связывающей двигатель и выходные звенья [82]. Каждая из оппозитных исполнительных групп функционирует в одном из двух основных режимов: с адаптацией к профилю поверхности объекта и без адаптации. Система передачи движения дистальному звену реализует кинематическую зависимость от движения проксимального звена. Это позволяет использовать активный режим с одновременной работой двух двигателей и адаптацией звеньев к профилю объекта – обхват по контуру. В пассивном режиме, без работы двигателя дистального звена, выполняется сохранение его начального пространственного положения – щипковый обхват. Исходная информация о форме объекта определяет выбор режима движения.

Близкий по идее подход реализован в School of Mechanical Engineering (Китай) [83]. В двух оппозитных исполнительных группах с индивидуальными двигателями для каждого выходного звена используются три режима управления: линейно параллельный (SLIP) захват, адаптивный (SA) и комбинированный. В последнем варианте режимы управления одной исполнительной группы – в вариации SLIP, оппозитной – адаптивный SA. Выбор режима осуществляется также после идентификации формы объекта.

Особенностью группового привода исполнительной группы с изменяемой структурной схемой является переменность объекта и параметра управления в процессе обхвата и удержания детали [84].

На каждом этапе обхвата изменяется объект управления – выходное звено [64]. Параметрами управления на этапе обхвата являются углы поворота выходных звеньев последовательно от проксимально до дистального. Процесс обхвата не зависит от конструкции системы передачи движения и схемы установки пружин.

В известных работах, посвященных управлению исполнительной группой звеньев с изменяемой структурой, преимущественно исследуется стадия удержания объекта. При этом наряду с общепринятым прямым регулированием силы на поверхности объекта на основе обратной связи по усилию [85] активно используется не прямое управление силой – через

контроль импеданса [86 - 92]. В этом случае приоритетным является обеспечение динамического поведения выходного звена, контактирующего с объектом. В основе подходов, по которым осуществляется управление через контроль импеданса, положена теория равновесного точечного управления [93], оптимизационные модели [94].

Типичная схема управления с использованием контроля импеданса представлена в работе, выполненной в Beihang University (Китай) [85] (рисунок 1.18). Настройка контроля импеданса осуществляется на основе регистрации усилия, создаваемого в точке контакта и ее перемещения. По этим параметрам реализуется корректировка момента на двигателе. При этом предполагается деформируемость объекта под действием сил со стороны симметрично расположенных оппозитных исполнительных групп. Адаптация программы управления при неопределенных характеристиках объекта выполняется на основе минимизации критерия, учитывающего текущие значения силы, скорости и перемещения точки контакта.

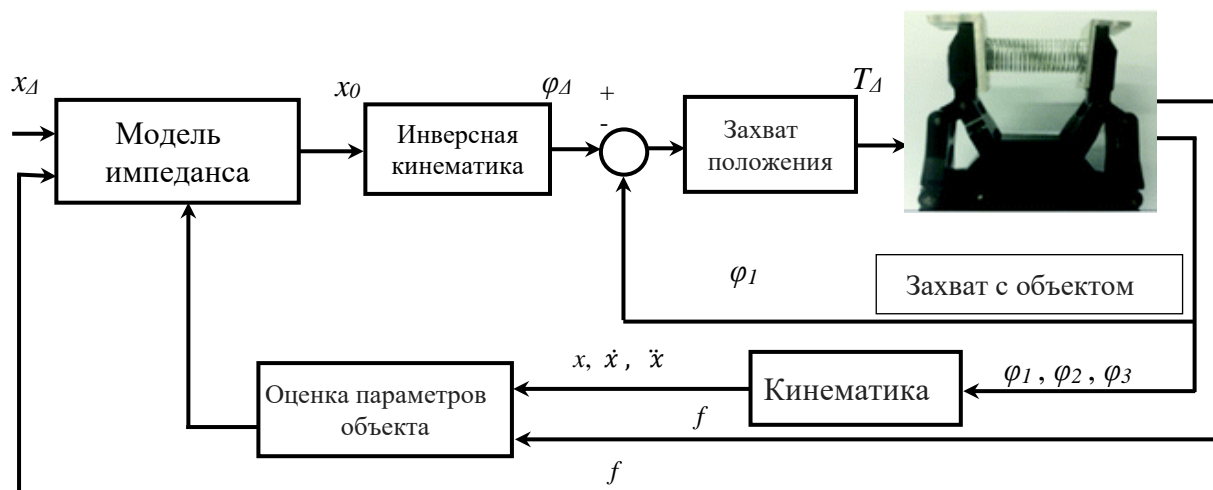


Рисунок 1.18 - Схема адаптивного управления антропоморфным захватом на этапе удержания: оценка параметров объекта (Object parameters Estimation), модель импеданса (Desired impedance model), захват с объектом (Underactuated gripper with grasper object), захват положения (Position Control), инверсная кинематика (Inverse Kinematics), кинематика (Kinematics) [85]

Процесс обхвата недеформируемого объекта исполнительной группой звеньев изучен в значительно меньшей степени [95]. В работе [96] рассматривается обхват закрепленного объекта четырьмя исполнительными группами звеньев в среде MATLAB Programming.

В известных работах стадия обхвата исследуется с момента силового взаимодействия дистального выходного звена и объекта. Предшествующие стадии - контакт проксимального и медиального звеньев с объектом - не рассматриваются. Такой подход является правомерным при взаимодействии с закрепленным объектом или при его симметричном положении относительно оппозитных исполнительных групп звеньев. Фиксированное состояние объекта характеризуется отсутствием его смещения по опоре под действием сил, создаваемых выходными звеньями на этапе обхвата. Их величина определяется конструкцией системы передачи движения, используемым типом механизма (рычажным, с гибкой тягой), способом установки пружины [97].

Более общим является случай взаимодействия выходных звеньев с незакрепленным объектом и/или произвольным его положением относительно оппозитных исполнительных групп. В этом случае силы, действующие со стороны выходных звеньев на объект, могут привести к недопустимому его смещению по опоре. Этот фактор следует учитывать при разработке алгоритма управления двигателями оппозитных исполнительных групп на стадии обхвата.

Исследователи из Huazhong University of Science and Technology (Китай) использовали подход, основанный на применении резистивных тонкопленочных датчиков давления [79]. Принципиальная схема управления представлена на рисунке 1.19. Исследовались взаимодействия исполнительных групп с тремя выходными звеньями и с групповым приводом от одного двигателя. Аппаратное обеспечение системы управления антропоморфным захватом состояло из платы управления Arduino, двигателя постоянного тока, вспомогательного регулятора скорости, регулятора

направления, датчиков давления, преобразователя переменного напряжения в постоянное. Использованный датчик давления имел диаметр 18 мм, что определило повышенную ширину выходных звеньев. Датчик точно фиксировал взаимодействие с объектом только при совпадении точки контакта с его центром. Авторы отмечают сложность в управлении, обусловленную тем, что на один вход системы управления двигателя поступают сигналы с трех датчиков давления.

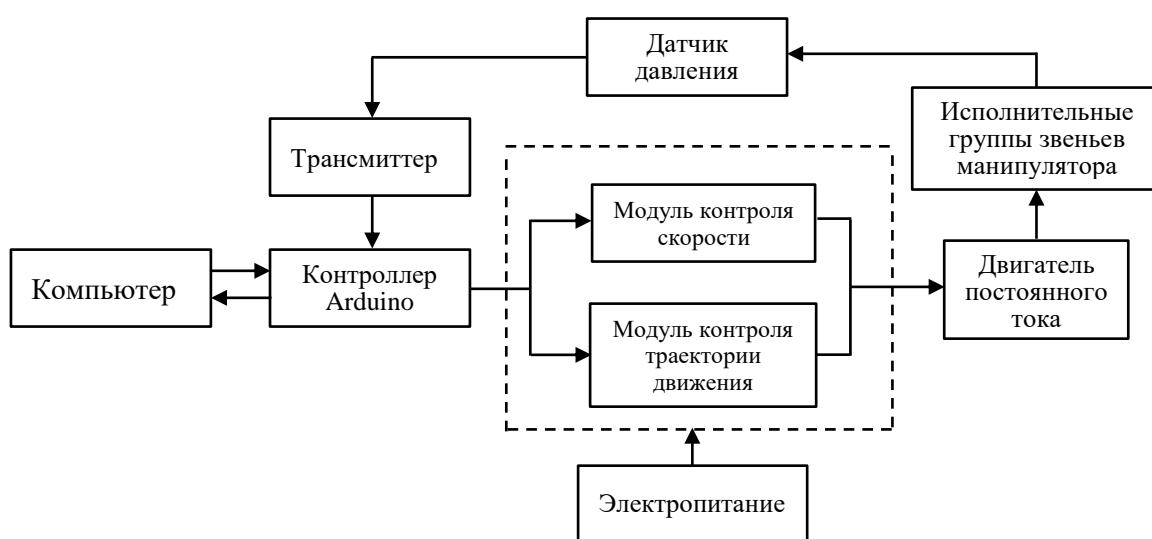


Рисунок 1.19 - Принципиальная схема системы управления: компьютер (Computer), контроллер Arduino (Arduino controller), трансмиттер (Transmitters), датчик давления (Pressure sensors), модуль контроля скорости (Speed control module), модуль контроля траектории движения (Directional control module), электропитание (Power supply), исполнительные группы звеньев манипулятора (Manipulator claws), двигатель постоянного тока (DC motor) [79]

Регистрация усилия на выходном звене должна выполняться на протяжении всей длины выходного звена. Имеющиеся компактные датчики давления в настоящее время не отвечают этому требованию. В связи с этим задача разработки алгоритма управления двигателями оппозитных исполнительных групп звеньев для общего случая является актуальной.

Параметром управления на завершающем этапе (удержание) является сила, создаваемая в точке контакта. В Keio University (Япония) были выполнены исследования регистрации усилий, создаваемых выходными звеньями антропоморфного захвата на объекте с использованием датчика силы

[98]. Было установлено, что информация, снимаемая с датчика силы, содержит много шума. Кроме того, отмечается, что стабильный контакт с объектом затруднен из-за мягкой структуры датчика и узкой полосы частот измерения силы.

Авторами исследования для решения проблемы нестабильности контроля силового воздействия вместо датчика силы было предложено использовать «наблюдатель возмущений». «Наблюдатель возмущений» определяет силовое воздействие на объект по изменению его положения и/или состояния. Метод предполагает использование искусственного интеллекта и стадию предварительного обучения [99]. Для его надежной работы используются результаты статистической обработки значительного массива данных [100].

Взаимодействие исполнительной группы с изначально неидентифицированным объектом не позволяет использовать метод «наблюдателя возмущений», в силу отсутствия возможности обучения. В связи с этим необходима разработка метода управления усилием, действующим на объект без использования датчика силы.

При этом следует учитывать, что в исполнительной группе с изменяемой структурной схемой усилие может создаваться любым из трех выходных звеньев в точке, неопределенной изначально.

1.6 Постановка задачи диссертационной работы

Развитие робототехники в XXI веке позволило перейти от промышленных роботов к сервисной робототехнике. В соответствии с ISO 8373 сервисные роботы предназначены для выполнения полезных задач для людей без вмешательства человека. Составляющая сервисных роботов – антропоморфный робот в соответствии с ГОСТ Р 60.2.0.3 – 2022 - есть «Биоморфный робот, обладающий функциональными возможностями (или их частью), присущими человеку». Следует отметить, что его возможности обеспечиваются в первую очередь антропоморфными хватными модулями,

возможности которых должны быть приближены к кисти руки человека. Существующий на сегодня уровень развития техники не позволяет в полной мере реализовать это требование.

Это обусловлено рядом факторов, основными из которых являются:

- несовершенство силовой компоненты хватных модулей: низкая удельная мощность двигателей, сложные и громоздкие системы приводов;
- не разработанность систем управления, обеспечивающих выполнение согласованных движений механизмов с большим числом объектов управления.

В связи с этим создать хватные модули, копируя построение кисти руки человека и реализацию полного функционала, не представляется возможным. На данном этапе следует реализовать выполнение основных действий: обхват, надежное удержание недетерминированного объекта. Для этого необходимо решить задачу определения структуры, обладающей минимальным числом исполнительных групп, оптимальным их положением на основании хватного модуля, наименьшим числом кинематических пар. Ее решение следует вести с учетом технически реализуемых вариантов и используемых схем построения приводов.

В части параметрического синтеза в отношении длин выходных звеньев и углов относительного поворота их следует принять соответствующими пальцам руки человека.

Сложности компоновки индивидуальных приводов выходных звеньев определили переход к новому классу механизмов с групповым приводом и изменяемой структурной схемой («underactuated grippers»). Метод анализа, основанный на исследовании структурной схемы, не обеспечивает определение всех его свойств, в том числе принципиально новым способом – способом обхвата объекта. Для анализа взаимодействия выходных звеньев и звеньев системы передачи движения необходима разработка новой дополнительной модели, описания отражающей функционирование таких механизмов.

Особенностью исполнительных групп звеньев с изменяющейся в процессе обхвата структурной схемой является адаптивность положения выходных звеньев к профилю объекта. Это позволяет выполнять обхват незакрепленных объектов с изначально недетерминированной формой и положением. Для этого необходимо разработать алгоритм управления двигателями оппозитных исполнительных групп звеньев, учитывающий фактическое состояние объекта, определяемое в процессе обхвата.

При обхвате объектом управления поочередно выступают звенья, начиная с проксимального до дистального, а параметром управления - углы их относительного поворота. На завершающем этапе параметр управления - усилие, создаваемое выходным звеном на объекте. Попытки реализовать контроль его величины с использованием датчиков сил не привели к желаемому результату. Это обусловлено значительными их габаритами и неопределённостью положения точки контакта с объектом по длине звена.

В связи с этим предлагается переход к контролю усилий без использования датчиков силы. Он реализуется с использованием искусственного интеллекта и обучения. Такой подход неприменим при взаимодействии с недетерминированными объектами. В связи с этим необходимо разработать метод контроля усилия, создаваемого выходным звеном на объекте, используя традиционное аппаратное оснащение: энкодер, установленный на двигателе; датчик, регистрирующий положение точки контакта на звене.

Анализ известных решений показал, что из возможных конструкций систем передачи движения наиболее предпочтительно использование рычажных механизмов. Их характеризует высокая жесткость, значительные передаваемые усилия, реализация прямого и обратного движений. При этом его расположение вне выходных звеньев определяет необходимость решения задачи параметрического синтеза, обеспечивающего получение оптимальных габаритов. Такими следует считать поперечные размеры, характерные для

пальцев человека в скафандре, предназначенного для работы в космосе или под водой.

Для повышения эксплуатационных возможностей сервисного робота, оснащенного антропоморфным хватным устройством с групповым приводом выходных звеньев, необходимо решить совокупность следующих задач:

- выполнить анализ антропоморфных хватных модулей сервисных роботов с групповым приводом выходных звеньев;

- 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 избыточной подвижностью;

- решить задачу структурного синтеза антропоморфного захвата на основе разделения на независимые иерархические уровни;

- разработать алгоритм управления оппозитными исполнительными группами звеньев при обхвате недетерминированных объектов;

- разработать математическую модель и алгоритм управления моментом на двигателе, обеспечивающем создание на выходных звеньях заданной по величине силы;

- разработать критерии и решить задачу параметрического синтеза рычажной системы передачи движения для группового привода исполнительной группы звеньев с учетом стесненных условий работы с объектом.

Решение этих задач позволит повысить эксплуатационные возможности сервисного робота:

- обхват недетерминированных объектов без их смещения и произвольном расположении относительно хватного модуля;

- удержание объекта с заданным усилием на выходном звене без использования на них датчиков силы по контролю приведенного момента и реализуемого на двигателе;
- взаимодействие с объектами в стесненных условиях за счет уменьшения габаритов по высоте;
- повышение грузоподъемности за счет уменьшения массы и габаритов, обусловленной минимизацией числа выходных звеньев и двигателей в захватном модуле;
- надежное удержание за счет увеличения числа контактирующих выходных звеньев с объектом;
- расширение диапазона размеров обхватываемых объектов, в том числе до 20 мм.

ГЛАВА 2 МЕТОД АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ СОСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ

2.1 Общие принципы построения функциональных схем многодвигательных механических систем

В соответствии с ГОСТ 2.701 – 2008 «Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению», для разъяснения процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях изделия (установки) или изделия, предназначены функциональные схемы. Для электрических схем ГОСТ 2.702 - 2011 определил правила их выполнения. Данный тип схем используется для анализа работы и формирования электротехнических схем, схем управления.

Метод анализа механических систем основан на исследовании структурных схем, по сути совпадающих по смыслу и содержанию с кинематическими схемами (ГОСТ 2.770-68) и отображающих в виде условных обозначений механические составные части и их взаимосвязи. Для механизмов с одним двигателем структурная схема однозначно определяла его кинематику, выходное звено и взаимодействие звеньев. Она позволяла в полной мере исследовать кинематическое и силовое исследование. В многодвигательных механических системах с несколькими выходными звеньями возникает взаимное влияние составных частей приводов, не отражаемое структурной схемой. Данное обстоятельство не позволяет анализировать процессы, происходящих при работе.

Особенно остро этот момент проявился с появлением и развитием робототехнических систем (рисунок 2.1 – 2.3). Наличие нескольких выходных звеньев, формирующих замкнутые и разомкнутые структурные схемы, сложная перекрестная компоновка систем передачи движения определила необходимость разъяснения протекающих в них процессов использования функциональных схем. Функциональная схема механической системы дополняет структурную схему и обеспечивает более полный анализ ее свойств.

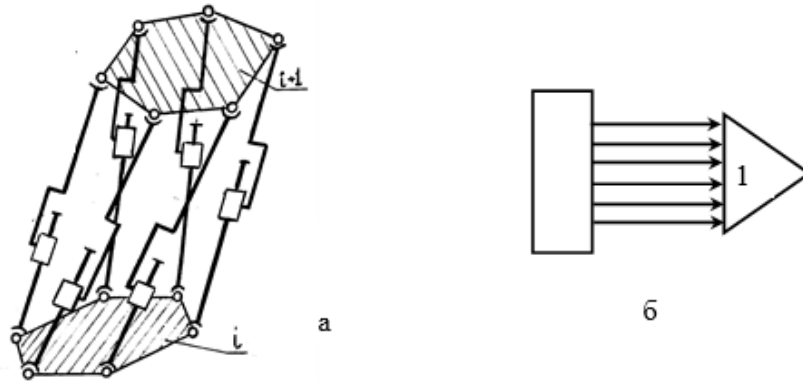


Рисунок 2.1 - "Платформа Стюарта": а - структурная схема; б - функциональная схема

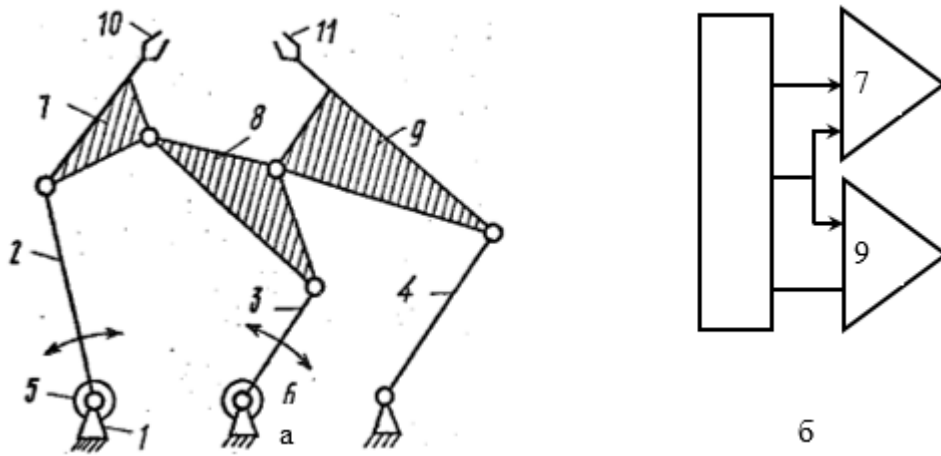


Рисунок 2.2 – Манипулятор с замкнутой структурой [Джолдасбеков У. А. и др. Исполнительный механизм робота. Авт.св.СССР №1722806, 1992.]

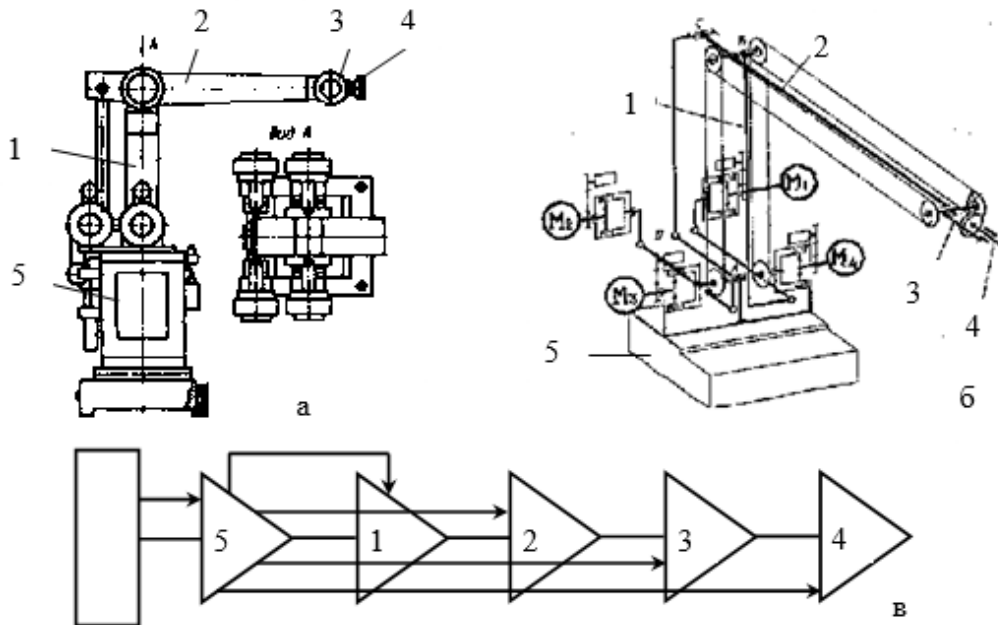


Рисунок 2.3 - Промышленного робота ТУР – 10: а - общий вид; б - структурная схема; в - функциональная схема

Основы построения функциональных схем сложных механических систем разработал А.Н. Макаров в докторской диссертации [101]. Были определены основные правила их составления. Это позволило выполнять анализ процессов, протекающих в многодвигательных системах, и выявлять взаимовлияние движения выходных звеньев и систем передачи движения.

На функциональной схеме не повторяется информация, отображаемая на структурной схеме. Составные части изделия представляются в «обезличенной форме». Это позволяет, исключив детализацию, присущую структурной схеме, рассматривать составные части как системные элементы и отображать их взаимодействие и взаимовлияние. Сопряжение между структурной и функциональной схемами осуществляется через единство принятых обозначений составных частей.

А.Н. Макаров определил общие правила построения функциональных схем многодвигательных механических систем. На функциональных схемах отображаются: основание – в виде прямоугольника, выходные звенья механизма, связи строения, связи функционирования (см. рисунки 2.1 – 2.3).

Выходные звенья – это звенья, выполняющие назначение механической системы. Они представляются в виде треугольников с номером, совпадающим с номером, принятым для этих звеньев на структурной схеме.

Связи строения отображают кинематические пары или кинематические соединения без уточнения их вида. Они представляются в виде прямых линий, соединяющих выходные звенья. Обозначения, сопровождающие линию, совпадают с буквенным обозначением кинематической пары. Если связь строения выполнена в виде кинематического соединения, включающего несколько звеньев и кинематических пар, буквенное обозначение не проставляется.

Выходные звенья и связи строения образуют замкнутые или разомкнутые основные кинематические цепи. При снятии любой связи строения механическая система распадается.

Силовое воздействие на выходные звенья реализуется через связи функционирования. Они обеспечивают изменение обобщенных координат, определяющих пространственное положение выходных звеньев. Связь функционирования включает силовую составляющую (двигатель и редуктор) и систему передачи движения от неё к выходному звену. Связь функционирования представляется на функциональной схеме в виде линии со стрелкой. Начало линии располагается на звене, на котором размещена силовая составляющая. Если звенья связи функционирования $i + 1$ выходного звена образуют кинематические пары с i звеном, то линия со стрелочкой пересекает символ i звена. Если звенья системы передачи движения $i + 1$ не образуют подвижных соединений с i звеном, стрелочка символ i звена не пересекает.

При снятии связей функционирования механическая система сохраняет свое строение, но в ней не реализуется движение выходных звеньев.

Связи функционирования могут выполняться совмещенными со связями строения - поступательная пара, выполненная в виде линейного актуатора (см. рисунок 2.1).

Функциональные схемы сложных механических систем позволяют отображать взаимодействие и взаимовлияние составляющих ее частей. В частности, наличие параллельных приводов (см. рисунок 2.1, 2.3) определяет необходимость согласованного управления каждым. Расположение части связей функционирования в пределах предшествующих звеньев в промышленном манипуляторе ТУР - 10 (отображено пересечением связи функционирования выходного звена 4, звеньев 1-3) определяет необходимость формирования закона управления движением звена 4 с учетом движения предшествующих звеньев 1 -3 (см. рисунок 2.3).

А.Н. Макаров рассматривал механические системы с постоянной в процессе работы структурой и числом активных приводов, совпадающим с числом выходных звеньев. В настоящее время сформировался новый класс механизмов с групповым приводом и изменяемой структурной схемой.

Составляющие антропоморфного захвата – исполнительные группы звеньев (underactuated finger) - обладают числом двигателей, меньшим, чем число выходных звеньев, и более сложным взаимодействием составляющих его частей. В таких системах введены новые, ранее не использовавшиеся компоненты. Это определило необходимость дополнения и развития модели описания подобных механических систем в виде функциональных схем.

2.2 Особенности построения захватов с групповым приводом и их отображение на функциональных схемах

В настоящее время разработано много вариантов построения исполнительных групп звеньев, реализующих адаптивное управление движением выходных звеньев за счет использования группового привода и изменяемости структурной схемы [63]. Для передачи движения используются различные механизмы: рычажные [102, 69], зубчатые [103, 57], с гибкой тягой [66, 104], комбинированные [67, 102]. Общим для всех вариантов является обеспечение движения двух и более выходных звеньев от одного двигателя за счет введения дополнительных компонентных составляющих. Определилась необходимость дополнить и развить метод их отображения и реализуемого взаимодействия основных и дополнительных компонентов.

Исполнительные группы звеньев реализуют один из трех способов обхвата объекта: щипкового, по контуру, комбинированный. При щипковом обхвате в контакт с внешним объектом вводится только дистальное звено с сохранением начального угла его пространственной ориентации. При обхвате по контуру все выходные звенья, начиная с проксимального, входят последовательно в контакт с поверхностью внешнего объекта. При комбинированном способе выполняется щипковый обхват, если проксимальное или медиальное звено не вступают в контакт с объектом. При наличии такого контакта далее реализуется обхват по контуру. При анализе

антропоморфного захвата необходимо выполнить идентификацию реализуемого варианта обхвата на основе общности (совпадения) признаков.

Выполнить идентификацию по структурной схеме невозможно в силу большой вариативности используемых передач, кинематических пар, наличия и размещения дополнительных компонентов. Идентификация антропоморфного захвата может быть выполнена по функциональной схеме по совпадению связей строения и функционирования.

Непосредственный анализ захватов с групповым приводом, выполняемый по структурной схеме, определяет их как системы с избыточной подвижностью и неработоспособными [105]. Это отображено, в частности, в используемом названии «underactuated grippers» - захваты с недостаточным приводом.

Для формирования функциональных схем механических систем с групповым приводом следует дополнить известную методику построения отображением ранее не использовавшихся составляющих: дополнительных связей функционирования и строения.

Назначение связи функционирования – оказание силового воздействия на выходное звено через двигатель, обеспечивающий его движение. Данное воздействие является действием активного типа. При этом в систему может быть введен дополнительный компонент, оказывающий на выходное звено силовое воздействие пассивного типа - препятствующий его движению. Такое воздействие является также связью функционирования, но дополняющей активную и выполняются в виде пружин. Пружины участвуют в формировании последовательности движения выходных звеньев, но как часть привода на структурных схемах не отражаются.

Способы их введения в систему передачи движения достаточно разнообразны. Для их отображения на функциональной схеме будем использовать дугу с двухсторонней стрелочкой. Стрелочки заканчиваются на звеньях, между которыми устанавливается пружина и на которые она оказывает силовое действие (рисунок 2.4, а). Это могут быть выходные звенья,

звенья системы передачи движения, звенья дополнительной связи строения. Обозначаются дополнительные связи строчной буквой латинского алфавита.

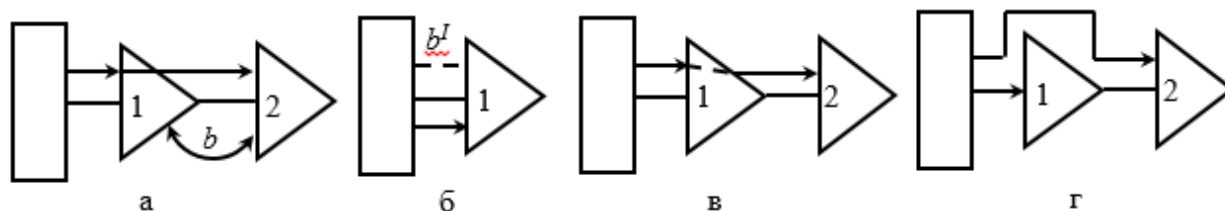


Рисунок 2.4 – Графическое отображение: а - дополнительной связи функционирования b , введенной между звеном 1 и 2; б - дополнительной связи строения b^I , введенной между стойкой и звеном 1; в - кинематически зависимого движения звена 2 от движения звена 1; г - передачи движущего момента звену 2 от индивидуального привода, не имеющего подвижных соединений со звеном 1

В структуру механической системы могут вводиться дополнительные связи строения в виде кинематических соединений, связывающих выходные звенья и включающих в себя, по крайней мере, одно звено и две кинематических пары. На функциональной схеме они отображаются штриховой линией (рисунок 2.4, б). Их введение обеспечивает изменение кинематики всей системы.

На функциональной схеме следует предусмотреть отображения специфичных процессов, протекающих в механической системе с групповым приводом - кинематическую зависимость движения выходных звеньев с созданием движущего момента одновременно в нескольких кинематических парах. Кинематическая зависимость есть движение $i + 1$ выходного звена при изменении обобщенной координаты i звена. Ее отображение выполняется в виде пунктирной линии, пересекающей условное обозначение i выходного и продолжающейся до звена $i + 1$ (рисунок 2.4, в). Связь функционирования i звена создает движущий момент в паре, образованной i и $i + 1$ звеном. Линия ее символизирующая имеет стрелочку при достижении как i так и $i + 1$ звена (см. рисунок 2.4, в).

Если звенья связи функционирования $i + 1$ звена не образуют кинематических пар с i звеном, то линия ее представляющая не пересекает

символ i звена (рисунок 2.4, г). Для возможности идентификации исполнительных групп звеньев по способу обхвата объекта построены функциональные схемы для наиболее типичных конструкций.

Антропоморфный захват, разработанный в Tsinghua University (Китай), имеет три однотипные исполнительные группы звеньев с двумя выходными звеньями в каждом (рисунок 2.5) [102]. В системе передачи движения используется одновременно зубчатая и тросовая передачи. В исполнительную группу введено по одной дополнительной связи строения и функционирования (рисунок 2.5, б, г).

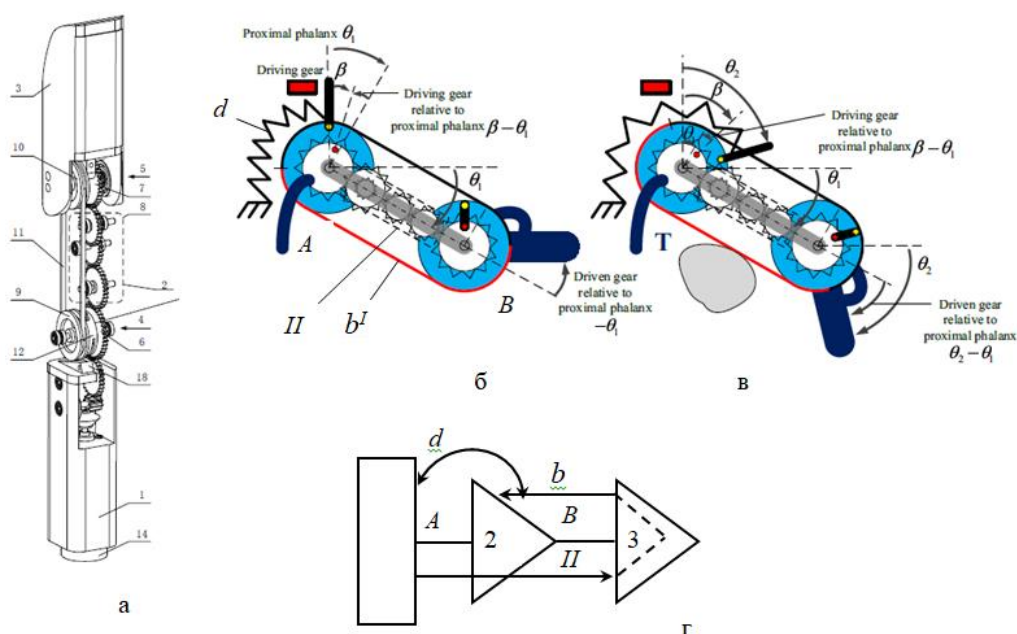


Рисунок 2.5 - Исполнительная группа звеньев антропоморфного захвата PASA - GB hand с дополнительными связями функционирования d и b [102] : а - общий вид; б - структурная схема при реализации щипкового обхвата; в - структурная схема при реализации обхвата по контуру; г - функциональная схема

Через зубчатую передачу обеспечивается создание крутящего момента в кинематической паре В и движение звена 3. Связь функционирования b в виде тросовой передачи создает крутящий момент в кинематической паре А и обеспечивает движение звена 2 (рисунок 2.5, б). При этом ведущим является звено 3. Дополнительная связь функционирования d введена между основанием и связью функционирования. Введение дополнительных связей

обеспечивает реализацию щипкового обхвата внешнего объекта (см. рисунок 2.5, б) и обхвата по контуру (рисунок 2.5, в). Функциональная схема представлена на рисунке 2.5, г.

Антропоморфный захват, созданный совместно учеными Nanjing University of Science and Technology (Китай) и Hanyang University ERICA (Южная Корея), изначально позиционировался как захват с более простой конструкцией (рисунок 2.6) [102, 69], но обладающий возможностями, присущими антропоморфному захвату RobotiQ.

Целью разработки было обеспечить для исполнительной группы звеньев комбинированный способ обхвата. Движение трех выходных звеньев обеспечивается двумя двигателями: проксимальным и медиальным через групповой привод, дистальным через индивидуальный.

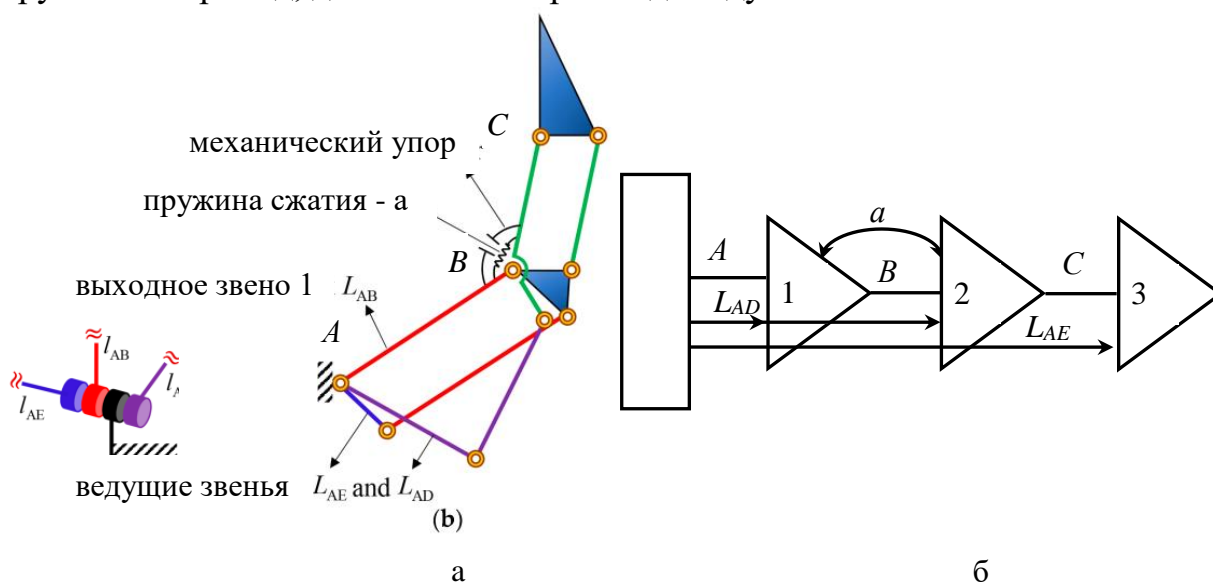


Рисунок 2.6 – Исполнительная группа звеньев, созданная совместно учеными Китая и Кореи с групповым приводом звеньев 1 и 2, индивидуальным звеном 3 [102]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Обхват внешнего объекта с адаптацией звеньев 1 и 2 к профилю поверхности (рисунок 2.7) обеспечивается за счет использования группового привода и дополнительной связи функционирования a , введенной между этими звеньями.

Щипковый вариант обхвата (рисунок 2.7, а) реализуется за счет одновременной работы приводов группового (движение звеньев 1 и 2) и индивидуального (движение звена 3). После обхвата объекта проксимальным и медиальным звеном достижение дистальным звеном реализуется за счет собственного двигателя и связи функционирования L_{AE} (рисунок 2.7, б).

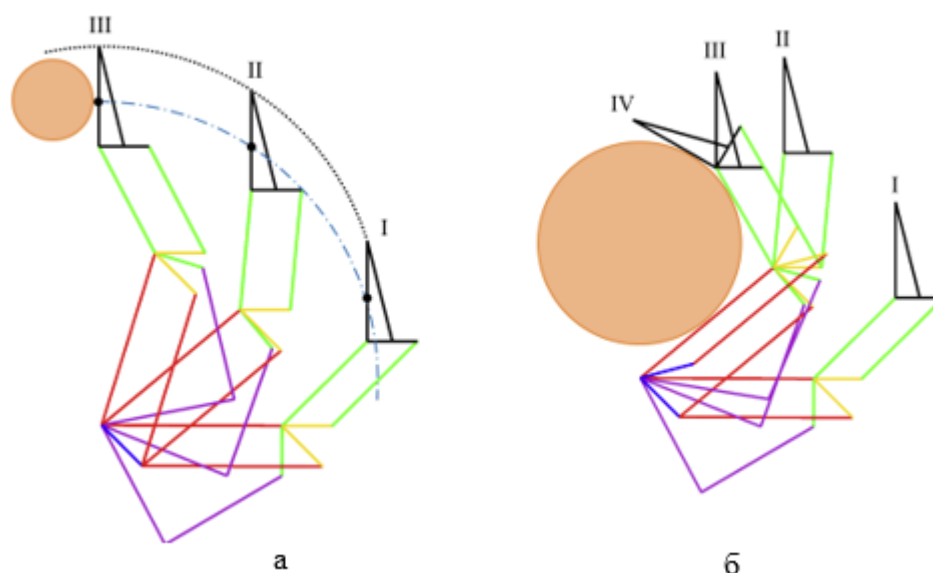


Рисунок 2.7 - Последовательность обхвата: а - щипкового, б - по контуру [102]

Связь функционирования дистального звена L_{AE} образует кинематические пары с проксимальным и медиальным звеньями. В силу этого сохранение угла ориентации дистального звена при щипковом варианте обхвата реализуется за счет корректирующего движения его привода. Функциональная схема представлена на рисунке 2.6, б. Захват отличается более сложным алгоритмом управления, предусматривающий согласованное управление двумя двигателями. Данное требование следует из параллельного расположения связей функционирования (рисунок 2.6, б).

В центре инноваций робототехники DFKI (Robotics Innovation Center, Germany) создан антропоморфный захват с четырьмя исполнительными группами звеньев, три из которых параллельны и оппозитны четвертому (рисунок 2.8) [32]. Каждая исполнительная группа включает три выходных

звена. Захватное устройство создавалось в рамках продолжающихся работ по разработке манипулятора, работающего совместно с космонавтом [106].

Разработанный вариант отличается сложной конструкцией системы передачи движения дистальному звену. Для обеспечения адаптивного варианта обхвата введены две дополнительные связи функционирования a и b и дополнительная связь строения DEB между звеном II и стойкой. Введение трех дополнительных структурных элементов обеспечивает комбинированный обхват (щипковый, по контуру после остановки первого звена). В отличие от конструкции, исследованной в работе [102], для этого использовался только один двигатель. В силу применения неререверсивного тросового привода возврат выходных звеньев в исходное положение обеспечивается пружиной $г$.

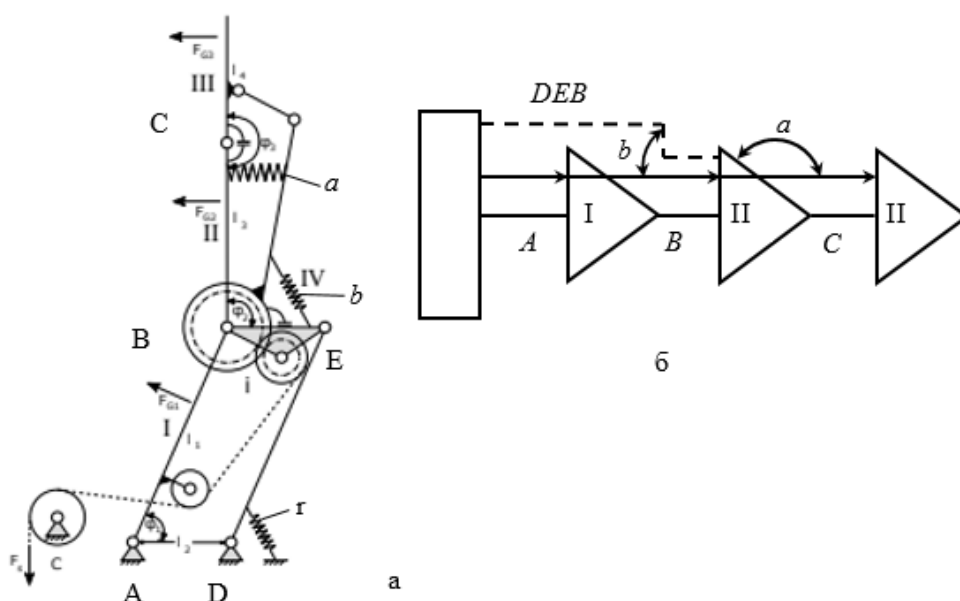


Рисунок 2.8 – Исполнительная группа звеньев, с групповым приводом, разработанная в DFKI, с использованием трех видов механизмов (канатного, зубчатого, рычажного) [32]: а - структурная схема; б - функциональная

Одновременно была разработана конструкция захвата с двумя оппозитными исполнительными группами звеньев, созданная также в DFKI [107]. Использовался более простой вариант построения с рычажной системой передачи движения. В исполнительную группу с двумя выходными звеньями введена только одна дополнительная связь функционирования - между звеном

системы передачи движения и выходным звеном 1 (рисунок 2.9, б, в). Это обеспечивает обхват внешнего объекта по контуру. Конструкция исполнительной группы звеньев отличается простотой и, как следствие, надежностью. Данное обстоятельство принято специалистами *DFKI*, превалярующим перед возможностью реализации комбинированного обхвата.

В рамках разработки манипулятора ассистента космонавта исследовались варианты с тремя и четырьмя выходными звеньями [106]. Практически был реализован только вариант с двумя выходными звеньями.

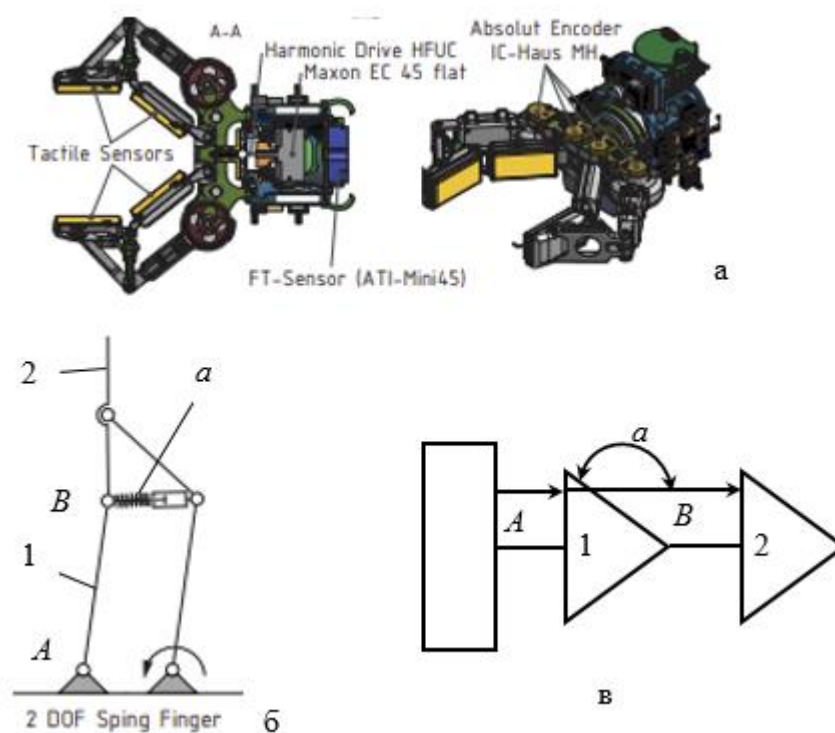
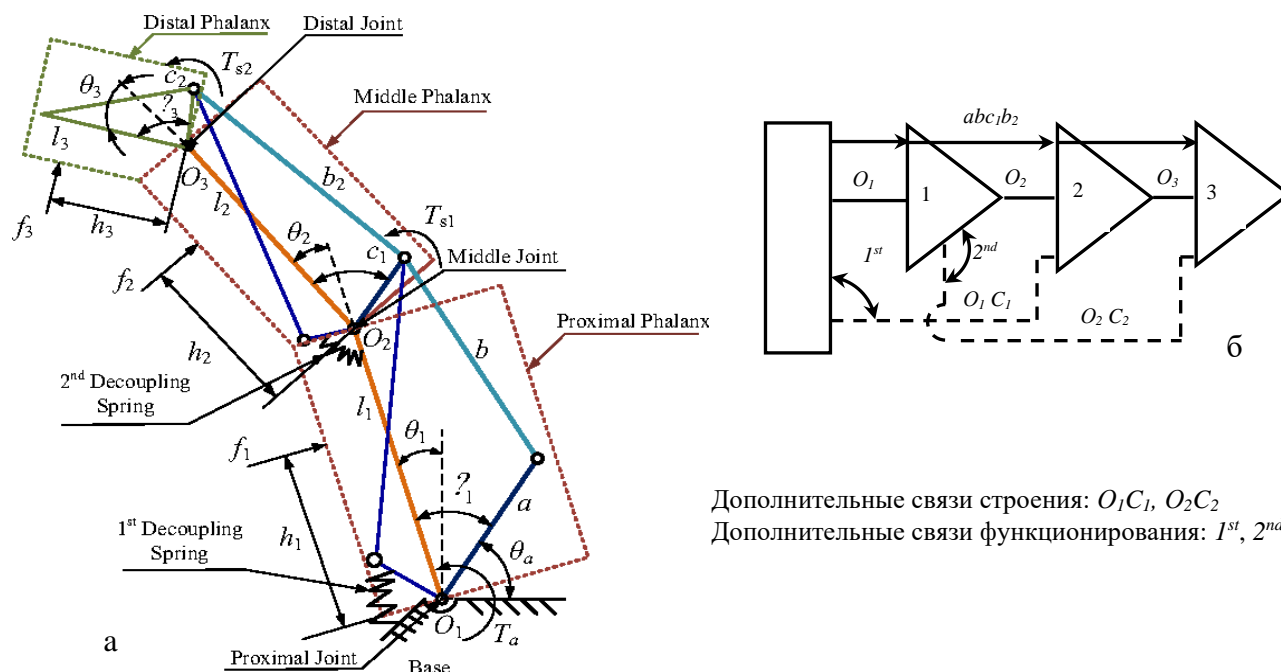


Рисунок 2.9 – Антропоморфный захват с оппозитными исполнительными группами звеньев [107]: а - общий вид антропоморфного захвата; б - структурная схема исполнительной группы звеньев, в - функциональная схема

Необходимость обеспечения большего распределения сил на поверхности объекта определяет использование исполнительных групп с тремя выходными звеньями. В Tsinghua University (Китай) разработана конструкция исполнительной группы с тремя выходными звеньями (рисунок 2.10, а) [108]. В качестве связи функционирования использована рычажная система передачи движения abb_2 , создающая движущий момент

одновременно во всех трех вращательных парах: O_1, O_2, O_3 . Для обеспечения комбинированного способа обхвата используются две дополнительные связи строения: между стойкой и звеном 2, между звеном 1 и звеном 3 и две дополнительные связи функционирования, введенные между дополнительными связями строения и звеньями 1st и 2nd.



Дополнительные связи строения: O_1C_1, O_2C_2
 Дополнительные связи функционирования: 1st, 2nd

Рисунок 2.10 – Исполнительная группа звеньев с рычажной системой передачи движения, разработанная в Tsinghua University [108]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Исполнительная группа звеньев обеспечивает одновременное относительное движение всех трех звеньев, аналогично тому, что имеет место в кинематически зависимых системах. При этом сохраняется движение последующих звеньев при остановке предшествующих, то есть реализуется комбинированный способ обхвата.

Вариант с тремя выходными звеньями и рычажной системой передачи движения разработали и исследовали в State Key Laboratory of Robotics and System (Harbin Institute of Technology, Китай) [109]. Особенностью конструкции является введение дополнительной связи функционирования между звеньями системы передачи движения (рисунок 2.11). Это обеспечивает движение проксимального и медиального звеньев до достижения ими

поверхности внешнего объекта и кинематически зависимое движение дистального звена.

Использована комбинированная система построения группового привода. Движение проксимального звена AF и медиального FH обеспечивается через групповой привод с последовательным их движением. Движение звена HJ кинематически зависимое от движения звена FH и осуществляется с ним синхронно за счет введения дополнительной связи строения GI . Следует отметить, что через нее обеспечивается создание момента в кинематической паре H , что отражено на функциональной схеме штриховой линией со стрелочкой.

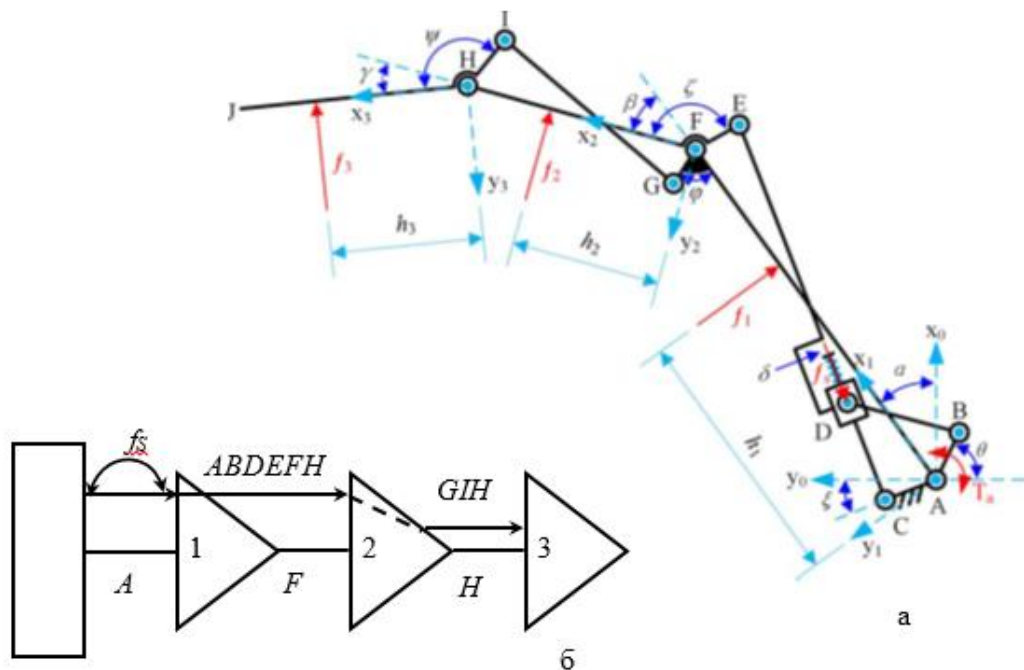


Рисунок 2.11 – Исполнительная группа звеньев, созданная и исследованная в Harbin Institute of Technology [109]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Варианты введения дополнительных связей строения и функционирования представлены в работе, выполненной группой авторов из Hunan University (China) [110]. Для исполнительной группы звеньев с групповым приводом, двумя выходными звеньями и тросовой системой передачи движения показана возможность получения систем, реализующих различные способы обхвата (рисунки 2.12, 2.13).

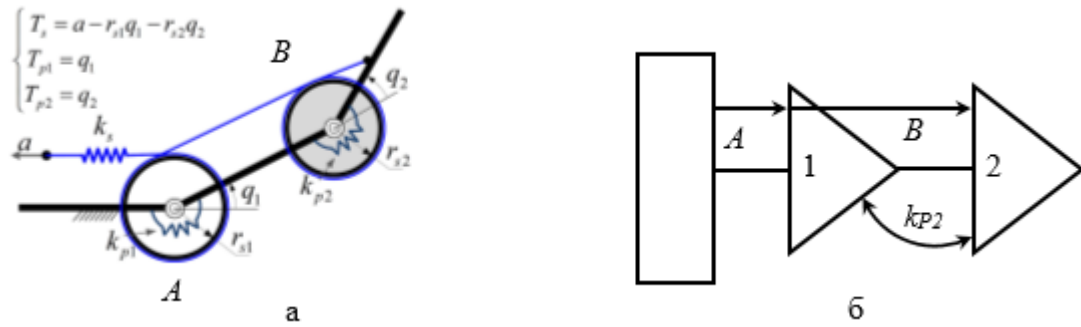


Рисунок 2.12 – Исполнительная группа с двумя выходными звеньями и тросовым приводом [110]: а - структурная схема; б - функциональная схема

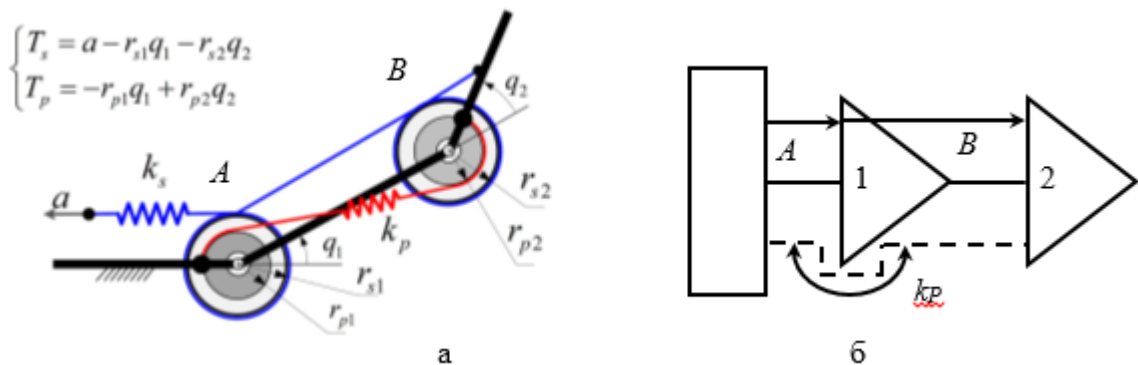


Рисунок 2.13 - Исполнительная группа звеньев с тросовой передачей и дополнительной связью функционирования, введенной в дополнительную связь строения [110]: а - структурная схема; б - функциональная схема

При составлении функциональных схем для исполнительных групп звеньев, использующих тросовую передачу, следует «выделять» пружину k_{p1} (рисунок 2.12), обеспечивающую реверсивное движение и не изменяющую характер взаимодействия выходных звеньев. Действие этой пружины можно заменить оппозитной ветвью тросовой передачи.

На структурной схеме (рисунок 2.12, а) представлен вариант конструкции, реализующий обхват по контуру двумя выходными звеньями. Для его осуществления используется только одна дополнительная связь функционирования k_{p2} . Движущий момент создается через тросовую передачу одновременно в кинематических парах А и В за счет крепления конца троса на звене 2.

Версия, представленная на структурной схеме (рисунок 2.13, а) с использованием еще дополнительной связи строения между стойкой и звеном 2, выполненная через трос с блоками диаметром r_{p1} , r_{p2} , обеспечивает

реализацию еще и щипкового способа обхвата. При этом дополнительная связь функционирования введена в дополнительную связь строения.

В Huazhong University of Science and Technology (Китай) разработана исполнительная группа с тремя выходными звеньями [111, 112]. Исследователям удалось обеспечить комбинированный вариант обхвата внешнего объекта за счет введения двух дополнительных связей строения и двух дополнительных связей функционирования (рисунок 2.14).

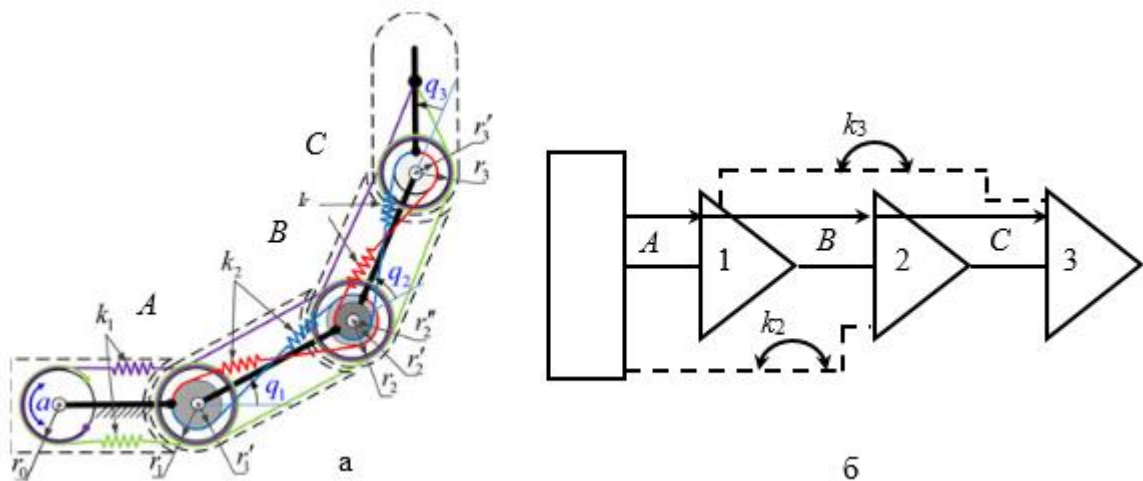


Рисунок 2.14 - Исполнительная группа звеньев, созданная Huazhong University с тремя выходными звеньями и реализующая комбинированный способ обхвата [111, 112]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Связь функционирования выполнена в виде тросовой передачи $r_0 r_1 r_2 r_3$. В ее состав введена пружина k_1 , назначение которой выборка зазоров в тросовой передаче. На кинематику движения выходных звеньев она не оказывает.

Дополнительные связи строения выполнены в виде тросовой передачи между стойкой и звеном 2 и между звеном 1 и звеном 3 соответственно $r_1^I r_2^I$, $r_2^{II} r_3^I$. Дополнительные связи функционирования пружин k_2 и k_3 введены в дополнительные связи строения. Особенностью данной конструкции является то, что дополнительные связи строения выполнены в виде замкнутых тросовых передач. Это обеспечивает реализацию двух режимов обхвата: щипкового (с сохранением исходного положения третьего звена) и по контуру после контакта с внешним объектом первого звена.

В University of Cassino (Италия) разработана и исследована исполнительная группа звеньев с тремя выходными звеньями (рисунок 2.15) [75]. Особенностью конструкции является использование линейного актуатора. В работе представлен один из подходов использования группового привода с введением дополнительных связей функционирования между выходными звеньями (рисунок 2.15, б). Дополнительная связь функционирования S_1 введена между проксимальным m_1 и медиальным звеном m_2 , S_2 между медиальным m_2 и дистальным m_3 . Это обеспечивает реализацию обхвата по контуру всеми тремя звеньями. Конструктивное исполнение отображено на рисунке 2.15.

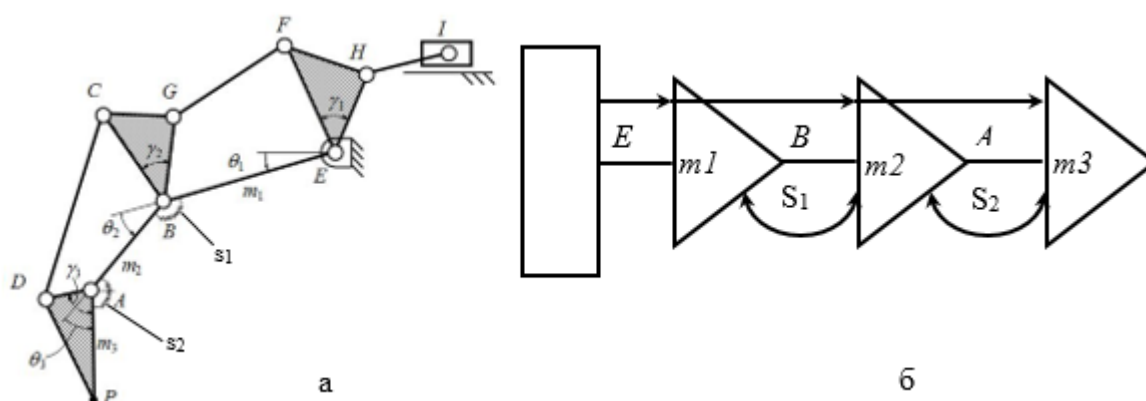


Рисунок 2.15 – Исполнительная группа звеньев, разработанная в University of Cassino [75]: а - структурная схема; б - функциональная схема

В работе исследователей из Mechanical Engineering Department, Ecole Polytechnique of Montreal (Канада) специфика построения и функционирования исполнительной группы с тремя выходными звеньями и групповым (underactuated) приводом используется для определения контура внешнего объекта (рисунок 2.16) [113]. На основе непрерывного анализа изменения крутящего момента на ведущем звене DE , рычажной системы передачи движения и показанию энкодера, установленного на двигателе, определялись последовательно углы поворота всех выходных звеньев. Экспериментальные исследования антропоморфного захвата и численное моделирование подтвердили возможность определения конфигурации неподвижного объекта.

Особенностью разработанной конструкции является использование связи функционирования, выполненной в виде рычажного механизма *DEL*, не образующего кинематических пар с проксимальным и медиальными выходными звеньями. Это позволило исключить влияние сопротивления движению в кинематических парах *A*, *B*, *C* и более точно отображать изменение крутящего момента на ведущем звене. Дополнительные связи функционирования в виде пружин *b* и *c* введены соответственно между выходными звеньями 1-2 и 2-3.

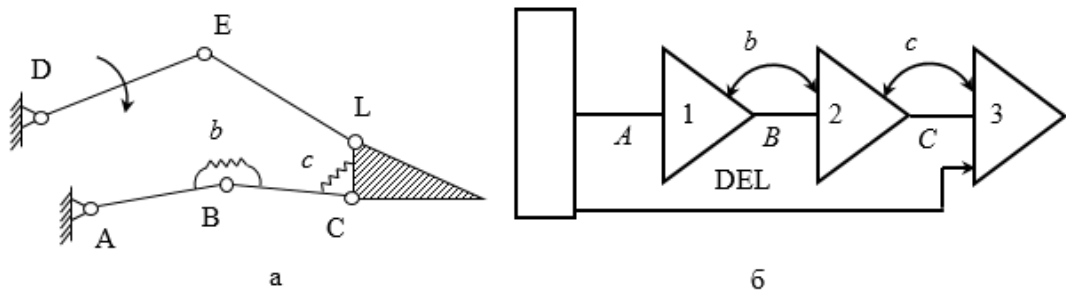


Рисунок 2.16 - Исполнительная группа с тремя выходными звеньями и внешним расположением связи функционирования [113]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Исследование взаимодействия выходных звеньев с внешним объектом при реализации полного замыкания выполнено в Kyushu Institute of Technology Sensuicho (Япония) [65]. Для обеспечения наиболее рационального распределения усилия между выходными звеньями была использована рычажная система передачи движения, образующая несколько замкнутых контуров (по определению авторов «клеток») (рисунок 2.17).

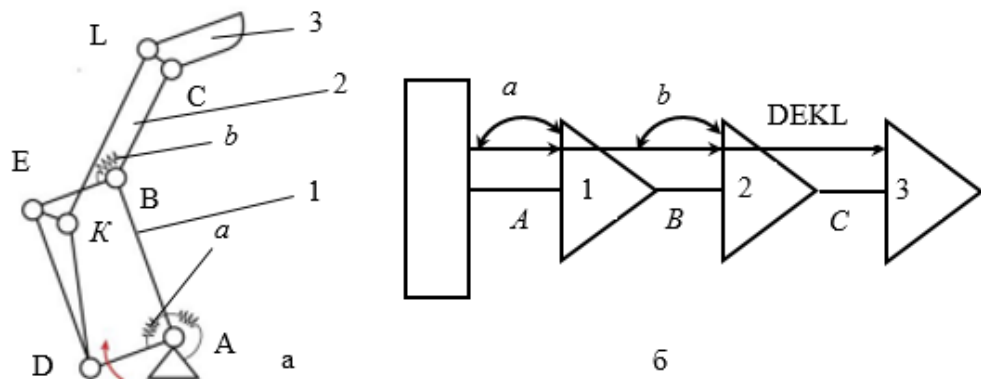


Рисунок 2.17 - Исполнительная группа звеньев, разработанная в Kyushu Institute of Technology Sensuicho [65]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Реализация группового привода при наличии одного двигателя и ведущего звена AD обеспечивается за счет двух дополнительных связей функционирования – пружин a и b .

В Weihang University (Китай) исследовался импедансный способ управления исполнительной группой с двумя выходными звеньями и дополнительной связью функционирования, установленной между звеньями системы передачи движения L_1 и L_2 (рисунок 2.18) [85].

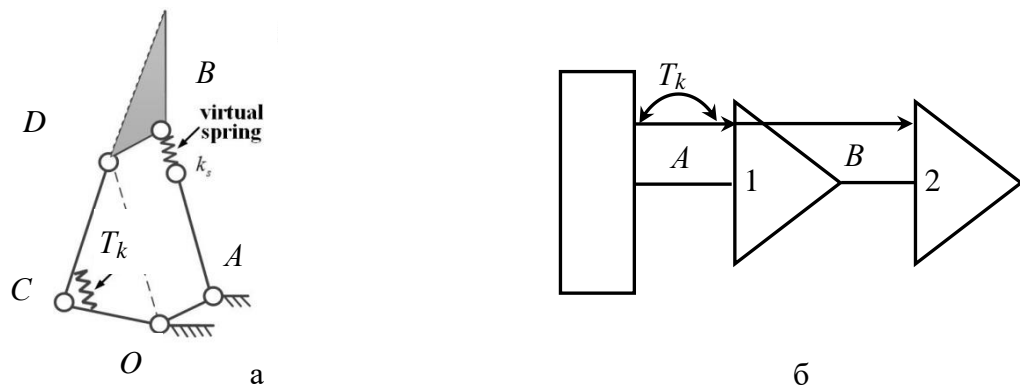


Рисунок 2.18 - Исполнительная группа звеньев с дополнительной связью функционирования, введенной в основную связь функционирования [85]: а - структурная схема; б - функциональная схема

Особенностью конструкции является введение дополнительной связи функционирования в основную связь функционирования, реализованную в виде кривошипно - коромыслового механизма $OCDB$. Дополнительная связь функционирования в виде пружины установлена между кривошипом OC и шатуном CD .

Конструкция отличается простотой, однако введение дополнительной связи функционирования в основную связь функционирования определяет специфичные силовые взаимодействия при обхвате объекта.

В антропоморфном захвате робота ASIMO, созданном в компании Honda, использовалась конструкция исполнительной группы звеньев в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 2.19, а [62]. Аналогичный подход был использован при создании захвата робота FEDOR [114]. В конструкцию с тремя выходными звеньями были введены две дополнительные связи строения. Связь функционирования обеспечивает

движение непосредственно проксимального звена 7. Движение звена 8 обусловлено движением звена 7. Аналогично движение 9 реализуется за счет движения 8.

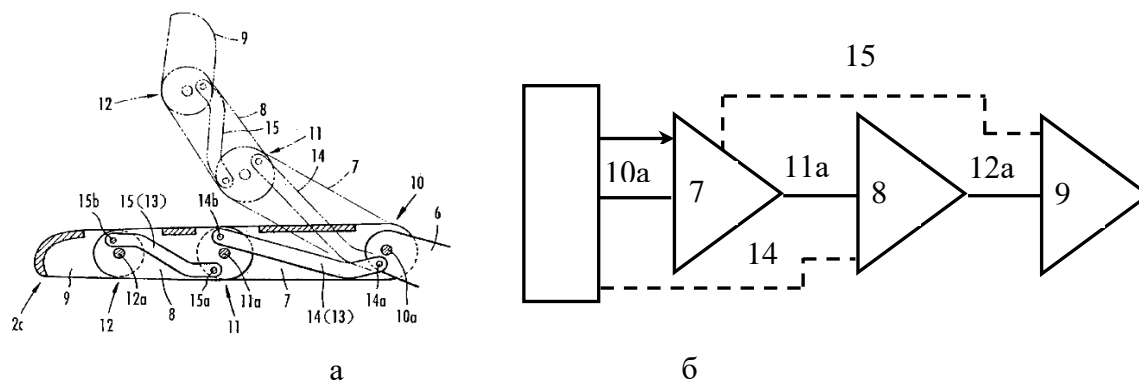


Рисунок 2.19 – Исполнительная группа антропоморфного захвата робота ASIMO [62]: а- структурная схема; б - функциональная схема

Компактная конструкция системы передачи движения обеспечивает одновременное движение всех трех выходных звеньев. Их пространственное положение определяется одной обобщенной координатой - углом относительного поворота проксимального звена. Реализуется обхват тремя звеньями только для одного типа - размера внешнего объекта. При иных его размерах происходит контакт только одного из выходных звеньев, что исключает обхват по контуру и/или щипковый.

2.3 Идентификация реализуемого обхвата объекта на основе анализа функциональной схемы

Идентификация реализуемого способа обхвата устанавливается по наличию признаков, присущих функциональной схеме [129]. При этом не требует рассмотрения специфика конструкторских решений, отраженных на структурной схеме.

В таблице 2.1 представлены результаты анализа функциональных схем по наличию дополнительных связей строения и функционирования и реализуемому способу обхвата.

Таблица 2.1 – Варианты обхвата в зависимости от введенных дополнительных связей

Число выходных звеньев	Признак		Пример	Реализуемый вариант обхвата
	Дополнительная связь строения (место введения)	Дополнительная связь функционирования (место введения)		
n = 2	$b^I (1 - 2)$	$d (0 - b^I)$	Рисунок 2.5 [102]	Комбинированный
	$r_{p1}, r_{p2} (0 - 2)$	в связи строения r_{p1}, r_{p2}	Рисунок 2.13 [110]	Комбинированный
	-	$k_{p2} (1-2)$	Рисунок 2.12 [110]	По контуру
	-	T_k (в связь функционирования)	Рисунок 2.18 [85]	По контуру
n = 3	DEB (0 – I)	b (DEB – связь функционирования), a (I – связь функционирования)	Рисунок 2.8 [32]	Комбинированный
	$O_1C_1 (0-2)$ $O_2C_2 (1-3)$	$1^{st} (0 - O_1C_1)$ $2^{nd} (1 - O_2C_2)$	Рисунок 2.10 [108]	Комбинированный
	FGIH (1 – 3)	CABDE	Рисунок 2.11 [109]	По контуру для двух звеньев
		a (DEKL – I) b (DEKL – II)	Рисунок 2.17 [65]	По контуру
		S1 (m1 – m2) S2 (m2 – m3)	Рисунок 2.15 [75]	По контуру
		b (1 – 2), c (2 – 3)	Рисунок 2.16 [113]	По контуру
	$r_1^I, r_1^I (0 - 2)$ $r_2^II, r_3^I (1 - 3)$	k_2 (дополнительная связь строения звеньев 0 - 2) k_3 (дополнительная связь строения звеньев 1 - 3)	Рисунок 2.14 [65, 85]	Комбинированный

Анализ исполнительных групп звеньев с групповым приводом, выполненный по функциональным схемам, показал, что для обхвата по контуру следует ввести дополнительные связи функционирования: одну при двух выходных звеньях, две при трех выходных звеньях (таблица 2.2).

При этом дополнительная связь функционирования может быть введена между выходными звеньями, между выходным звеном и звеном связи функционирования, между звеньями связи функционирования. Рациональное место введения дополнительной связи функционирования требует проведения

дополнительного исследования по условию силового взаимодействия выходных звеньев с внешним объектом [65].

Таблица 2.2 – Идентификация способов обхвата по введенным дополнительным связям

Число выходных звеньев	Дополнительные связи строения	Дополнительные связи функционирования	Способ обхвата
n =2	-	1	По контуру
	1	1	Комбинированный
n =3	2	-	Щипковый (кинематически зависимые движения)
	1	1	По контуру последовательно для двух звеньев
	-	2	По контуру
	2	2	Комбинированный

Реализация адаптивного управления движением выходных звеньев на этапе обхвата обеспечивается за счет введения дополнительных связей функционирования. При этом осуществляется последовательное изменение объектов управления от проксимального выходного звена к дистальному [69]. Данное свойство группового привода с изменяемой структурной схемой характерно для всех решений, в которых вводятся дополнительные связи функционирования.

В литературных источниках отсутствует информация о критериях, позволяющих обосновать место введения дополнительных связей функционирования, метода оценки влияния жесткости используемых пружин на взаимодействие с внешним объектом. При этом решение данных вопросов является необходимым условием обоснованного построения исполнительной группы звеньев с изменяемой структурой. Существующие подходы базируются на моделировании с использованием симуляторов [69, 115], гибридного алгоритма нечеткой логики и адаптивной нейро-нечеткой системы [116], экспериментальных исследованиях [117], численном моделировании [118]. Отсутствие методов аналитического анализа влияния ограничивает

возможности обоснованного выбора параметров дополнительных связей функционирования. Кроме того, вариант введения, использованный в разработке конструкции захвата в рамках проекта «Теледроид - НА» [119], является принципиально новым и отражает предлагаемый в работе подход к построению группового привода с адаптивным управлением [120 - 122].

Анализ данной совокупности проблем выполняется в главе 4.

2.4 Выводы по главе 2

Метод анализа на основе функциональных схем разработан для исследования механизмов с изменяемой структурной схемой. Определены правила отображения вводимых в механизмы дополнительных структурных и силовых элементов. Формируемая модель описания в виде функциональной схемы сложной системы обеспечивает представление процессов силового и кинематического взаимодействия.

Установлено, что механизмы с изменяемой структурной схемой представляют собой системы, состоящие из двух подсистем: выходных звеньев и передачи движения. При этом введение дополнительных связей функционирования может выполняться между звеньями, относящимися к одной подсистеме или смежными.

Определена зависимость реализуемого способа обхвата объекта от вводимых связей строения и функционирования. Установлено следующее:

- дополнительные связи строения вводятся только между несмежными выходными звеньями (для второго звена таковым является основание);
- обхват по контуру выполняется при введении дополнительных связей функционирования: одной - в исполнительную группу с двумя выходными звеньями, двух – в исполнительную группу с тремя выходными звеньями;
- комбинированный вариант обхвата реализуется в исполнительной группе: с двумя выходными звеньями – введением по одной дополнительной связи функционирования и строения, с тремя выходными звеньями – по две дополнительные связи функционирования и строения;

Дополненный метод анализа применительно к исполнительным системам с групповым приводом позволяет идентифицировать способ обхвата объектов независимо от использованных механизмов передачи движения.

Установленные зависимости способа обхвата от вводимых дополнительных связей могут быть использованы на этапе разработки конструкций исполнительных групп звеньев.

ГЛАВА 3 СТРУКТУРНО – ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АНТРОПОМОРФНОГО ЗАХВАТА С ГРУППОВЫМ ПРИВОДОМ

3.1 Формирование критериев и синтез структурной схемы антропоморфного захвата

3.1.1 Схема построения антропоморфного захвата и последовательность выполнения структурного синтеза

Антропоморфный захват является сложной технической системой, включающей две и более однотипные структурные единицы с общим числом выходных звеньев – объектов управления до 20 [123].

При разработке антропоморфного захвата структурный и параметрический синтез выполняется отдельно. Это обусловлено разным типом проектируемых параметров, методиками поиска их оптимального значения, математическими моделями, используемыми для их описания. Сложность структурного синтеза заключается в отсутствии методов формализации. При этом структурная схема является многоуровневой, а переход от одного уровня к другому не может быть представлен классическим иерархическим строением, при котором проектируемый параметр верхнего уровня является системой на нижестоящем [124, 125].

Антропоморфный захват может быть представлен тремя базовыми модулями: исполнительным, управляющим, регистрации параметров внешней среды [126]. В пределах каждого модуля задача структурного синтеза решается отдельно. Особенностью синтеза антропоморфного захвата является изначально определенный набор вариантов схемных решений. В связи с этим задачей структурного синтеза является оценка возможных вариантов по сформированному критерию.

На рисунке 3.1 представлена схема построения и взаимодействия базовых модулей антропоморфного захвата. Одновременно с этим схема отражает и последовательность проектирования (от уровня *a* к *d*).

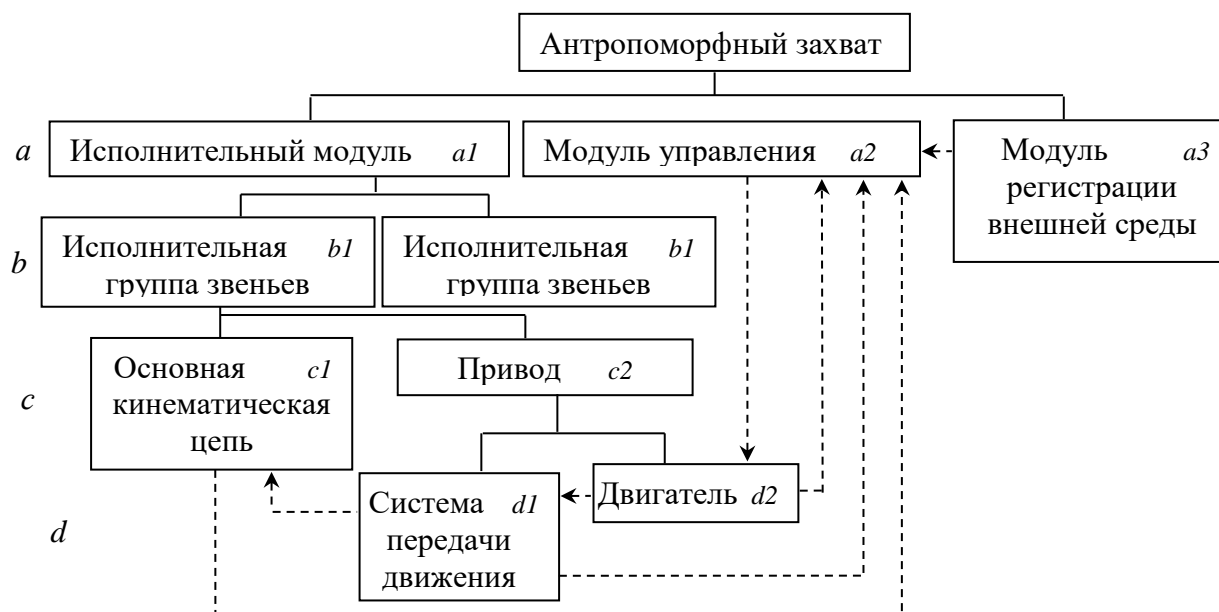


Рисунок 3.1 – Схема построения и взаимодействия частей антропоморфного захвата

Каждый модуль является сложной системой, построенной по иерархическому принципу. Исполнительный модуль определяет функциональные свойства антропоморфного захвата, модуль управления эти свойства обеспечивает. При работе захвата исполнительный модуль является подчиненным модулю управления. Однако на этапе структурного синтеза сформированный исполнительный модуль определяет требования к модулю управления. Аналогично структура модуля регистрации внешней среды формируется по требованиям, определяемым исполнительным модулем и модулем управления.

Модуль регистрации внешней среды обеспечивает информационное сопровождение процесса взаимодействия звеньев исполнительного модуля с объектом и одновременно регистрацию параметров объекта. Первая компонента является частью модуля управления, но при синтезе структур ее следует рассматривать как отдельную составляющую.

Исходными данными для выполнения структурного синтеза антропоморфного захвата являются требования технического задания, определяющие возможные размеры объекта и среду функционирования. Синтез антропоморфного захвата следует вести, начиная с исполнительного

модуля от уровня $a1$ до уровня $d1$, и по их завершении выполняется синтез структуры модуля управления и модуля регистрации внешней среды.

На уровне $a1$ формируется структурная схема, построенная с использованием двух и более исполнительных групп звеньев. При этом особенности их построения не учитываются.

На уровне $b1$ определяется структура исполнительной группы звеньев. В общем случае исполнительные группы звеньев могут иметь разные структурные схемы. Однако в настоящее время все реализованные антропоморфные захваты имеют однотипные исполнительные группы звеньев и нет достаточных предпосылок изменять данное положение.

На уровне $c2$ определяется часть структурной схемы, формируемая выходными звеньями, и параллельно выполняется синтез приводов, обеспечивающих движение выходных звеньев. Привод состоит из двигателя с редуктором или без него и системы передачи движения. Система передачи движения используется для силовой взаимосвязи i двигателя и i выходного звена при наличии между ними $i - 1$ выходных звеньев.

Необходимость скоординированного синтеза структур основной кинематической цепи и системы передачи движения определяется ограничениями, накладываемыми проектируемыми параметрами системы передачи движения на реализуемость структуры основной кинематической цепи.

3.1.2 Принципы формирования критерия оптимальности структурных схем

3.1.2.1 Обоснование критерия для оценки структурных схем

Структурный синтез следует выполнять, основываясь на соблюдении следующих положений [126]:

1. Последовательный, поуровневый синтез структурных схем: исполнительного модуля, исполнительной группы, основной кинематической цепи, системы передачи движения.

2. Для каждого z уровня формируется собственный критерий оптимальности Y_z , определяющий «качество выполнения» обхвата и удержание недетерминированного внешнего объекта.

3. Формализация Y_z критериев оптимальности основывается на общем подходе - как отношение показателя качества K_z к параметрам структурой схемы x_{ij} его формирующим. Это отражает удельное соотношение получаемой «выгоды» к «затратам» ее формирующих:

$$Y_z = K_z / f(x_{ij}). \quad (3.1)$$

В пределах каждого уровня выявляются проектируемые параметры, определяющие структурную схему данного уровня - x_{ij} и показатель K_z . Вид функциональной зависимости $f(x_{ij})$, связывающий проектируемые параметры x_{ij} , определяется индивидуально для каждого уровня.

3.1.2.2 Синтез структуры исполнительного модуля

Структурные схемы исполнительных модулей, реализованные в известных конструкциях антропоморфных захватов [127, 128], приняты без использования какого-либо критерия или сравнительной оценки. Предпочтение отдавалось схемам с пятью исполнительными группами звеньев и максимально приближенным к структурной схеме кисти человека. Очевидно, что полное подобие структурной схеме кисти можно использовать при наличии подобного же по характеристикам привода. При его отсутствии следует выбирать структурную схему, основываясь на правилах предпочтения.

Выходными (проектируемыми) параметрами, идентифицирующими исполнительный модуль, являются: число исполнительных групп звеньев, число и вид кинематических пар для их соединения с основанием.

Исходя из сформированных принципов, показателем качества является площадь поверхности, в пределах которой может находиться внешний объект в исходном положении исполнительной группы звеньев. Ее увеличение «положительным образом» определяет возможности антропоморфного

захвата. Критерием оптимальности является величина «относительного обхвата» Y_1 :

$$Y_1 = K_1 / (N * R), \quad (3.2)$$

где K_1 – площадь поверхности, очерченная прямыми, проведенными по концам исполнительной группы звеньев в исходном положении;

N – число группы звеньев, входящих в исполнительный модуль;

R – число степеней подвижности, образованных исполнительными группами звеньев и основанием.

На данном уровне не учитывается структурная схема самой исполнительной группы звеньев и предполагается, что каждая из них обеспечивает равные возможности. Функциональная зависимость $f(x_{ij})$, связывающая проектируемые параметры, принята в виде произведения N на R . Это обусловлено тем, что имеет место мультипликативное увеличение «затрат» - числа кинематических пар в зависимости от числа исполнительных групп звеньев.

Для равнозначной оценки вариантов структурных схем следует соблюдать правило постоянства условий, равное линейному расстоянию u между дистальными кинематическими парами, образованными исполнительными группами звеньев и основанием (рисунок 3.2).

На рисунке 3.2 представлены варианты построения структурных схем, а в таблице 3.1 значения критерия оптимальности Y_1 . В варианте *a* используются две исполнительные группы звеньев. Площадь K_1 , как таковая, не формируется. В связи с этим определяется «условная площадь». Для ее расчета используется ширина выходного звена b . В наиболее успешной конструкции антропоморфного захвата с двумя исполнительными группами RobotiQ она составляет $0,2u$ [128]. Следует отметить принципиальную разницу с остальными вариантами структурных схем – при взаимодействии с внешним объектом, имеющим выпуклую поверхность (шар, цилиндр), не

обеспечивается надежное удержание без создания избыточного силового воздействия.

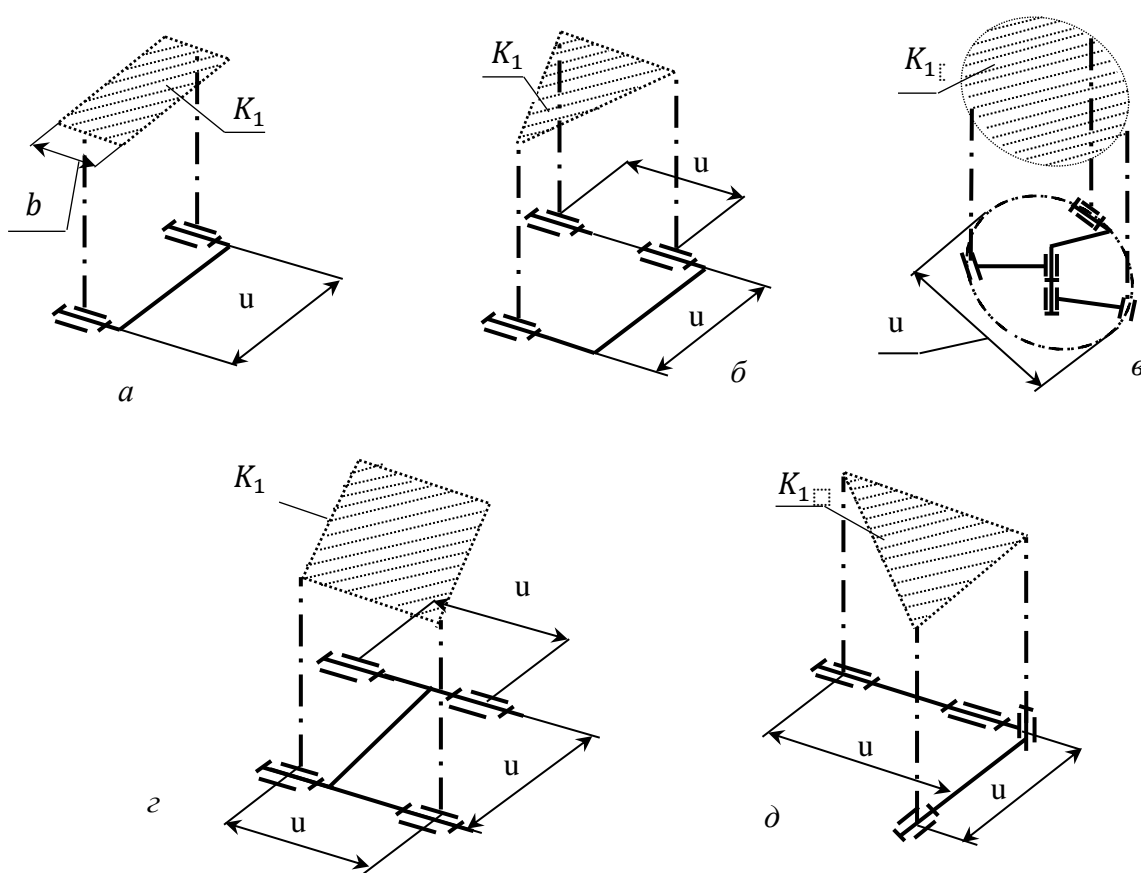


Рисунок 3.2 – Варианты построения структурных схем исполнительного модуля

Таблица 3.1 - Значения критерия оптимальности для вариантов исполнительного модуля

Вариант	Число исполнительных систем N	Число степеней подвижности образованных исполнительными группами звеньев и основанием R	K_1	Y_1
<i>a</i>	2	2	$b * u$	$0,05 u^2$
<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	$0,5 u^2$	$0,042 u^2$

В соответствии с принятым критерием оптимальности K_1 , наиболее предпочтительным является схема по варианту рисунка 3.2, *г* (защищена

патентом на полезную модель [121]), далее по приоритетности следует схема, соответствующая варианту рисунка 3.2, б.

3.1.2.3 Синтез структуры исполнительной группы звеньев

Каждое выходное звено исполнительной группы имеет одну точку взаимодействия с объектом. Увеличение числа точек контакта обеспечивает распределение силового воздействия по поверхности объекта и повышает надежность его удержания. Исходя из этого и соблюдая предложенные показатели качества на данном этапе, принимаем за K_2 – число выходных звеньев, совпадающее с числом контактов исполнительной группы с объектом. Отражением «затрат» $f(x_{2j})$ выступают параметры структурной схемы, определяющие подвижность звеньев. Такими параметрами являются число двигателей t и число независимо изменяющихся при обхвате обобщенных координат, то есть углов относительного поворота r . В структурной схеме может быть реализовано равенство параметров $t = r$ или соблюдение одного из соотношений: $t > r$, $t < r$.

В первом случае имеет место исполнительная группа с индивидуальным приводом для каждого выходного звена. При реализации первого неравенства число двигателей превышает число выходных звеньев. Такие решения известны в других областях техники, но в конструкциях антропоморфных захватов не используются. В связи с этим в дальнейшем такое сочетание параметров не рассматривается.

Конструкции, в которых один двигатель обеспечивает движение нескольких звеньев, применяются достаточно часто. При этом может иметь место кинематически зависимые движения выходных звеньев, допускающие независимые движения звеньев. В последнем случае реализуется исполнительная группа звеньев с изменяемой структурной схемой [114].

Критерий оптимальности, характеризующий структурную схему исполнительной группы звеньев, имеет вид

$$Y_2 = K_2 / (t/r) . \quad (3.3)$$

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

В таблице 3.2 представлены значения критерия Y_2 в зависимости от сочетания переменных параметров и соответствующий ему тип структурной схемы исполнительской группы звеньев. Для двухзвенной исполнительской группы наиболее оптимальным является использование одного двигателя, обеспечивающего движение звеньев – вариант III. Для исполнительской группы с тремя выходными звеньями предпочтителен вариант с одним двигателем и возможностью независимого изменения трех обобщенных координат – VII. Численное значение критерия Y_2 является абсолютной оценкой, характеризующей сочетание проектируемых параметров.

Одновременное независимое изменение обобщенных координат от одного двигателя неосуществимо. Анализ движения пальцев руки человека [114] показал, что при обхвате имеет место последовательное движение фаланг, начиная с проксимальной. При реализации такого режима обхвата в каждый момент времени изменяется только одна обобщенная координата, что при групповом приводе от одного двигателя реализуемо.

Таблица 3.2 - Варианты сочетания проектируемых параметров и значения критерия оптимальности

Число выходных звеньев K_2	Переменные параметры		Критерий оптимальности Y_2	Вариант сочетания параметров	Тип структурной схемы исполнительской группы звеньев
	t	r			
2	1	1	2	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, зависимая для дистального звена
		3	9	VI	Изменяемая структура
	2	2	3	VII	Индивидуальный привод двух звеньев, зависимый для дистального звена
		3	4,5	VIII	Индивидуальный привод одного звена + изменяемая структура для двух звеньев
	3	3	3	IX	Индивидуальным приводом

Сочетание проектируемых параметров позволяет идентифицировать тип структурной схемы исполнительской группы: с индивидуальным для каждого звена, с кинематически зависимым движением звеньев с изменяемой структурой, комбинированный. Последний тип, в свою очередь, имеет разновидности: с изменяемой структурой для двух звеньев – проксимального и медиального; зависимого для дистального – VI; индивидуальными двигателями для проксимального и медиального; зависимый для дистального – VIII; индивидуальный для проксимального и переменной структурой для медиального и дистального – IX. Данная информация является исходным материалом для синтеза структурной схемы привода.

В дальнейшем будем рассматривать структурные схемы исполнительской группы звеньев, для которой критерий оптимальности имеет наибольшее значение: II, V, VI. При этом методика может быть использована для любого иного типа структурной схемы исполнительской группы.

3.1.2.4 Синтез основной кинематической цепи

Структурная схема основной кинематической цепи определяется только одним параметром - числом выходных звеньев. Критерий оптимальности в явной форме отсутствует. Выходные звенья соединятся между собой через вращательные пары пятого класса с параллельными осями вращения. Предпочтительно иметь максимальное число выходных звеньев. Реализованные на практике основные кинематические цепи имеют до трех выходных звеньев. В качестве нестандартного варианта можно отметить захват, предназначенный для взаимодействия с космическими объектами («мусором»), разработанный в University of Michigan (США), имеющий по десять выходных звеньев в каждой из двух исполнительских групп [123].

3.1.2.5 Определение типа структурной схемы привода

По существу, структурная схема привода является следствием принятого типа структурной схемы исполнительской группы. При этом одновременно формируется компоновочная схема, определяющая положение

двигателя относительно приводимого в движение звена: на самом звене, на предшествующем звене, на основании.

При выборе критерия оптимальности учитывается, что структурная схема привода характеризуется габаритами, массой, ее распределением по выходным звеньям основной кинематической цепи. 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 , то есть $K_3 = r$.

Совпадение K_3 с проектируемым параметром предыдущего уровня является нормальной ситуацией при иерархической схеме проектирования. Переменный (проектируемый) параметр вышестоящего уровня становится системой на последующем.

Проектируемыми параметрами являются: вариант размещения двигателя на выходном звене, число систем передачи движения. Учитывается консольная схема нагружения исполнительной группы. Параметр, определяющий расположение двигателя, выражается через коэффициент «утяжеления» k_i . Коэффициент принимает значения при размещении двигателя на основании – 1, проксимальном звене - 2, медиальном - 3, дистальном - 4. На одном выходном звене может располагаться несколько двигателей $t = 1, 2, 3$.

Вторым параметром - l_j , характеризующим привод, является наличие системы передачи движения и ее положение. При расположении звеньев системы передачи движения проксимальном звене $l_j = 1$, на медиальном звене $l_j = 2$.

Критерий оптимальности - показатель массы структурной схемы привода имеет вид отношения

$$Y_3 = K_3 / f(x_{3j}), \quad (3.4)$$

$$f(x_{3j}) = (\sum_{i=1}^t k_i + \sum_{j=1}^2 (e_j l_j)), \quad (3.5)$$

e_j - число звеньев системы передачи движения на j звене, 1 - на проксимальном; 2 - на медиальном.

В таблице 3.3 представлены значения параметров, определяющие структурную схему привода, и критерии оптимальности для предпочтительных типов структурных схем исполнительных систем.

Таблица 3.3 Варианты сочетания проектируемых параметров и критерии оптимальности

Тип схемы привода	$K_3 = r$	t	k_i	e_1	e_2	l_1	l_2	Y_3
II	2	1	1	1	-	1	-	1
V	2	1	1	1	1	1	2	0,5
VI	3	1	1	1	1	2	2	0,75

В соответствии с критерием оптимальности структурные схемы приводов по типам II и VI имеют равный приоритет. Следует отметить, что оба типа имеют изменяющуюся при обхвате структурную схему.

Синтез по критерию оптимальности Y_3 показал, что, несмотря на размещение системы передачи движения на двух звеньях, размещение двигателя на основании захвата является предпочтительным. В совокупности с тем, что число независимо изменяющихся при обхвате углов относительного поворота в схеме VI больше чем в схеме II этот тип является наилучшим.

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, соединенных между собой и основанием параллельными вращательными парами, движение обеспечивается через групповой привод. Выбор оптимальной системы передачи движения следует выполнить после анализа возможных вариантов ее построения.

3.2 Синтез структурной схемы исполнительской группы звеньев с групповым приводом

3.2.1 Определение кинематических параметров исполнительской группы звеньев с групповым приводом

Исполнительские группы звеньев включают две основные подсистемы. Первая подсистема - основная кинематическая цепь, образованная выходными звеньями. Ее построение основывается на условии подобия пальцам руки человека. Вторая подсистема представляет собой систему передачи движения - связь функционирования. Кроме того, в исполнительную группу звеньев вводятся дополнительные связи функционирования, собственно и определяющие работу как систему с изменяемой структурной схемой [114, 119].

Система передачи движения должна обеспечить требуемые углы относительного поворота выходных звеньев, достаточные для обхвата объекта, и рациональное силовое взаимодействие. С увеличением суммарного угла относительного поворота выходных звеньев усложняется система передачи движения. При этом исполнительная группа звеньев должна обеспечить кинематику, свойственную пальцам руки человека. В связи с этим следует формализовать требования к ее кинематическим параметрам: углам, определяющим исходное положение выходных звеньев, целесообразным значениям углов относительного поворота.

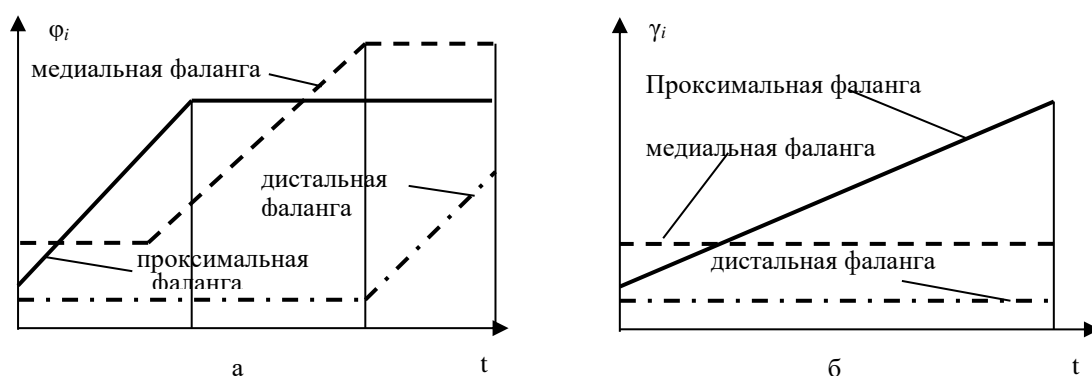


Рисунок 3.3 - Циклограмма движения фаланг: а - при обхвате по контуру внешнего объекта минимального диаметра ($d = 20$ мм); б - при щипковом обхвате

Для определения требований к кинематике исполнительных групп звеньев был выполнен анализ относительного движения фаланг при осуществлении двух вариантов обхвата указательным и средним пальцем: по контуру и щипкового (рисунок 3.3) [114]. Анализ выполнялся по результатам регистрации относительного угла поворота фаланг указательного и среднего пальцев мужчин 20 - 25 лет с 9 - м размером кисти в группе из пяти человек.

Исследования проводились при обхвате цилиндрических объектов диаметром 60, 40, 20, 10 мм. Было установлено, что при естественном, не контролируемом сознательно выполнении обхвата по контуру соблюдается четкая последовательность движения фаланг (рисунок 3.3, а).

У части исследуемых имело место частичное совмещение движения проксимальной и медиальной фаланг при обхвате цилиндров диаметром 10 и 20 мм. Усредненные численные значения исходных и предельных углов относительного поворота представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 Исходное и предельное относительное положение фаланг

Фаланга	Углы, определяющие положение фаланг		Длины фаланг, мм
	Характерный начальный угол φ_{0i}	Предельный угол относительного поворота q_i	
Проксимальная	$15^{\circ} - 35^{\circ}$	$90^{\circ} - 100^{\circ}$	48 - 52
Медиальная	$10^{\circ} - 45^{\circ}$	$100^{\circ} - 135^{\circ}$	28 - 32
Дистальная	$5^{\circ} - 20^{\circ}$	$45^{\circ} - 75^{\circ}$	24 - 28

Интервал значений углов обусловлен преимущественно несовпадающим значением между фалангами указательного и среднего пальцев и индивидуальными особенностями обследованных. Выполнение щипкового обхвата осуществляется при контролируемом движении фаланг и обеспечивается только за счет движения проксимальной фаланги (рисунок 3.3, б).

Максимальный раствор по концам дистальных фаланг при оппозитном положении большого пальца составляет 180 – 210 мм. Однако при таком расположении не обеспечивается надежное удержание внешнего объекта. Это

действие реализуется при параллельном положении дистальных фаланг, что соответствует расстоянию между их поверхностями 115 – 130 мм.

Анализ движений фаланг и углов относительного поворота при обхвате объектов с различным диаметром позволил определить основные особенности функционирования пальца:

- обхват осуществляется при преимущественном изменении только одной обобщенной координаты;
- соблюдается безусловная последовательность движения фаланг от проксимальной к дистальной;
- изменение обобщенной координаты каждой фаланги осуществляется до достижения ею поверхности объекта или предельного значения;
- минимальный угол относительно поворота имеет дистальная фаланга и составляет 55° ;
- в исходном положении углы относительно поворота составляют: проксимального - 30° , медиального - 40° , дистального - 20° ;
- при выведении большого пальца оппозиционно указательному расстояние между суставами, «формирующими» опорную поверхность, составляет 50 – 70 мм.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие технические требования на разработку исполнительной группы звеньев в составе антропоморфного захвата:

- построение исполнительной группы звеньев следует выполнять с использованием группового привода с изменяемой структурной схемой как соответствующего в полной мере особенностям движения фаланг указательного и среднего пальцев руки человека;
- в качестве начального относительно угла между звеньями целесообразно принимать: для проксимального $\gamma_{10} = 30^{\circ}$, для медиального $\gamma_{20} = 40^{\circ}$, для дистального $\gamma_{30} = 20^{\circ}$;
- необходимо обеспечивать углы относительного поворота звеньев: проксимального - 60° ; медиального - 65° ; дистального - 25° .

У человека суставы, соединяющие пальцы с ладонью, находятся в одной плоскости. Кроме того, основание ладони в исходном положении располагается вдоль продольной оси предплечья. Антропоморфный захват, обладающий максимальным значением критерия оптимальности Y_1 (рисунк 3.2, г), имеет оппозитное расположение исполнительных групп звеньев, в отличие от линейного расположения пальцев у человека. Исполнительные группы звеньев размещаются перпендикулярно основанию захвата, а оно в свою очередь, перпендикулярно продольной оси звена манипулятора.

В связи с этим для обеспечения обхвата внешнего объекта диаметром до $R = 120$ мм необходимо расстояние между парами A^I и A^{II} принять равным 60 мм (рисунк 3.4), а угол между плоскостью основания и продольной осью в исходном положении звена $\gamma_{10}^* = 60^\circ$.

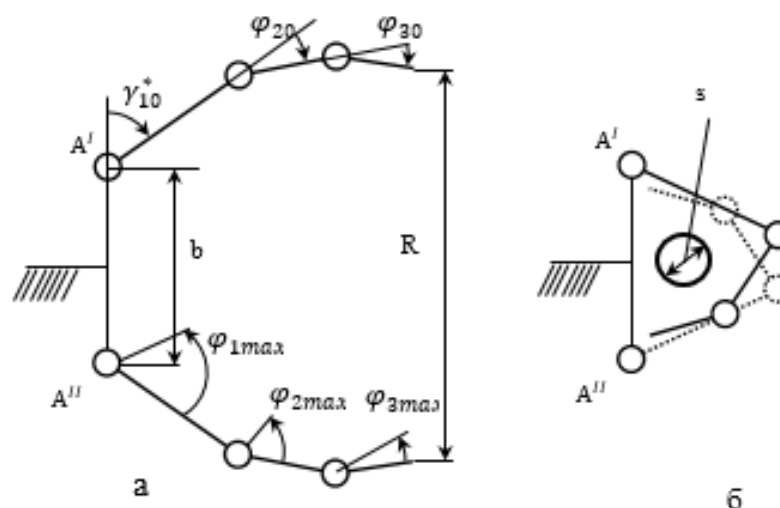


Рисунок 3.4 – Структурная схема антропоморфного захвата с оппозитными исполнительными группами: а - в исходном положении; б - в предельном положении (звенья оппозитной группы показаны штриховой линией, $s = 10$ мм)

Структурная схема антропоморфного захватного модуля с оппозитным расположением исполнительных групп звеньев с отражением начальных и предельных относительных углов поворота звеньев представлена на рисунке 3.4.

Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями, выполненными Dollar A. M. и Howe R. D (Department of Mechanical Engineering

Yale University, США) [130, 131]. По результатам исследований для исполнительной группы, включающей два выходных звена, рекомендованы: начальный угол между проксимальным звеном и основанием (angle with the palm of the hand) - 25° , между проксимальным и дистальным (angle with the proximal link) - 45° . Было показано, что такие значения начальных углов позволяют захватывать внешние объекты с неопределенной изначально формой и широким диапазоном размеров при минимальной вероятности их смещения в захвате.

В работе тех же авторов рекомендуется иметь длины каждого из двух выходных звеньев по 70 мм. Это позволяет обхватывать внешние объекты с размером по дистальным точкам 190 мм.

3.2.2 Синтез структурной связи между подсистемами исполнительной группы: выходных звеньев и звеньев системы передачи движения

Анализ известных решений показал, что отсутствует критерий, позволяющий обоснованно определять место размещения дополнительных связей функционирования – пружин, между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения. Как правило, в основе принятия решений лежит конструктивная целесообразность – компактность узла. Вместе с тем дополнительные связи функционирования являются силовым элементом. В связи с этим критерием, определяющим их положение в общей структурной схеме, должно быть обеспечение наиболее эффективного силового взаимодействия выходных звеньев с объектом.

В соответствии с определением структурные схемы отражают подвижные звенья, виды кинематических пар, их взаимное расположение. Выполнить сравнительный анализ силовых взаимодействий выходных звеньев с внешним объектом по структурным схемам не представляется возможным. Однако структурная схема является производной от функциональной схемы и обеспечивает реализацию процессов, ею

отражаемых. В связи с этим оценку построения исполнительной группы звеньев следует выполнять по схемам более высокого уровня - функциональным. Кроме того, при этом исключается из анализа конструктивная детализация, представляемая на структурной схеме. При этом найденные решения применимы для всех структурных схем, соответствующих данной функциональной.

Силовое взаимодействие выходных звеньев и объекта определяется местом установки дополнительных связей функционирования. Ее эффективность определяется распределением усилий, действующих на внешний объект со стороны выходных звеньев. Их анализ следует выполнять по формированию силовых контуров, в которых замыкание силовой цепи ведется на объекте. Силовой контур отображает связанную (сопряженную) цепочку звеньев от источника возникновения силы (привод, пружина) до элемента, на котором она замыкается. Таким элементом может быть внешний объект, выходное звено, звено связи функционирования.

В исполнительной группе звеньев формируются силовые контуры, создаваемые связью функционирования, и замкнутые непосредственно на внешний объект. Кроме того, могут формироваться параллельные силовые контуры, как результат действия дополнительных связей функционирования.

Силовое воздействие на объект осуществляется через выходное звено. Поэтому присутствие в контуре выходного звена, взаимодействующего с объектом, является положительным фактором. Формируемые силовые контуры различаются на этапах обхвата и удержания.

Анализ известных решений с использованием функциональных схем показал, что в основе всех конструкций лежит использование трех основных вариантов введения двух дополнительных связей функционирования [126], которые следует считать основными (рисунок 3.5, *а*, *б*, *в*). Варианты *а* - *в* имеют повторяющиеся схемы введения дополнительных связей функционирования: *а* – между выходными звеньями, *б* - между звеньями

системы передачи движения, ν – между выходными звеньями и звеньями связи функционирования.

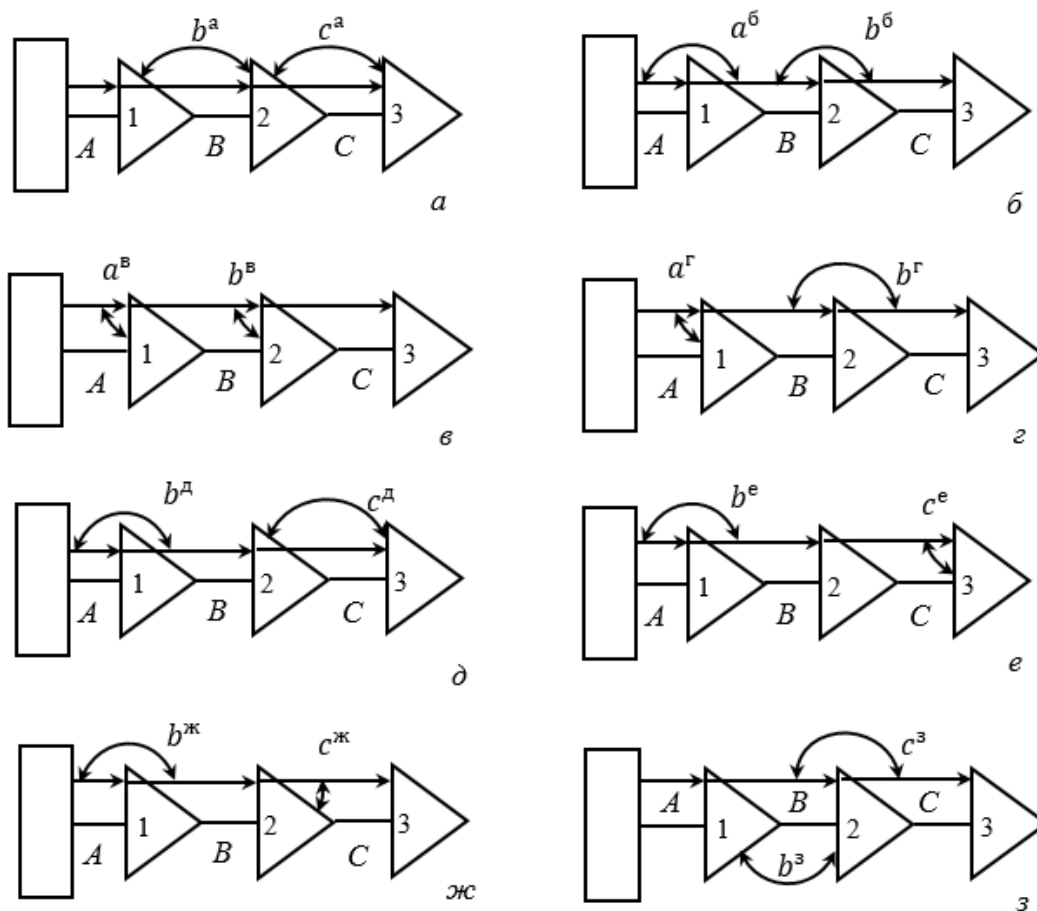


Рисунок 3.5 – Функциональные схемы, отображающие варианты построения исполнительных групп звеньев с дополнительными связями функционирования

Кроме основных вариантов введения дополнительных связей функционирования, могут быть реализованы и комбинированные (рисунок 3.5, z , d , e , $ж$, $з$). Для оценки основных вариантов выполняется анализ силовых контуров, формируемых при обхвате и удержании объекта.

Обхват объекта исполнительной группой с тремя выходными звеньями выполняется в три этапа. На первом выполняется совместное движение выходных звеньев в направлении к объекту. При этом относительное движение между ними отсутствует. Этому препятствуют введенные дополнительные связи функционирования. Формируется силовой контур F_1 включающий связь функционирования и первое выходное звено (рисунок 3.6,

а). Реализуется движение в связи строения А. Первый этап является общим для всех вариантов и завершается после остановки первого выходного звена на внешнем объекте. Последующее движение выходных звеньев по любому из вариантов введения дополнительных связей функционирования сопряжено с их деформацией и созданием силы на внешнем объекте R_{11} . Формируется первый силовой контур: связь функционирования – звено 1 – внешний объект (рисунок 3.6, б).

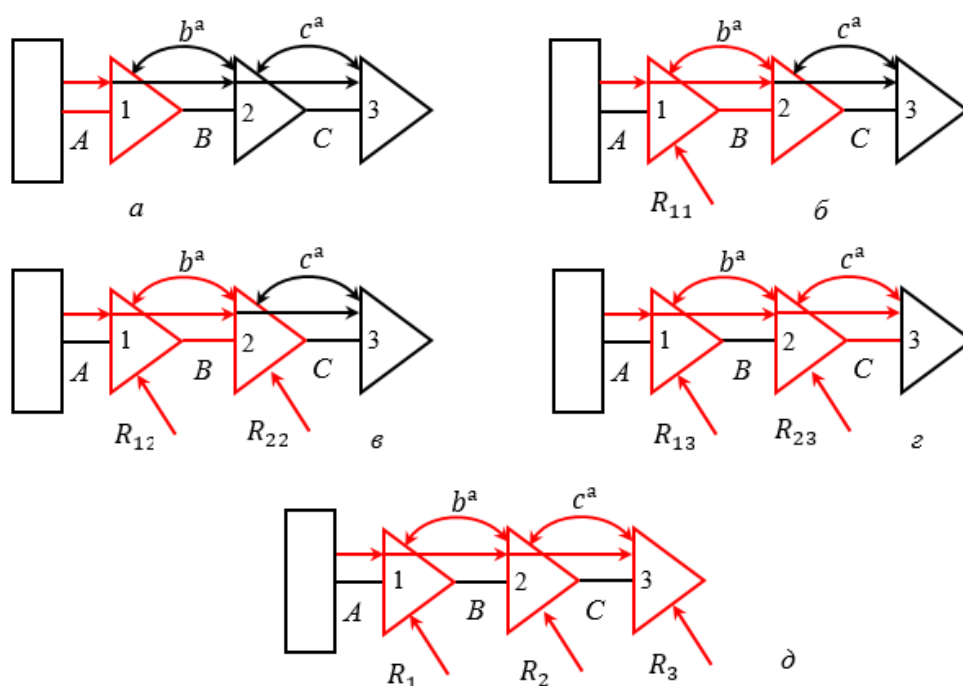


Рисунок 3.6 – Силовые контуры, возникающие на различных этапах обхвата исполнительной группой звеньев с дополнительными связями функционирования, введенными между выходными звеньями: *а* - первый этап; *б* - завершение первого этапа; *в* - второй этап; *г* - завершение второго этапа; *д* - третий этап; *е* - завершение обхвата внешнего объекта (принятые индексные обозначение в силовом контуре: первый индекс совпадает со звеном, создающим силовое действие на объект, второй с кинематической парой, в которой реализуется движение)

На втором этапе реализуется движение в связи строения В. Процессы, протекающие в исполнительных группах, реализующих варианты *а – ж*, являются индивидуальными и определяются расположением дополнительных связей функционирования.

Силовые контуры, формируемые на последующих этапах для варианта с введенными дополнительными связями функционирования между

выходными звеньями (пружины b^a и c^a на рисунке 3.5, *a*), представлены на рисунке 3.6. От привода через связь функционирования движение передается второму звену. Это ведет к изменению угла между ним и первым звеном. Пружина b^a деформируется. Создается замкнутый силовой контур F_{Ba} : связь функционирования - второе звено - пружина b^a - первое звено - связь строения B – второе звено (рисунок 3.6, *б*). Появление силового контура F_{Ba} обусловлено деформацией пружины b^a . Контур F_{Ba} не замыкается на внешнем объекте.

После достижения вторым звеном внешнего объекта и остановки на нем создается второй силовой контур F_2 , в котором через связь функционирования сила передается на второе звено (рисунок 3.6, *в*). На внешнем объекте создается усилие R_{22} . В итоге на втором этапе создаются два силовых контура: F_{Ba} , F_2 . При этом только F_2 замыкается на внешнем объекте.

На третьем этапе (рисунок 3.6, *г*) связь функционирования обеспечивает движение третьего выходного звена (в связи строения C). При этом деформируется дополнительная связь функционирования c^a , что обеспечивает увеличение силы в связи функционирования. Возникает замкнутый силовой контур F_{Ca} , включающий: связь функционирования - третье звено - пружину c^a - второе звено - связь строения C – третье звено.

Этап завершается после остановки третьего звена на внешнем объекте (рисунок 3.6, *д*). При этом формируется силовой контур F_3 : связь функционирования - третье звено - внешний объект. На внешнем объекте создается сила R_3 . В этот момент со стороны первого звена в контуре F_1 на внешний объект действует сила $R_1 > R_{12}$, а со стороны второго звена в контуре F_2 сила $R_2 > R_{23}$.

Таким образом, по завершении обхвата формируется три силовых контура, замыкающихся на внешнем объекте: F_1 , F_2 , F_3 .

Силовые контуры, формируемые в исполнительной группе звеньев, реализующих вариант введения дополнительных связей функционирования

между звеньями системы передачи движения (связи функционирования) (рисунок 3.5, б), отображены на рисунке 3.7. Дополнительная связь функционирования a^b установлена в части, размещенной над первым звеном, b^b - над вторым звеном.

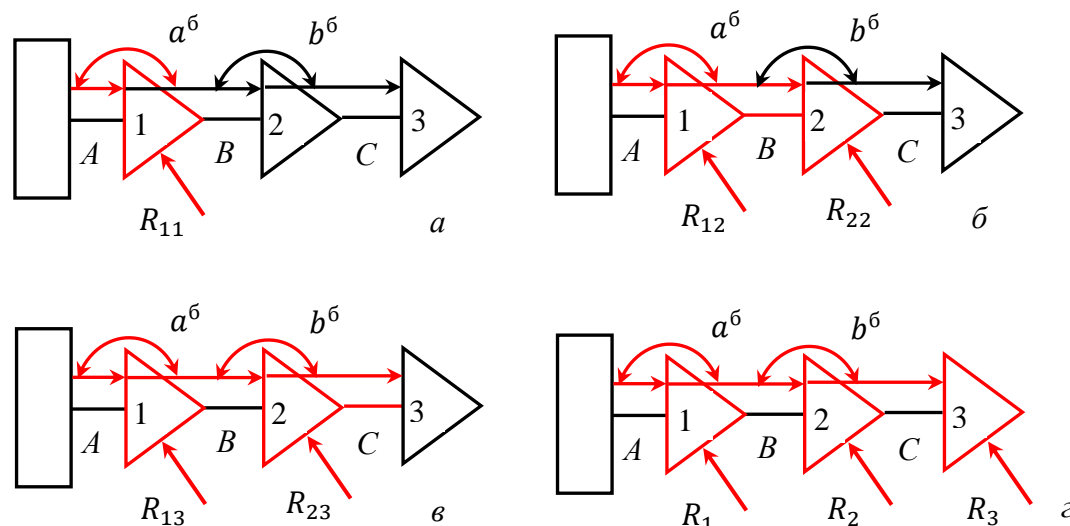


Рисунок 3.7 – Силовые контуры, возникающие на различных этапах обхвата исполнительной группой звеньев с дополнительными связями функционирования, введенными между звеньями связи функционирования: а - завершение первого этапа; б - завершение второго этапа; в - третий этап; г - завершение обхвата внешнего объекта

Аналогично предшествующему варианту, введение дополнительных связей функционирования на первом этапе реализует движение в связи строения А за счет силового контура F_1 , включающего связь функционирования – первое звено. Этап завершается после достижения первым звеном внешнего объекта и созданием силы R_{11} .

На втором этапе (рисунок 3.7, б) через связь функционирования движение передается второму звену. При этом происходит деформация пружины a^b и создаются два силовых контура. Первый контур F_{Ab} включает предшествующее звено связи функционирования, пружину a^b , последующее звено связи функционирования, второе звено.

Деформация пружины a^b по мере увеличения угла поворота второго звена возрастает. Это определяет увеличение силы в связи функционирования

и, как следствие, силы R_{12} , действующей со стороны первого звена на внешний объект в силовом контуре F_1 . При этом R_{12} больше R_{11} . После остановки второго звена на внешнем объекте формируется второй силовой контур F_2 : связь функционирования - второе звено - внешний объект. На последнем создается сила R_{22} (см. рисунок 3.7, б).

На следующем этапе осуществляется передача движения третьему звену (рисунок 3.7, в), что ведет к деформации пружины b^b (пружина a^b деформируется в дополнение к предшествующему состоянию). Формируется силовой контур F_{c6} : звено связи функционирования - пружина b^b - сопряженное звено связи функционирования - третье звено.

После достижения третьим звеном внешнего объекта этап обхвата завершается (рисунок 3.7, г). При этом формируется силовой контур F_3 : связь функционирования - третье звено - внешний объект. На его поверхности создается сила R_3 . Благодаря увеличению усилия в связи функционирования со стороны первого и второго звена создаются соответственно силы, действующие на внешний объект R_1 и R_2 . При этом $R_1 > R_{13}$ и $R_2 > R_{23}$.

В техническом решении, защищенном патентами [120, 122], предложен третий вариант введения дополнительных связей функционирования между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения. Первый этап также завершается остановкой первого звена на внешнем объекте (см. рисунок 3.5, в).

Формируется силовой контур F_1 : связь функционирования – первое звено, и на поверхности внешнего объекта создается сила R_{11} (рисунок 3.8, а). На втором этапе формируется силовой контур F_2 : связь функционирования - второе звено, что обеспечивается движением последнего (рисунок 3.8, б). При этом в результате движения звена связи функционирования относительно первого звена деформируется пружина a^b . Возникает силовой контур F_{AB}^* : звено связи функционирования - пружина a^b - первое звено - объект. На поверхности последнего создается сила R_{12}^* . Деформация пружины a^b

определяет увеличения усилия связи функционирования по сравнению с первым этапом, поэтому сила R_{11} возрастает до величины R_{12} . С увеличением угла относительно поворота второго звена величина силы R_{12} возрастает.

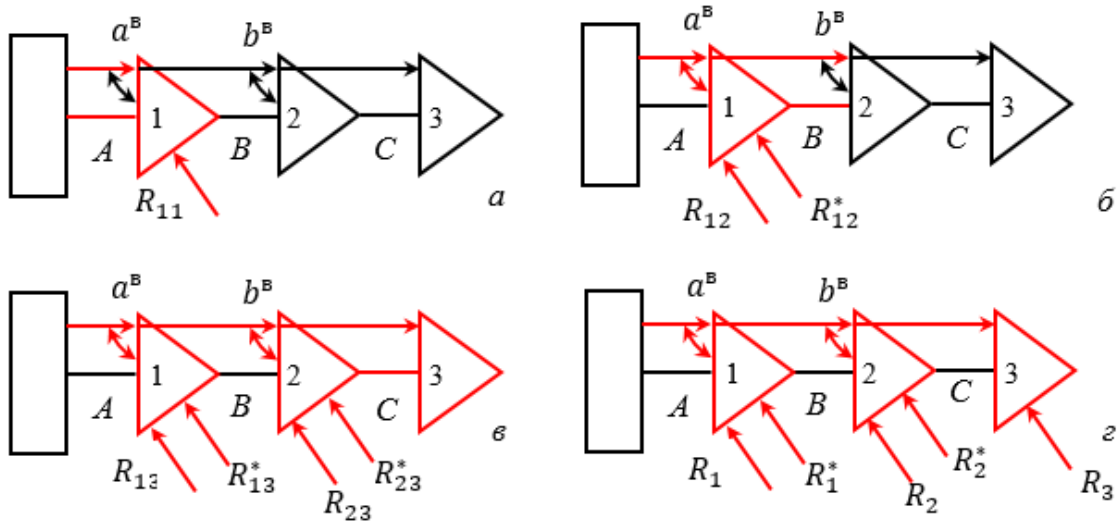


Рисунок 3.8 – Силовые контуры, возникающие на различных этапах обхвата исполнительной группой звеньев с дополнительными связями функционирования, введенными между выходными звеньями и звеньями связи функционирования: *а* - завершение этапа; *б* - второй этап; *в* - третий этап; *г* - завершение обхвата объекта

Таким образом, на втором этапе на внешний объект со стороны первого звена действуют силы, обусловленные наличием двух силовых контуров: F_1 , F_{AB}^* .

После остановки второго звена на внешнем объекте реализуются третий этап (рисунок 3.8, в). Через связь функционирования движение передается третьему звену. Обеспечивается движение в звеньях связи функционирования, расположенных между вторым и третьим звеном. Происходит деформация пружины b^B . В результате формируется два силовых контура. Первый контур F_3 : связь функционирования - третье звено. Второй F_{BV}^* : промежуточное звено связи функционирования - пружина b^B - второе звено - внешний объект. На его поверхности создается сила R_{23}^* .

Третий этап завершается после достижения третьим звеном поверхности внешнего объекта (рисунок 3.8, г). Формируется силовой контур F_3 : связь функционирования - третье звено - внешний объект. На его поверхности

создается сила R_3 . Вследствие увеличения усилия в связи функционирования со стороны первого и второго звена создаются соответственно силы R_1 и R_2 . При этом $R_1 > R_{13}$ и $R_2 > R_{23}$.

Данный вариант введения дополнительных связей функционирования характеризуется формированием на этапе обхвата дополнительных силовых контуров F_{AB}^* и F_{BB}^* . Как следствие, на внешний объект действуют добавочные силы.

По завершении обхвата на этапе удержания на внешний объект действуют силы, обусловленные прямой передачей усилий через связи функционирования R_1, R_2, R_3 и дополнительные R_1^*, R_2^* вследствие действия деформированных пружин a^B, b^B .

В комбинированных вариантах имеет место сочетание силовых контуров, характерных для основных вариантов (см. рисунок 3.5, а, б, в). Поскольку на каждом этапе реализуется только один вариант введения дополнительных связей функционирования, механизм создания силовых контуров полностью идентичен рассмотренному в основных схемах.

В соответствии с принятым общим методом оценки структурных схем показателем качества на этапе синтеза положения дополнительной функциональной связи следует принимать число силовых контуров K_4 , в которых выходное звено замыкается на объекте.

На рисунке 3.9 представлены силовые контуры, соответствующие завершающему этапу обхвата для вариантов г, д, е, ж, з. Сочетание вариантов отражено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Исходное и предельное относительное положение фланг

Вариант введения дополнительных связей функционирования	Последовательно сочетаемые варианты
рисунок 3.5, г	$v + \bar{b}$
рисунок 3.5, д	$\bar{b} + a$
рисунок 3.5, е	$\bar{b} + v$
рисунок 3.5, ж	$\bar{b} + v$
рисунок 3.5, з	$a + \bar{b}$

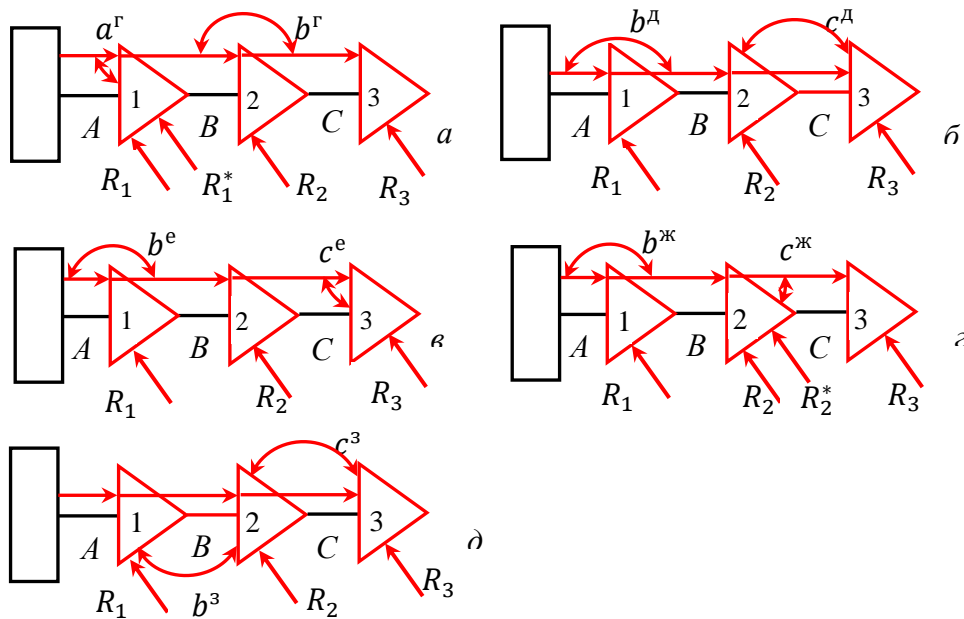


Рисунок 3.9 – Силовые контуры, возникающие в исполнительных группах звеньев с дополнительными связями функционирования, введенными в соответствии с рисунком 3.5: *а* - вариантом *г*; *б* - вариантом *д*; *в* - вариантом *е*; *г* - вариантом *ж*; *д* - вариантом *з*

В общем случае проектируемыми параметрами являются: число двигателей - x_{14} , вводимые дополнительные связи функционирования - x_{24} . Показатель качества K_4 – суммарное количество силовых контуров, реализуемых на этапе обхвата - K_{41} и удержания - K_{42} . Функциональная зависимость $f(x_{i4})$, связывающая проектируемые параметры x_{i4} , имеет вид суммы. Критерий оптимальности определяется выражением

$$Y_4 = K_4 / (x_{14} + x_{24}) . \quad (3.6)$$

В таблице 3.6 представлены значения параметров, характеризующие функциональные схемы и соответствующий им критерий оптимальности.

Таблица 3.6 - Варианты сочетания проектируемых параметров и критерия оптимальности

Вариант общей схемы	K_{41}	K_{42}	K_4	x_{14}	x_{24}	Y_4
рисунок 3.5, <i>а</i>	0	3	3	1	2	1
рисунок 3.5, <i>б</i>	0	3	3	1	2	1
рисунок 3.5, <i>в</i>	2	5	7	1	2	2,3
рисунок 3.5, <i>г</i>	1	4	5	1	2	1,6
рисунок 3.5, <i>д</i>	0	3	3	1	2	1
рисунок 3.5, <i>е</i>	1	3	4	1	2	1,3
рисунок 3.5, <i>ж</i>	1	3	4	1	2	1,3
рисунок 3.5, <i>з</i>	1	3	4	1	2	1,3

Конструктивная реализация варианта построения общей функциональной схемы, представленной на рисунок 3.5, в может выполняться с использованием в качестве связи функционирования: рычажного, тросового, зубчатого типа передач. На рисунке 3.10 представлены структурные схемы, реализующие соответствующие функциональные схемы, отображенные на рисунке 3.5, с использованием рычажного типа передач. Отражение силового взаимодействия для варианта введения дополнительных связей функционирования между выходными звеньями представлено на рисунке 3.11.

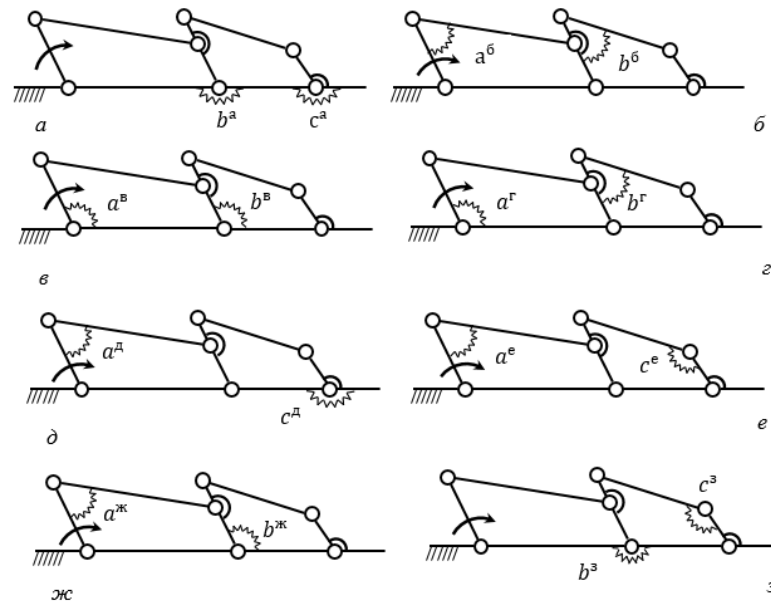


Рисунок 3.10 – Варианты построения структурных схем исполнительных групп звеньев с рычажной схемой передачи движения, соответствующие функциональным схемам на рисунке 3.5

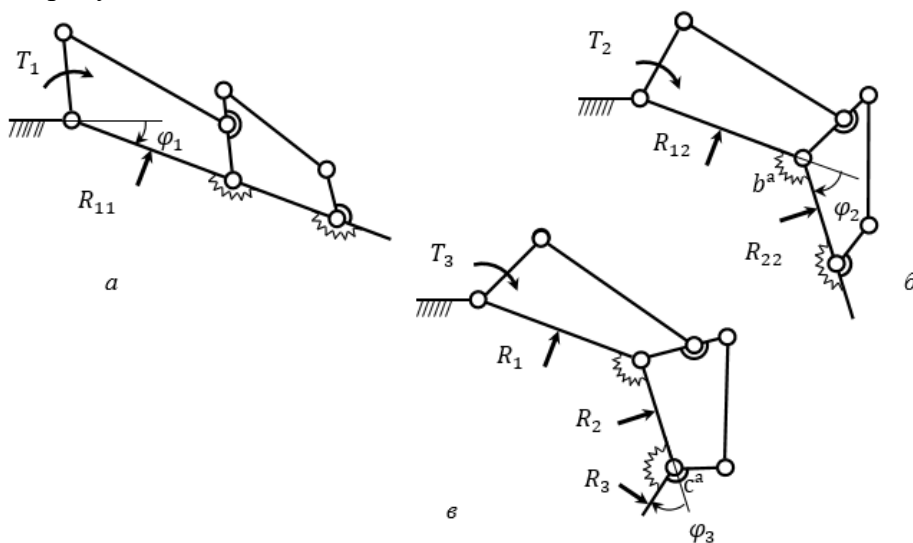


Рисунок 3.11 – Схемы нагружения выходных звеньев при введении дополнительных связей функционирования между выходными звеньями: а - начало второго этапа; б - завершение второго этапа; в - завершение обхвата внешнего объекта

На первом этапе величина момента на ведущем звене системы передачи движения (связи функционирования) T_1 определяется сопротивлением движению в связи строения А (кинематической паре). После остановки первого звена на внешнем объекте на его поверхности создается сила R_{11} , величина которой определяется моментом T_1 .

На втором этапе момент увеличивается до величины T_2 :

$$T_2 = T_1 + \Delta T_2, \quad (3.7)$$

где $\Delta T_2 = f(\varphi_2)$ - приращение момента, обусловленное усилием, необходимым для деформации пружины b^a .

Аналогично на третьем этапе на входном звене системы передачи движения создается момент T_3 :

$$T_3 = T_2 + \Delta T_3, \quad (3.8)$$

где $\Delta T_3 = f(\varphi_3)$ - приращение момента, обусловленное усилием необходимым для деформации пружины c^a .

Следует отметить, что на данном этапе величина ΔT_2 является неизменной.

На этапе удержания на входном звене системы передачи движения создается момент $T_{уд}$, обеспечивающий создание усилия на третьем выходном звене, достаточного для исключения движения объекта по выходному звену.

Силовое взаимодействие между звеньями для варианта введения дополнительных связей функционирования между звеньями связи функционирования и выходными звеньями представлено на рисунке 3.12 [120].

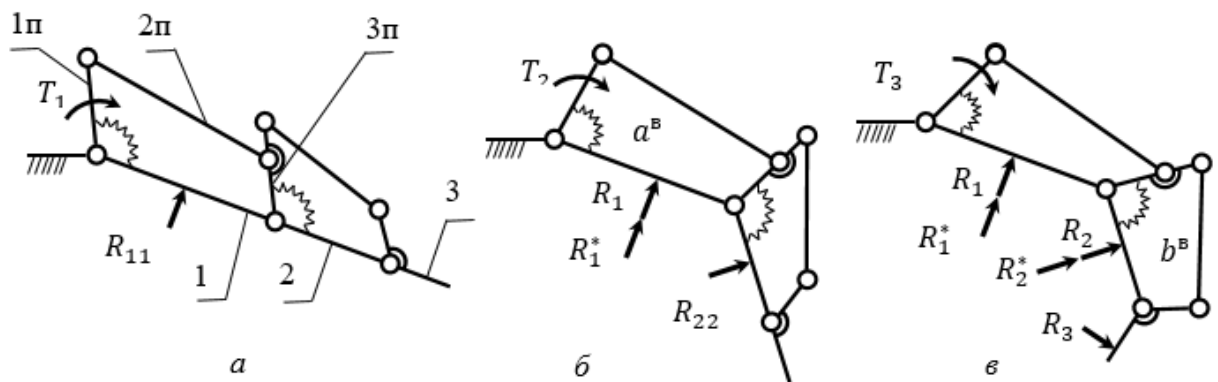


Рисунок 3.12 – Схемы нагружения выходных звеньев при введении дополнительных связей функционирования между выходными звеньями и звеньями связи функционирования: *a* - начало второго этапа; *б* - завершение второго этапа; *в* - завершение обхвата внешнего объекта

Аналогично предыдущему варианту, на первом этапе величина момента на ведущем звене системы передачи движения T_1 определяется сопротивлением движению в связи строения (кинематической паре) A . После остановки первого звена на внешнем объекте на его поверхности создается сила R_{11} .

На втором этапе поворот второго звена сопровождается деформацией пружины a^B , один конец которой действует на первое звено. При этом на нем создается усилие R_{11}^* , передающееся на объект. По мере увеличения угла поворота второго звена величина R_{11}^* возрастает и в конце второго этапа равна R_1^* .

На третьем этапе имеет место относительное движение звена $3п$ относительно второго звена. Это ведет к деформации пружины b^B и создается усилие, которое передается на второе звено и далее на объект, на котором формируется сила R_{22}^* . По мере увеличения угла поворота второго звена деформация пружины возрастает, что ведет к увеличению силы R_{22}^* . При завершении третьего этапа ее величина достигает значения R_2^* .

На третьем этапе угол между первым звеном и звеном системы передачи движения $1п$ уменьшается, что ведет к дополнительной деформации пружины a^a и увеличению силы до значения R_1^* .

3.3 Параметрический синтез рычажной системы передачи движения исполнительной группе с групповым приводом

3.3.1 Варианты построения исполнительной группы звеньев

Предпочтительным вариантом построения исполнительной группы является использование кинематической схемы с тремя выходными звеньями. Однако достаточно много реализуемых конструкций антропоморфных захватов имеют два выходных звена. Известная конструкция *RoboticQ* с двумя выходными звеньями, созданная в 2013 году [24], совершенствуется до настоящего времени [133 - 135]. В частности, работы [136 – 138] посвящены параметрическому синтезу, задачей которого является увеличение размеров захватываемых внешних объектов.

Антропоморфный захват Kinova KG-2, созданный в Department of mechanical engineering, Université Laval (Канада), также имеет две оппозитные исполнительные группы с двумя выходными звеньями [139]. Однако взаимодействие с внешним объектом в четырех точках не обеспечивает надежный обхват [140]. В связи с этим определился переход на конструкции с тремя исполнительными группами RobotiQ 3F [141] и Kinova KG-3 [142], каждая из которых имеет по три выходных звена.

Сохраняющаяся тенденция к использованию исполнительных групп с двумя выходными звеньями определяет необходимость разработки метода параметрического синтеза и для данного варианта.

На рисунке 3.13 представлены варианты построения исполнительных групп звеньев с дополнительными связями функционирования, установленными между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения. Общим для всех вариантов является способ введения дополнительных связей функционирования между звеньями двух подсистем: выходных звеньев и системы передачи движения [120].

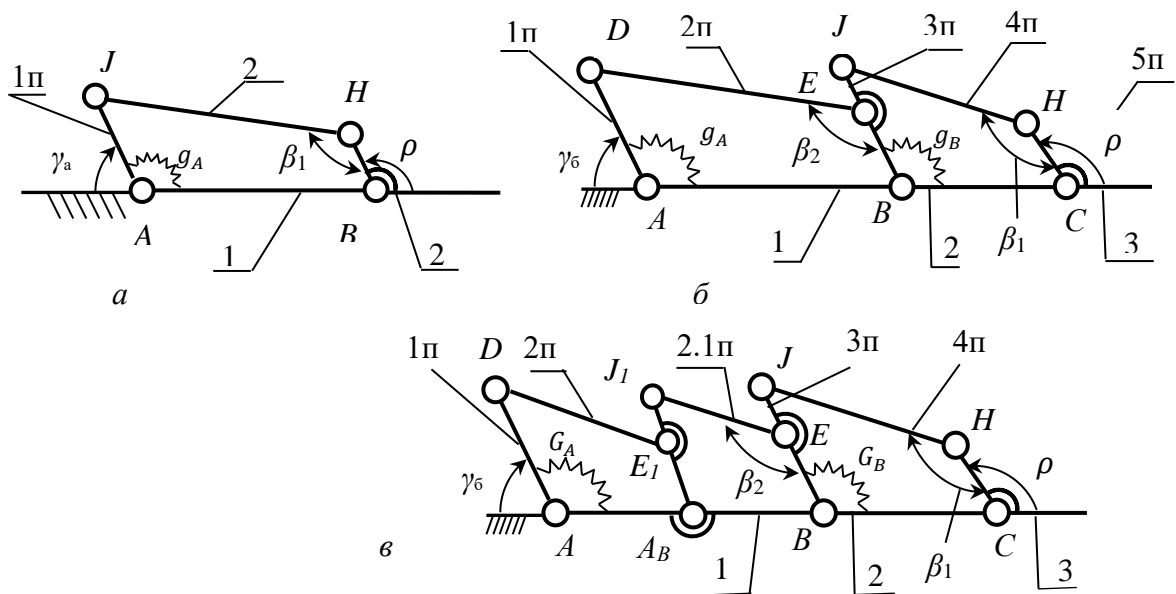


Рисунок 3.13 – Варианты построения исполнительных групп звеньев с дополнительными связями функционирования, установленными между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения: *а* - с двумя выходными звеньями; *б* - с тремя выходными звеньями; *в* - с тремя выходными звеньями и дополнительным коромыслом в функциональной связи

3.3.2 Проектируемые параметры

Параметрами, определяющими кинематическую схему системы передачи движения, являются длины звеньев $1п - 5п$ ($2.1п$, $3.1п$), угол установки ведущего звена γ_6 , угол, определяющий положение отвода третьего выходного звена ρ .

Для варианта с двумя входными звеньями проектируемыми параметрами являются (рисунок 3.13, а): $x_1 = \rho$, $x_2 = l_{BH}$, $x_3 = l_{JH}$, $x_4 = l_{AJ}$. Вариант с тремя выходными звеньями определяется параметрами (рисунок 3.13, б): $x_1 = \rho$, $x_2 = l_{CH}$, $x_3 = l_{JH}$, $x_4 = l_{BJ}$, $x_5 = l_{BE}$, $x_6 = l_{DE}$, $x_7 = l_{AD}$. На рисунке 3.13, в представлен вариант с тремя выходными звеньями и сдвоенным коромысловым механизмом, характеризуемым дополнительными проектируемыми параметрами: $x_8 = l_{ABJ1}$, $x_9 = l_{ABE1}$, $x_{10} = l_{DE1}$.

Число проектируемых параметров составляет для каждого варианта соответственно 4, 7, 10. Уравнения связей, которым должны соответствовать проектируемые параметры, вытекают из условия обеспечения начальных (минимальных) углов: $\varphi_{1H} = 30^0$, $\varphi_{2H} = 36^0$, $\varphi_{3H} = 18^0$ и максимальных углов относительного поворота звеньев: $\varphi_{1K} = 90^0$, $\varphi_{2K} = 92^0$, $\varphi_{3K} = 44^0$ (см. раздел 3.2.1). Число уравнений связи для варианта, представленного на рисунке 3.13, а, – четыре, а для рисунка 3.13, б – шесть. Вариант, отображённый на рисунке 3.13, в, является частным случаем предшествующего варианта (рисунок 3.13, б) и имеет то же число уравнений связи.

Число функциональных уравнений связи меньше числа проектируемых параметров. В связи с этим задачу их определения следует решать в оптимизационной постановке [143, 144].

3.3.3 Обоснование критерия оптимальности

Функционирование исполнительной группы звеньев с переменной структурой [114] характеризуется двумя факторами: реализуемыми углами

относительного поворота звеньев и развиваемыми усилиями при захвате объектов. Первое условие выступает в качестве уравнений связи – функциональных ограничений. Второе условие может являться правилом предпочтения для определения сочетания проектируемых параметров, то есть критерием оптимальности [145]. При решении задачи параметрического синтеза следует учитывать оба фактора.

Эффективность работы антропоморфного хватного модуля в стесненных условиях определяет необходимость учитывать поперечные габариты исполнительной группы звеньев. Характеристикой данного показателя является коэффициент «компактности» K_l , представляющий собой отношение максимального размера по высоте к суммарной длине выходных звеньев. Решение задачи параметрического синтеза ведется в оптимизационной постановке. Используются различные критерии оптимальности. Результаты параметрического синтеза, выполненные в University of Cassino [75], имеют значение 0,6, в University of Technology (Ирак) $K_l = 0,89$ [76]. Решение, найденное в Huazhong University of Science and Technology (Китай) [79], обеспечивает значение $K_l = 0,35$, что является приемлемым. Однако в качестве объектов были приняты цилиндры с диаметром от 70 до 100 мм.

В соответствии с техническим заданием на проект «ТЕЛЕДРОИД» следует выполнять действия с объектами, основной ряд которых представлен на рисунке 1.17. При этом размер по обхватываемому сечению варьируется от 22 мм до 55 мм, в связи с чем известные критерии не могут быть использованы.

Коэффициент «компактности» включает только один проектируемый параметр, то есть не является функцией. В связи с этим он может быть использован на этапе параметрического синтеза как прямое ограничение на длину коромысла $l_{AD}(x_7)$.

В силу идентичности систем передачи движения критерий оптимальности имеет общий характер для всех вариантов построения (см. рисунок 3.10).

При постоянной величине момента на ведущем звене 1п наилучшее условие передачи усилия с шатуна 2п на ведомое коромысло обеспечивается при угле β_i , равном $\pi/2$. В этом случае направление вектора силы, действующей на коромысло, и скорости в точке приложения силы совпадают, что соответствует созданию максимально возможного момента в кинематической паре.

Однако величина β_i меняется при изменении угла φ_i ($i = 2, 3$). Оптимальным следует полагать сочетание проектируемых параметров, при которых в пределах всего диапазона изменения угла φ_i значение β_i близко к $\pi/2$. Этому требованию соответствует достижение целевой функцией F минимального значения:

$$F = \min \sum_1^2 (k_{1s} (|\pi/2 - \beta_{SH}|) + (k_{2s} (|\pi/2 - \beta_{SK}|))) , \quad (3.9)$$

где β_{SH} и β_{SK} - углы между шатуном и ведомым коромыслом, соответствующие начальному положению между выходными звеньями и при максимальном угле их относительного поворота;

k_{1s} , k_{2s} - коэффициенты, определяющие степень приоритетности создания усилия выходным звеном при минимальном или максимальном угле относительного поворота.

3.3.4 Формализация условий связи и критерия оптимальности для исполнительной группы с двумя выходными звеньями

Условием, связывающим между собой проектируемые параметры, является неизменность структурной схемы исполнительной группы звеньев в процессе функционирования [145, 146]. Данное условие формализуется в виде зависимости угла поворота ведущего звена 1п - γ_a через угол поворота выходного звена φ_2 и проектируемые параметры (рисунок 3.14):

$$\gamma_a = f(\varphi_2, x_i) . \quad (3.10)$$

Отметим, что при изменении угла поворота φ_1 относительное движение звеньев системы передачи движения отсутствует. В связи с этим следует

рассматривать только обхват внешнего объекта, сопровождающийся поворотом выходного звена 2.

Зависимость (3.10) может быть получена исходя из условия замкнутости векторного контура $AJNB$ и образующих его треугольников. Для треугольника AHB векторное уравнение, отражающее условие замкнутости, имеет вид

$$l_{AH} - x_2 - l_1 = 0. \quad (3.11)$$

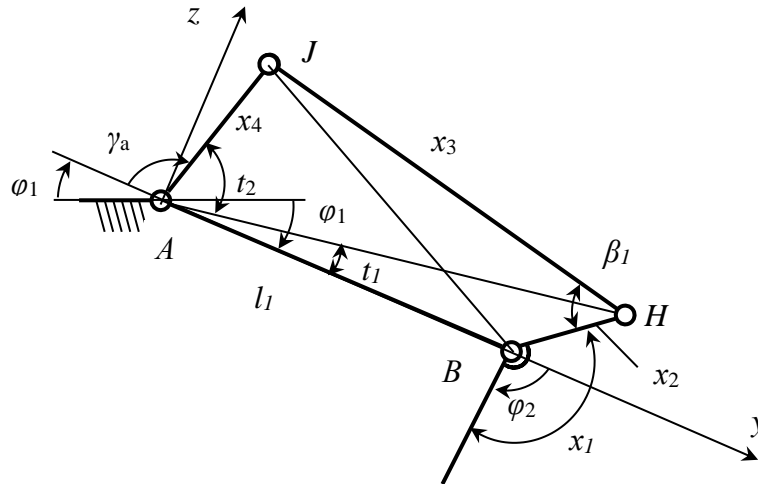


Рисунок 3.14 – К выводу зависимости целевой функции для исполнительной группы с двумя выходными звеньями

Или в проекциях на оси y и z соответственно

$$l_1 + x_2 \cos(x_1 - \varphi_2) - l_{AH} \cos t_1 = 0, \quad (3.12)$$

$$x_2 \sin(x_1 - \varphi_2) - l_{AH} \sin t_1 = 0. \quad (3.13)$$

Из уравнений (3.15) и (3.16) следует

$$t_1 = \arctg (x_2 \sin(x_1 - \varphi_2) / (x_2 \cos(x_1 - \varphi_2) - l_1)), \quad (3.14)$$

$$l_{AH} = -(x_2 \sin(x_1 - \varphi_2) / \sin t_1). \quad (3.15)$$

Из треугольника AJH по теореме косинусов

$$x_3^2 = x_4^2 + l_{AH}^2 - 2 x_4 l_{AH} \cos t_2 = 0, \quad (3.16)$$

$$t_2 = \arccos((x_4^2 + l_{AH}^2 - x_3^2) / (2 l_{AH} x_4)). \quad (3.17)$$

Изменение угла поворота ведущего звена 1п, обеспечивающего поворот выходного звена 2 на угол φ_2 , равен

$$\gamma_a = \pi - (t_1 + t_2) \quad (3.18)$$

$$\gamma_a = \pi - \arctg (x_2 \sin(x_1 - \varphi_2)) / (x_2 \cos(x_1 - \varphi_2) - l_1) - \arccos((x_4^2 + l_{AH}^2 - x_3^2) / (2 l_{AH} x_4)) . \quad (3.19)$$

После подстановки, начиная с уравнения (3.12) последовательно значение $\varphi_2 = \varphi_{2H}$, $\varphi_2 = \varphi_{2K}$, получаем два уравнения связи.

Для определения вида зависимости целевой функции F (3.9) следует получить аналитическое выражение для угла β_1 через проектируемые параметры.

Выразив длину l_{JB} из условия принадлежности треугольникам AJB и VJH получим

$$\beta_1 = \arccos ((-l_{JB}^2 + x_3^2 + x_2^2) / (2x_2 x_3)) , \quad (3.20)$$

где

$$l_{JB}^2 = x_4^2 + l_1^2 - 2x_4 l_1 \cos (t_1 + t_2) . \quad (3.21)$$

После подстановки в (3.20) значения углов t_1 и t_2 , рассчитанных соответственно с углами $\varphi_2 = \varphi_{2H}$ и $\varphi_2 = \varphi_{2K}$, определяются углы β_{1H} и β_{1K} .

В итоге зависимость (3.9) примет вид

$$F = \min(k_1 (|\pi/2 - \beta_{1H}|) + (k_2 (|\pi/2 - \beta_{1K}|))) . \quad (3.22)$$

Поиск экстремума функции F может выполняться любым программным продуктом, реализующим метод прямого поиска. При этом в качестве прямых ограничений выступают $a_i < x_i < b_i$, где a_i и b_i наперед заданные ограничения на проектируемые параметры.

3.3.5 Формализация условий связи и критерия оптимальности для исполнительной группы с тремя выходными звеньями

При формировании зависимости целевой функции (3.9) для варианта исполнительной группы с тремя выходными звеньями используются ранее полученные зависимости (3.11) – (3.21) с сохранением принятых обозначений, проектируемых параметров (рисунок 3.15).

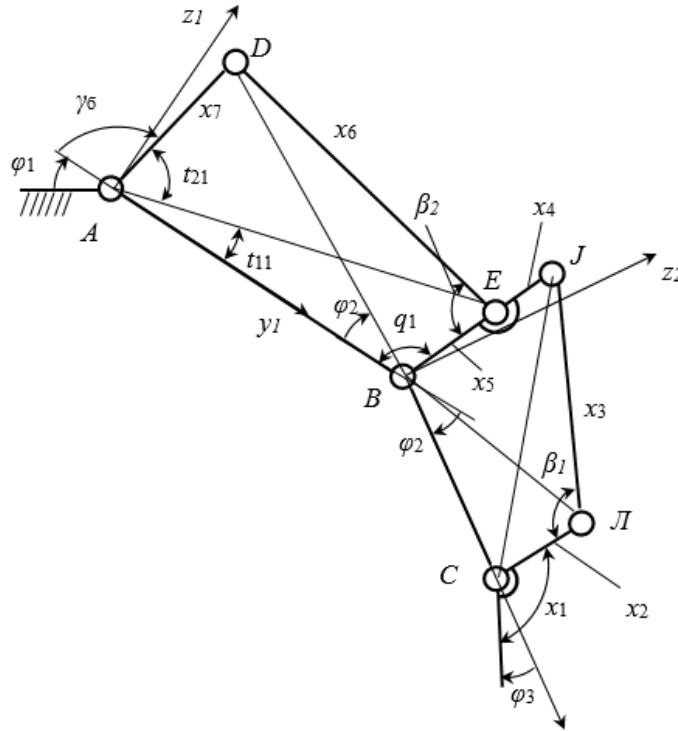


Рисунок 3.15 – К выводу зависимости целевой функции для исполнительной группы с тремя выходными звеньями

Следует получить зависимость

$$\gamma_6 = f(\varphi_2, \varphi_3, x_i). \quad (3.23)$$

Угол q_1 соответствует параметру γ_a (3.19). Однако с учетом угла поворота φ_2 следует

$$q_1 = \gamma_a + \varphi_2. \quad (3.24)$$

Кроме того, в зависимостях (3.15) – (3.24) при расчете γ_a вместо φ_2 используется угол φ_3 , а искомая зависимость γ_6 формируется по алгоритму, аналогичному ранее изложенному в п.3.3.3.

Из условия замкнутости векторного контура, образованного звеньями $ADEB$, следует, что для треугольника AEB

$$l_{AE} - x_5 - l_1 = 0. \quad (3.25)$$

Или в проекциях на оси y_2 и z_2 соответственно

$$l_1 - x_5 \cos q_1 - l_{AE} \cos t_{11} = 0, \quad (3.26)$$

$$x_5 \sin q_1 - l_{AE} \sin t_{11} = 0. \quad (3.27)$$

Из уравнений (3.26) и (3.27) следует

$$t_{11} = \arctg(x_5 \sin q_1 / (l_1 - x_5 \cos q_1)), \quad (3.28)$$

$$l_{AE} = x_5 \sin q_1 / \sin t_{11} . \quad (3.29)$$

Из треугольника ADE по теореме косинусов

$$x_6^2 = x_7^2 + l_{AE}^2 - 2 x_7 l_{AE} \cos t_{21} = 0 , \quad (3.30)$$

$$t_{21} = \arccos ((x_7^2 - x_6^2 + l_{AE}^2)/(2 l_{AE} x_7)) . \quad (3.31)$$

Угол поворота γ_6 ведущего звена 1п, обеспечивающий поворот выходных звеньев 2 и 3 соответственно на углы φ_2 и φ_3 , равен

$$\gamma_6 = \pi - (t_{11} + t_{21}) . \quad (3.32)$$

После соответствующих подстановок получаем

$$\begin{aligned} \gamma_6 = \pi - \arctg (x_5 \sin q_1) / (l_1 - x_5 \cos q_1) - \\ - \arccos ((x_7^2 - x_6^2 + l_{AE}^2)/(2 l_{AE} x_7)) . \end{aligned} \quad (3.33)$$

После подстановки в уравнение (3.33) значений $\varphi_2 = \varphi_{2H}$, $\varphi_2 = \varphi_{2K}$ получаем четыре уравнения связи.

Для определения вида зависимости целевой функции F (3.9) следует получить аналитическое выражение для угла β_1 через проектируемые параметры.

Выразив длину l_{DB} из условия принадлежности треугольникам ADB и DBE , получим

$$\beta_2 = \arccos ((-l_{DB}^2 + x_6^2 + x_5^2)/(2x_5 x_6)), \quad (3.34)$$

где

$$l_{DB}^2 = x_7^2 + l_1^2 - 2 x_7 l_1 \cos (t_{11} + t_{21}) . \quad (3.35)$$

После подстановки в (3.34) значения углов t_{11} , t_{21} рассчитываются соответственно углы β_{2H} и β_{2K} .

Применительно к варианту, представленному на рисунке 3.13, в, ранее полученные зависимости (3.23) – (3.35) имеют аналогичные аналитические зависимости. При этом расчет геометрических параметров выполняется с использованием графического программирования в среде LabVIEW [147].

Целевая функция (3.12) применительно к трехзвенной исполнительной группе звеньев имеет вид

$$F = \min(k_1 (|\pi/2 - \beta_{1H}|) + (|\pi/2 - \beta_{1K}|)) +$$

$$+ (k_2 (|\pi/2 - \beta_{2H}|) + (|\pi/2 - \beta_{2K}|)), \quad (3.36)$$

где β_{1H} и β_{1K} рассчитываются по зависимости (3.23) при значениях $\varphi_2 = \varphi_{2H}$ и $\varphi_2 = \varphi_{2K}$.

3.3.6 Расчет параметров рычажной системы передачи движения по критерию оптимальности

Для исходных данных, соответствующих техническому заданию на разработку манипулятора для космической станции (проект «ТЕЛЕДРОИД - НД»), были выполнены расчеты параметров системы передачи движения исполнительной группе. В качестве исходных данных были заданы длины звеньев: $l_1 = 50$ мм, $l_2 = 34$ мм, $l_3 = 26$ мм. При этом углы, определяющие начальное положение выходных звеньев φ_{iH} , обоснованы в разделе 3.2.1.

Нахождение переменных параметров выполнялось с использованием программы поиска экстремума Global Optimization 4.3. Найденные значения отражены в таблице 3.7 и на рисунке 3.16, а.

Таблица 3.7 - Значения параметров, определяющих кинематическую схему рычажного механизма системы передачи движения звеньям

Параметр	ρ , град	l_{CH} , мм	l_{JH} , мм	l_{BJ} , мм	l_{J1E} , мм	l_{ABE1} , мм	l_{BE} , мм	l_{ABJ1} , мм	l_{DE1} , мм	l_{AD} , мм
Расчетное	132,5	16,1	33,5	25,2	40,1	23,3	18,6	32,4	46,2	31,2
Принятое	130	16	33	32	36	35	25,5	40	38	31

Из конструктивных соображений принято смещение вращательных пар E , $E1$, A_B , B_C (см. рисунок 3.16, б). Это обеспечивает рациональную компоновку при диаметре осей в кинематических парах 5 мм.

В таблице 3.8 представлены параметры, характеризующие начальное и конечное положение исполнительной группы звеньев, соответствующее обхвату объекта диаметром 20 мм. Поперечные сечения выходных звеньев приняты: проксимальное - 32 мм, медиальное - 24 мм, дистальное - 19 мм (рисунок 3.17). В исходном положении (рисунок 3.17, а) обеспечивается обхват объекта с контактом дистального звена с поперечным размером 120 мм.

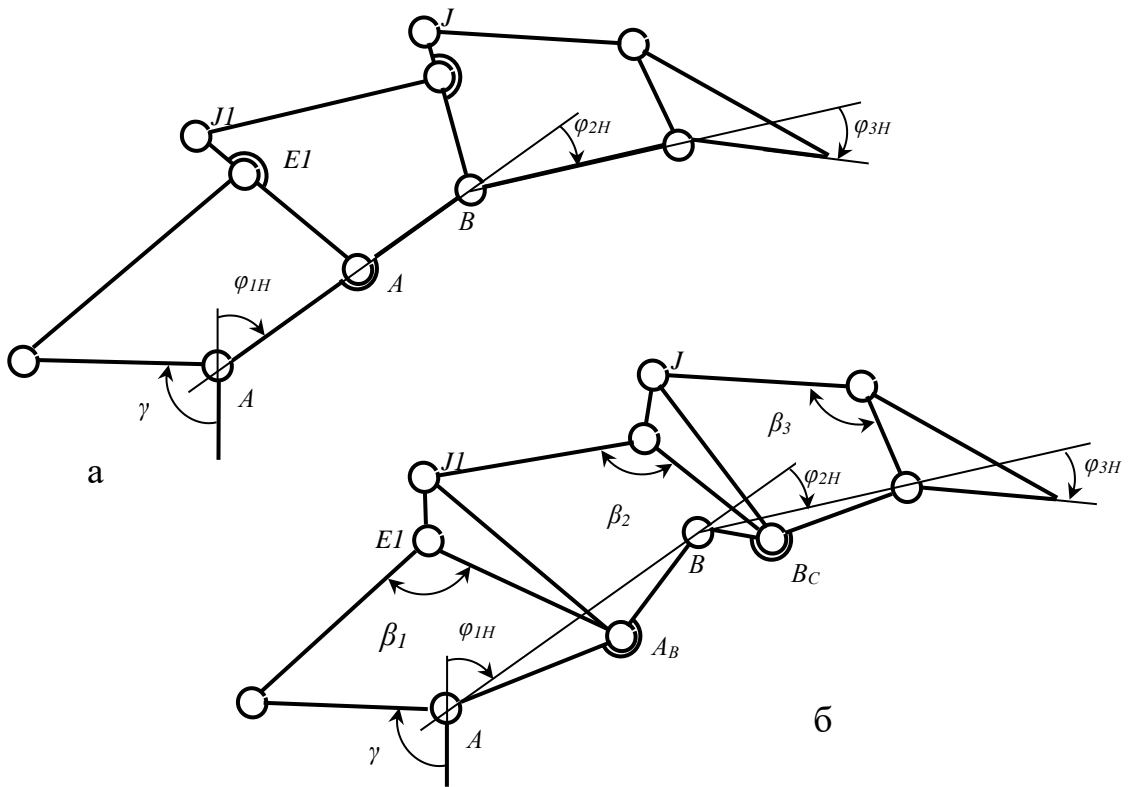


Рисунок 3.16 - Кинематическая схема (в масштабе), отражающая параметры звеньев системы передачи движения: а - найденные по программе оптимизации; б - откорректированные из конструктивных соображений

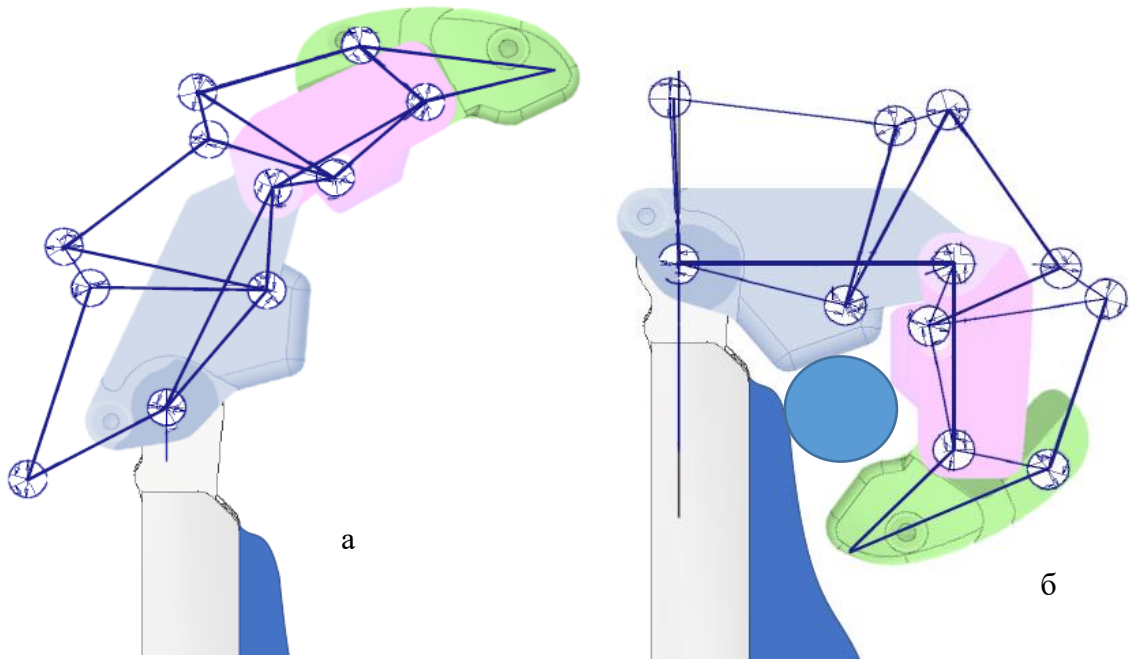


Рисунок 3.17 – Положение исполнительной группы при обхвате объекта диаметром 20 мм (в масштабе): а - исходное положение; б - конечное

Таблица 3.8 - Параметры, характеризующие начальное и конечное положение исполнительной группы звеньев

Параметр	γ , град	φ_1 , град	φ_2 , град	φ_3 , град	β_1 , град	β_2 , град	β_3 , град
Начальное	91	54	36	18	105,5	124,7	120,2
Изменение	85	37	56	26	22,7	41,5	24,8
Конечное	176	91	92	44	82,8	83,2	95,4

Отклонение от 90° в начальном и конечных положениях составляет $E1 - 15,5^\circ/7,2^\circ$, $E - 34,7^\circ/6,8^\circ$, $H - 30,2^\circ/5,4^\circ$. Наибольшая разность угла β_i имеет место в паре E и составляет $34,7^\circ$. Это обусловлено тем, что принятые значения коэффициентов k_{1s} , k_{2s} обеспечили приоритетное значения углов β_i , близкими к 90° при максимальном угле относительного поворота выходных звеньев.

Величина угла поворота ведущего звена AD составляет 85° .

3.3.7 Выводы по главе 3

Структурный синтез антропоморфного захватного модуля выполняется последовательно по четырем уровням:

- определение компоновки и числа исполнительных групп звеньев;
- определение структурной схемы исполнительной группы звеньев;
- определение структурной схемы привода выходных звеньев исполнительной группы звеньев;
- определение положения вводимых дополнительных функциональных связей.

Разработан метод формирования критерия оптимальности для каждого уровня. Критерий имеет единую структуру для всех этапов в виде отношения показателя качества, определяющего функциональные свойства, характерные для этапа, к функции «затрат», выраженной через проектируемые параметры.

Для каждого уровня определены возможные варианты схем построения и выполнены расчеты для каждого критерия оптимальности. Установлено, что оптимальной является структурная схема антропоморфного захватного модуля, имеющая:

- четыре исполнительные группы звеньев, расположенные попарно и оппозиционно;
- каждая исполнительная группа звеньев включает три выходных звена, соединенные кинематическими парами с параллельными осями вращения;
- групповой привод каждой исполнительной группы звеньев с двигателем, вынесенным на основание и введенными дополнительными связями функционирования в виде пружин сжатия, обеспечивает при обхвате последовательность движения от проксимального звена к медиальному с адаптацией их положения к профилю объекта;
- дополнительные связи функционирования, установленные между звеньями системы передачи движения и выходными звеньями обеспечивают создание дополнительных сил, действующих со стороны первого и второго звена на внешний объект. Их величина возрастает по мере увеличения угла поворота последующего звена.

Параметры выходных звеньев целесообразно принимать по аналогии с параметрами пальцев руки человека. При этом следует иметь углы начального относительного положения звеньев: проксимального - 54° , медиального - 36° , дистального - 18° . Это обеспечивает обхват объекта диаметром 20 мм при минимальном угле поворота ведущего звена 85° .

Параметрический синтез рычажной системы передачи движения выполнен по критерию минимального отклонения величины угла между шатунами и коромыслами в предельных положениях. При увеличении угла относительного поворота выходных звеньев углы β_i между шатунами и коромыслами возрастают до предельного значения в 87° . Найденные параметры, определяющие поперечный размер исполнительной группы звеньев, не превышают 35% от его суммарной длины.

ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ ОППОЗИТНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГРУПП ЗВЕНЬЕВ НА ЭТАПАХ ОБХВАТА И УДЕРЖАНИЯ

4.1 Особенности управления исполнительными группами антропоморфного захвата с изменяемой структурной схемой

Назначение антропоморфного робота – выполнение действий с объектами, заменяя работу человека в условиях, представляющих для него опасность. Общей характеристикой объектов является изначальная неопределенность контура поверхности объекта, положение на опоре – возможность его смещения. При этом стесненные условия не позволяют за счет движений звеньев манипулятора размещать захват симметрично относительно центра объекта. В общем случае объект располагается со смещением к одной из исполнительных групп.

Взаимодействие захватного модуля с объектом включает два этапа – обхват и удержание. В известных работах этап обхвата исследуется с момента силового взаимодействия дистального выходного звена и внешнего объекта [55, 56]. Предшествующие стадии – контакт проксимального и медиального звеньев с объектом - не рассматриваются. Такой подход является правомочным при взаимодействии с закрепленным внешним объектом и при его симметричном положении относительно оппозитных исполнительных групп. Однако более общим является случай взаимодействия с объектом, неопределенным по положению на опоре и относительно оппозитных исполнительных групп звеньев. Данная задача особенно актуальна при решении вопросов управления захватом при взаимодействии с опасными объектами [148, 149].

На этапе удержания обязательным условием является контроль усилия, создаваемого выходными звеньями на поверхности объекта допустимое значение, которого задается изначальное, но может корректироваться в процессе обхвата и удержания. Особенностью обхвата исполнительной

группой с изменяемой структурной схемой является то, что наибольшее усилие создается замыкающим выходным звеном – звеном, вступающим в контакт с объектом последним. В зависимости от формы объекта это может быть любое звено: проксимальное, медиальное, дистальное. При этом положение точки контакта на выходном звене может располагаться в любом месте по его длине.

Аппаратное оснащение в настоящее время не позволяет выполнять регистрацию величины усилия на звене в произвольной точке по длине звена. Это обусловлено габаритами датчиков сил, существенно превышающими поперечные размеры выходных звеньев.

Допустимым аппаратным оснащением по габаритам и условиям использования в среде с наличием радиации и резким изменением температуры является: энкодер, регистрирующий угол поворота двигателя (ведущего звена); датчик регистрирующий положение точки контакта по длине звена; контроллеры управления двигателями по моменту (типа Сервосила SC-25).

При обхвате антропоморфным хватным модулем изначально не детерминированного внешнего объекта следует использовать алгоритм, обеспечивающий определение его положения на опоре: фиксированное или свободное [151]. Фиксированное положение характеризуется отсутствием смещения внешнего объекта на опоре под действием сил, создаваемых выходными звеньями. При свободном положении на опоре может произойти его смещение. Информация о положении внешнего объекта определяет в последующем выбор алгоритма управления двигателями на стадии обхвата.

Объектом управления на этапе обхвата являются поочередно выходные звенья: проксимальное, медиальное, дистальное. Параметрами управления являются углы относительного поворота.

На этапе удержания объект управления – замыкающее звено, параметр управления – усилие, создаваемое им в точке контакта на внешнем объекте.

4.2 Идентификация положения внешнего объекта на опоре

Идентификация положения объекта на опоре выполняется на основе анализа совокупной информации о контакте одного из выходных звеньев с внешним объектом и возможности дальнейшего движения ведущего звена привода. Анализ может выполняться при реализации движения одной исполнительной группы звеньев или двух одновременно [154]. Алгоритм процедуры идентификации представлен на рисунке 4.1.

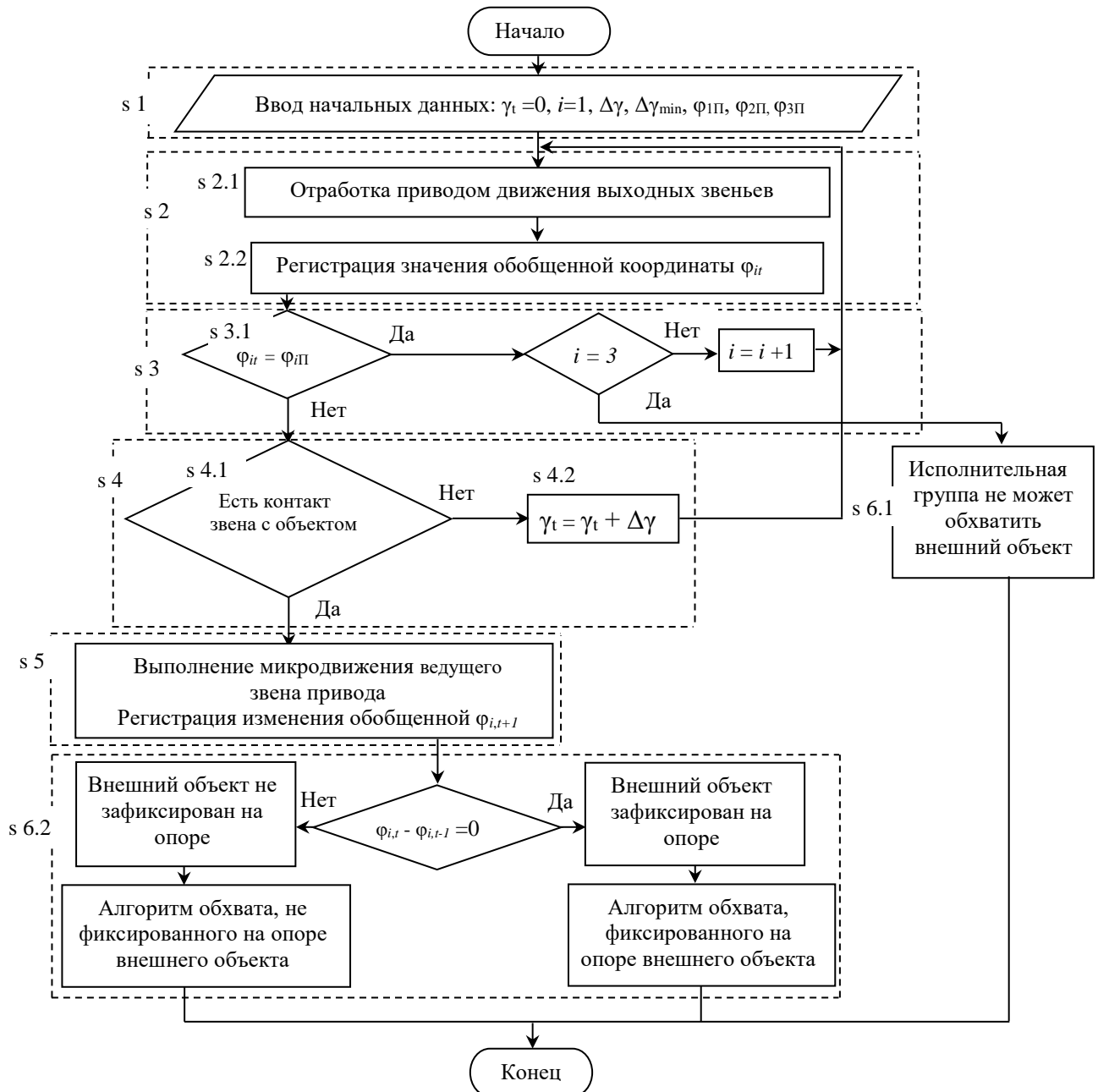


Рисунок 4.1 - Краткая запись алгоритма идентификации положения объекта на опоре

Использованы следующие обозначения: γ_t – текущее значение угла поворота ведущего звена привода, $\Delta\gamma$ – приращение угла поворота ведущего звена привода на очередном шаге итерации, $\Delta\gamma_{\min}$ – приращение угла отработки выходного звена привода после контакта звена исполнительной группы звеньев с внешним объектом, φ_{it} – текущее значение угла поворота i выходного звена исполнительной группы звеньев, $\varphi_{iП}$ – предельная величина угла относительного поворота i выходного звена ($i = 1, \dots, 3$).

Алгоритм включает несколько последовательно выполняемых этапов.

Этап s_1 . Вводятся начальные данные, определяющие: свойства объектов управления – предельные углы относительного поворота выходных звеньев: $\varphi_{1П}$, $\varphi_{2П}$, $\varphi_{3П}$; начальные значения переменных параметров: γ_t , i (равно единице, если движение начинается с проксимального звена), $\Delta\gamma$, $\Delta\gamma_{\min}$. Величина $\Delta\gamma$ определяет скорость итерационного процесса и выбирается исходя из времени, выделенного на захват внешнего объекта. Величину $\Delta\gamma_{\min}$ целесообразно назначать исходя из значения допустимого смещения внешнего объекта на опоре. При отсутствии такой информации значение $\Delta\gamma_{\min}$ следует принимать в долях от величины $\Delta\gamma$.

На этапе s_2 включается привод, осуществляется поворот ведущего звена привода на величину

$$\gamma_t = \gamma_t + \Delta\gamma \quad (4.1)$$

и выполняется движение проксимального выходного звена. При этом регистрируются значения изменяемой обобщенной координаты φ_{it} , фиксируемое энкодерами (под этап $s_{2.2}$). Отработка по этапу s_2 может выполняться в цикле от $i = 1$ до $i = 3$.

Этап s_3 . Проводится анализ достижения предельного значения угла поворота i звена. При выполнении условия

$$\varphi_{it} = \varphi_{iП} \quad (4.2)$$

фиксируется невозможность, в пределах допустимого угла поворота i звена, контакта какого-либо из выходных звеньев с внешним объектом и реализуется переход на движение следующего выходного звена. Далее цикл с этапа s_2

повторяется для $i + 1$ звена. Если отработано три цикла, то принимается решение о невозможности обхвата внешнего объекта звеньями данной исполнительной группы звеньев из принятого положения антропоморфного захвата (под этап $s_{6.1}$).

При невыполнении условия (4.2) проверяется наличие контакта с внешним объектом любого из выходных звеньев (под этап $s_{4.1}$). Если датчики контакта отразили взаимодействие одного из выходных звеньев с внешним объектом, осуществляется переход на этап s_5 . В противном случае осуществляется приращение угла поворота (под этап $s_{4.2}$) ведущего звена (4.2) и цикл повторяется с этапа s_2 .

На этапе s_5 изменяется режим движения ведущего звена привода. Приращение угла поворота выполняется с использованием микродвижения:

$$\gamma_t = \gamma_t + \Delta\gamma_{\min} . \quad (4.3)$$

При этом регистрируется изменение величины обобщенной координаты выходного звена, при котором наступил контакт любого из звеньев и осуществляется переход на этап $s_{6.2}$.

На этапе $s_{6.2}$ проверяется условие

$$\varphi_{i,t+1} - \varphi_{i,t} = 0 . \quad (4.4)$$

При его выполнении принимается решение о фиксированности внешнего объекта на опоре и не фиксированности при его невыполнении.

После завершения процедуры идентификации положения внешнего объекта осуществляется реализация одного из двух алгоритмов обхвата внешнего объекта [64].

4.3 Алгоритм управления исполнительной группой звеньев при обхвате объекта, фиксированного от смещения по опоре

Фиксированное положение внешнего объекта позволяет взаимодействовать с ним каждой из оппозитных исполнительных групп звеньев независимо друг от друга, совместно или поочередно.

Стадия обхвата внешнего объекта реализуется в общем случае в три этапа при непрерывной работе двигателя $\gamma(t)$. При этом на каждом этапе осуществляется движение только одного выходного звена [150]. На первом этапе происходит поворот в кинематической паре A (рисунок 4.2, *a*).

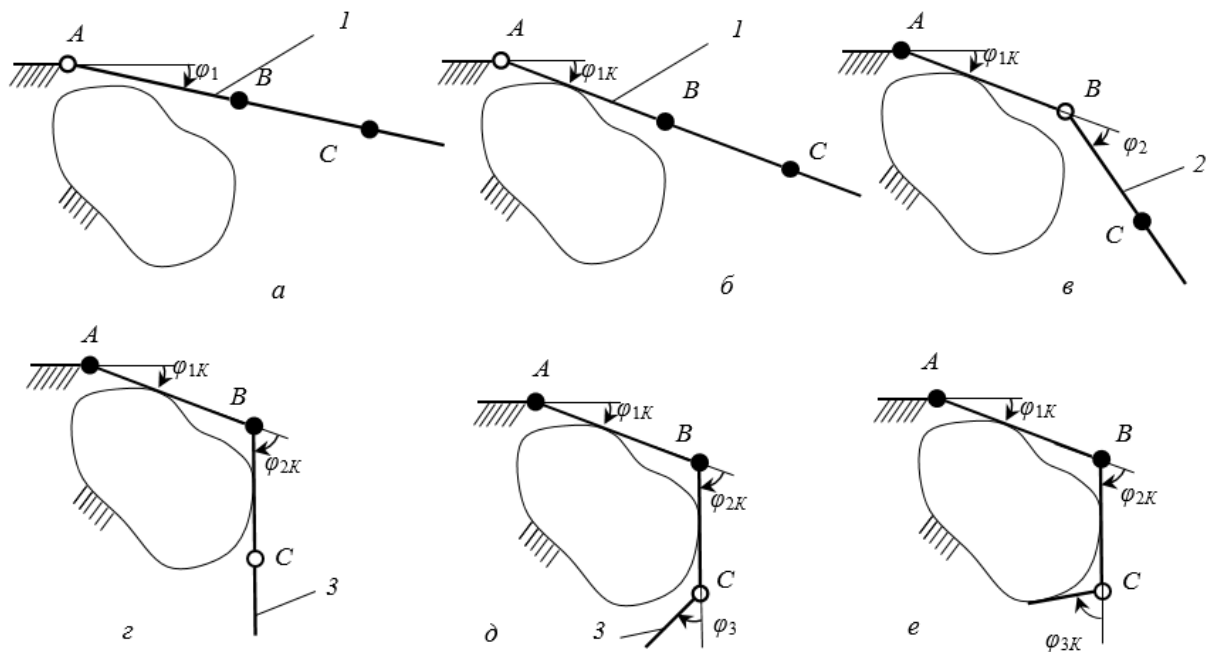


Рисунок 4.2 - Этапы обхвата выходными звеньями поверхности фиксированного внешнего объекта: *a* – начальная фаза первого этапа; *б* – переход ко второму этапу; *в* – второй этап; *г* – переход к третьему этапу; *д* – третий этап; *e* – завершение обхвата

Угол φ_1 изменяется соответственно углу поворота ведущего звена привода (см. рисунок 4.2, *a*). Этап завершается при достижении выходным звеном 1 поверхности внешнего объекта (рисунок 4.2, *б*). Обобщенная координата, определяющая положение звена 1, принимает фиксированное значение φ_{1K} . Далее реализуется движение звена 2 – второй этап (рисунок 4.2, *в*). Обеспечивается изменение угла φ_2 . Этап завершается при остановке звена 2 на поверхности внешнего объекта (рисунок 4.2, *г*) – фиксируется значение угла φ_{2K} . При неизменных значениях углов φ_{1K} и φ_{2K} реализуется поворот звена 3 – третий этап (рисунок 4.2, *д*). Обхват завершается после достижения звеном 3 поверхности внешнего объекта (рисунок 4, *e*). В процессе обхвата последовательно меняется объект управления – выходное звено от звена 1 до звена 3.

Стадия обхвата, фиксированного на опоре внешнего объекта, завершена. Углы поворота выходных звеньев φ_{iK} определяются контуром поверхности внешнего объекта, то есть условиями, возникшими в процессе обхвата.

Алгоритм обхвата реализуется в одно действие без организации обратной связи по переменным параметрам $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и углу поворота ведущего звена привода.

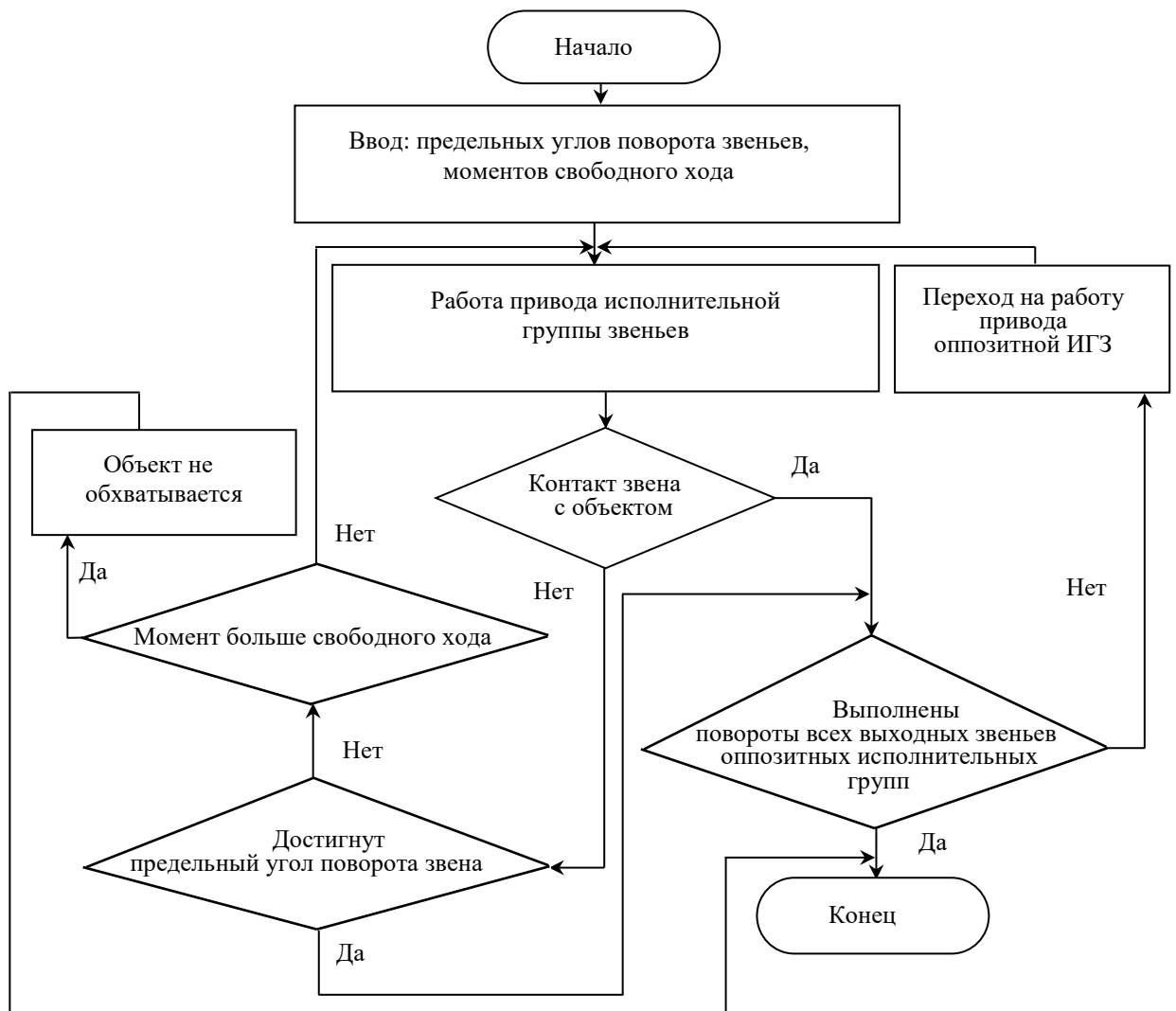
4.4 Алгоритм управления исполнительными группами звеньев при обхвате свободного внешнего объекта без изменения его положения на опоре

В общем виде задача формулируется в виде разработки алгоритма управления двигателями двух оппозитных исполнительных групп звеньев ($j = 2$) при обхвате свободного (не зафиксированного) на опоре внешнего объекта без изменения его положения на опоре. В данном случае следует реализовать согласованное движение оппозитных исполнительных групп звеньев. В полном соответствии с определением ISO 8373: 2012, 5.36 должно осуществляться адаптивное управление – «при котором параметры системы управления регулируются в зависимости от условий, обнаруженных в процессе движения».

Алгоритм (рисунок 4.3, а, б) основан на непрерывном контроле и анализе изменения двух типов параметров: углов относительного поворота выходных звеньев и моментов в кинематических парах. Обхват в общем случае завершается после достижения поверхности внешнего объекта тремя звеньями каждой исполнительной группы. Это определяется выполнением цикла по параметру i . В таблице 4.1 представлены используемые в блок - схеме идентификаторы.

Таблица 4.1 –Принятые идентификаторы

Символ	Определение
γ_{jt}	Текущее значение угла поворота j ведущего звена привода
φ_{ij}	Угол поворота i выходного звена j исполнительной группы звеньев
$[T_{ij}]$	Тестовое значение сопротивления движению i звена в кинематической паре СПД (при $i = 1$, пара А; $i = 2$, пара В; $i = 3$, пара С)
T_{ij}	Текущее значение момента на двигателе (ведущем звене привода) j исполнительной группы при движении i звена
$[\varphi_{iП}]$	Предельно допустимый угол поворота i выходного звена
φ_{ijk}	Значение угла поворота i выходного звена j исполнительной группы, соответствующее остановке звена: на объекте или при достижении предельно допустимого значения $[\varphi_{iП}]$
$\Delta\gamma_j$	Изменение (увеличение) угла ведущего звена привода j исполнительной группы звеньев



а

На этапе обхвата усилия, создаваемые выходными звеньями, не контролируются. При оценке базовых технических характеристик исполнительской группы звеньев определяется момент сопротивления движению в каждой кинематической паре в среде функционирования $[T_{ij}]$, приведенный к валу двигателя.

В пределах каждого цикла выполняется контроль достижения внешнего объекта очередным выходным звеном. Условие достижения определяется по величине соотношения момента сопротивления движению, действующего в кинематической паре к тестовому значению.

Стратегия обхвата, заложенная в алгоритме, обеспечивает последовательный контакт i звена каждой исполнительской группе. Отображение выполняемых решений, в соответствии с алгоритмом, представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Интерпретация этапов управления двигателями

Этап	Выполняемые действия	Принятые решения	
		Да	Нет
$k1$	Одновременная работа приводов исполнительских групп 1, 2. Движение i звеньев	Переход на этап a	
a	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 1 предельных углов поворота	Предельный угол поворота. Остановка привода исполнительской группы 1, переход к этапу e .	Переход к этапу b . Контроль достижения i звеном исполнительской группы 1, 2 внешнего объекта
b	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 1 внешнего объекта	Звено i исполнительской группы 1 достигло внешнего объекта. Остановка привода, переход к этапу c	Переход к этапу d
c	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 2 внешнего объекта	Звено i достигло внешнего объекта. Остановка двигателя. Переход к блоку g	Переход к блоку $k2$. Остановка движения привода исполнительской группы 1.
d	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 2 объекта	Останов привода исполнительской группы 2. Переход на этап $k3$	Продолжение движения i звеньев
e	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 2 предельного положения	Работа приводов исполнительских групп 1, 2. Переход к движению звеньев $i + 1$	Переход к этапу d . Контроль достижения звеном исполнительской группы 2 внешнего объекта

Продолжение табл. 4.2

$k2$	Работа привода исполнительской группы 2. Привод исполнительской группы 1 остановлен	Переход на этап f . Проверка достижения i звеном исполнительской группы 2 внешнего объекта	
f	Анализ достижения звеном исполнительской группы 2 внешнего объекта	Восстановление базового режима движения приводов. Переход к движению звеньев $i + 1$ исполнительской группы 1, 2.	Переход к блоку l . Контроль достижения i звеном исполнительской группы 2 предельного угла
l	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 2 предельного угла	Звено i на внешнем объекте. Остановка двигателей. Переход к блоку g	Переход на $k3$. Движение i звена исполнительской группы 2
g	Контроль за завершением движения всеми звеньями исполнительских групп 1, 2	Обхват завершен	Переход на $k1$. Восстановление базового режима движения приводов.
r	Анализ движения i звена исполнительской группы 1	Звено i на внешнем объекте. Останов двигателей. Переход к блоку g	Переход на этап $k3$. Движение i звена исполнительской группы 1
$k3$	Работа привода исполнительской группы 1.	Переход на этап n	
n	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 1 внешнего объекта	Звено i на внешнем объекте. Переход к блоку g	Переход на этап m . Контроль достижения предельного угла
m	Анализ достижения i звеном исполнительской группы 1 предельных углов поворота	Звено i на внешнем объекте. Останов двигателей. Переход к блоку g	Переход $k3$. Движение i звена исполнительской группы 1

4.5 Управление усилием на выходном звене адаптивной исполнительской группы при удержании объекта

4.5.1 Алгоритм непрямого управления усилием на выходном звене при удержании внешнего объекта

После завершения этапа обхвата на объект может одновременно воздействовать несколько выходных звеньев. При этом наибольшая по величине сила создается замыкающим звеном I . Под ним понимается звено, контактирующее с внешним объектом и имеющее наибольший порядковый номер выходного звена i . Это звено является объектом управления. Параметром управления на данном этапе выступает сила F_I , создаваемая замыкающим звеном на внешний объект. Ее величина может задаваться

изначально или определяться из условия отсутствия смещения внешнего объекта при его перемещении [153].

Замыкающим звеном может быть любое из выходных звеньев. В связи с этим для контроля величины F_I необходимо оснащение каждого из них силовыми датчиками. Однако их габариты существенно превышают размеры выходных звеньев. Это делает задачу управления силой F_I , при традиционном подходе и имеющемся аппаратном оснащении, нереализуемой.

Для разрешения возникшей ситуации предлагается использовать непрямой метод контроля и управления силой R_I на основе анализа текущего значения, приведенного к валу двигателя, моменту $T_{\text{пк}}$. [154, 155]. Его величина рассчитывается по требуемой величине усилия на управляемом звене R_I . Параметром управления в этом случае является величина момента на двигателе T_D , а контролируемым параметром является δT :

$$\delta T = T_D - T_{\text{пк}} , \quad (4.5)$$

где $T_{\text{пк}}$ – значение приведенного момента, рассчитанного по требуемому усилию R_I для соответствующего варианта обхвата внешнего объекта выходными звеньями.

Приведенный момент $T_{\text{пк}}$ определяется текущими значениями углов поворота выходных звеньев φ_i , звеном, являющимся управляемым, то есть вариантом взаимодействия выходных звеньев и внешнего объекта:

$$T_{\text{пк}} = f(\varphi_i, R_I, I) . \quad (4.6)$$

При таком подходе для управления усилием R_I достаточно осуществлять контроль и управление моментом на двигателе T_D любым известным образом. Исключается необходимость оснащения выходных звеньев устройствами регистрации силы R_I .

Величина приведенного момента $T_{\text{пк}}$ определяется конструкцией системы передачи движения, текущим значением обобщенных координат, управляемым звеном I , способом введения дополнительных связей

функционирования и положением точек контакта внешнего объекта со звеном I.

Для реализации метода требуется аппаратное оснащение, включающее: датчики контакта на выходных звеньях, энкодер, регистрирующий углы относительного поворота выходных звеньев (установлен на двигателе), система регистрации момента на двигателе. Перечисленные компоненты в настоящее время устанавливаются на всех типах захватов.

Алгоритм непрямого управления усилием R_I должен учитывать все возможные варианты взаимодействия звеньев исполнительной группы звеньев с внешним объектом (рисунок 4.4). В дальнейших изложениях использованы обозначения: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - текущие значения угла поворота выходных звеньев; $\varphi_{1П}, \varphi_{2П}, \varphi_{3П}$ - предельно допустимые значения углов поворота выходных звеньев; l_1, l_2, l_3 - длины выходных звеньев; $l_{AD}, l_{BJ}, l_{JH}, l_{CH}$ - длины рычагов системы передачи движения; ρ - угол, определяющий положение рычага на третьем выходном звене; l_A, l_B, l_C - расстояние от точки контакта на выходном звене до центра кинематической пары.

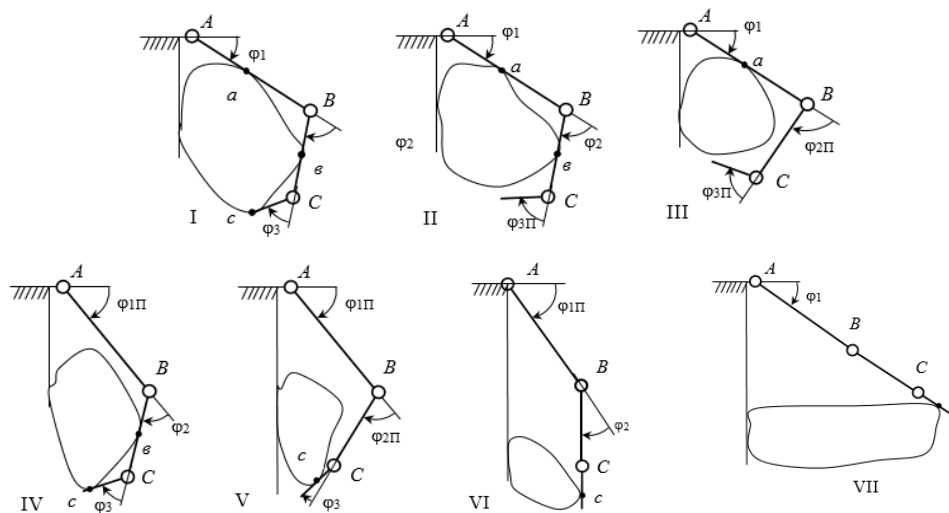
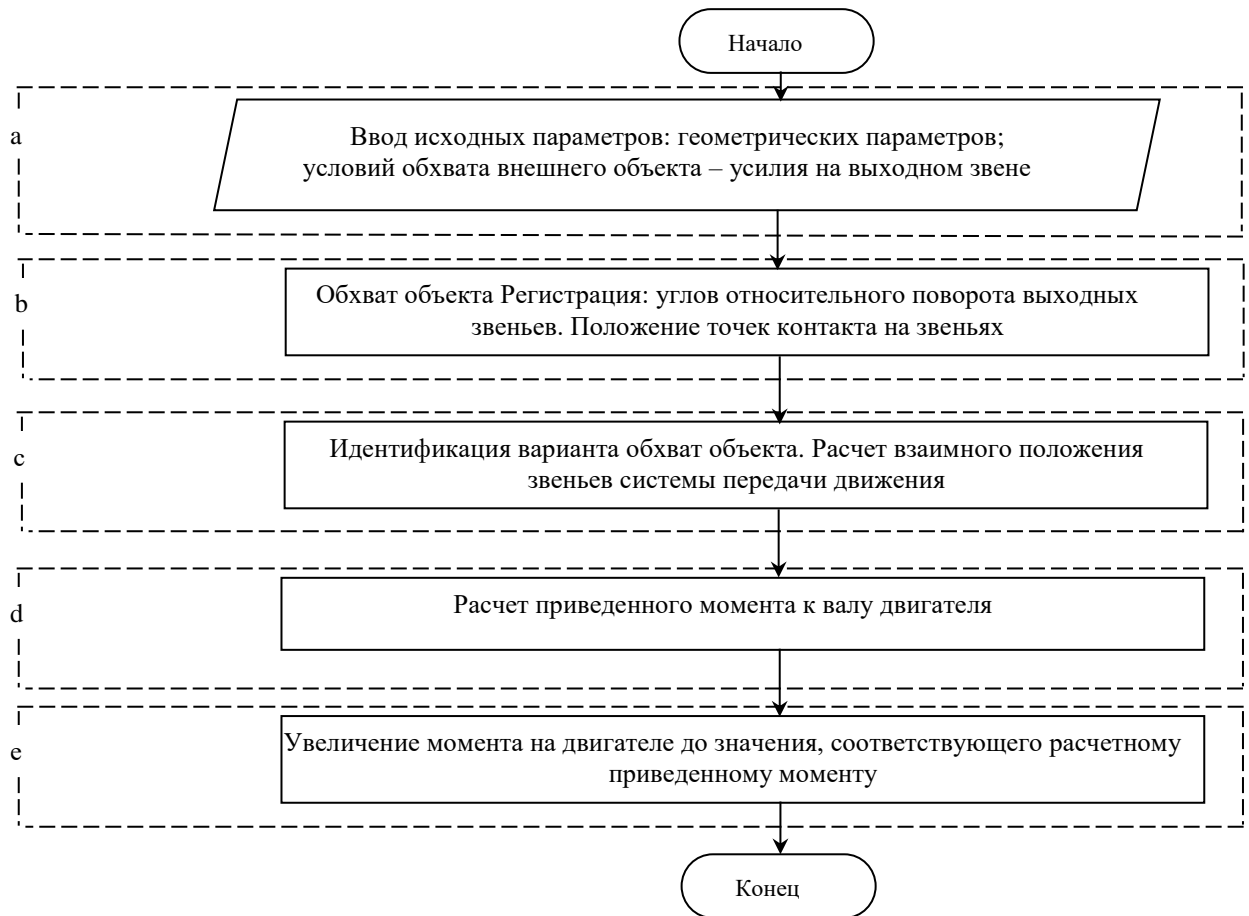


Рисунок 4.4 – Варианты взаимодействия выходных звеньев с внешним объектом на этапе его удержания: I – контакт звеньев 1, 2, 3; II – контакт звеньев 1, 2; III – контакт звена 1; IV – контакт звеньев 2, 3; V – контакт звена 3 (при повороте звеньев 1, 2 на предельно допустимые углы); VI – контакт звена 3 без его относительного поворота; VII – звено без относительного поворота звеньев 2, 3

Алгоритм непрямого управления предполагает последовательное решение нескольких задач (рисунок 4.5) [154]. На рисунке 4.5, а представлена укрупненная блок схема. На рисунке 4.5, б – детализированная.



а

Рисунок 4.5. Продолжение

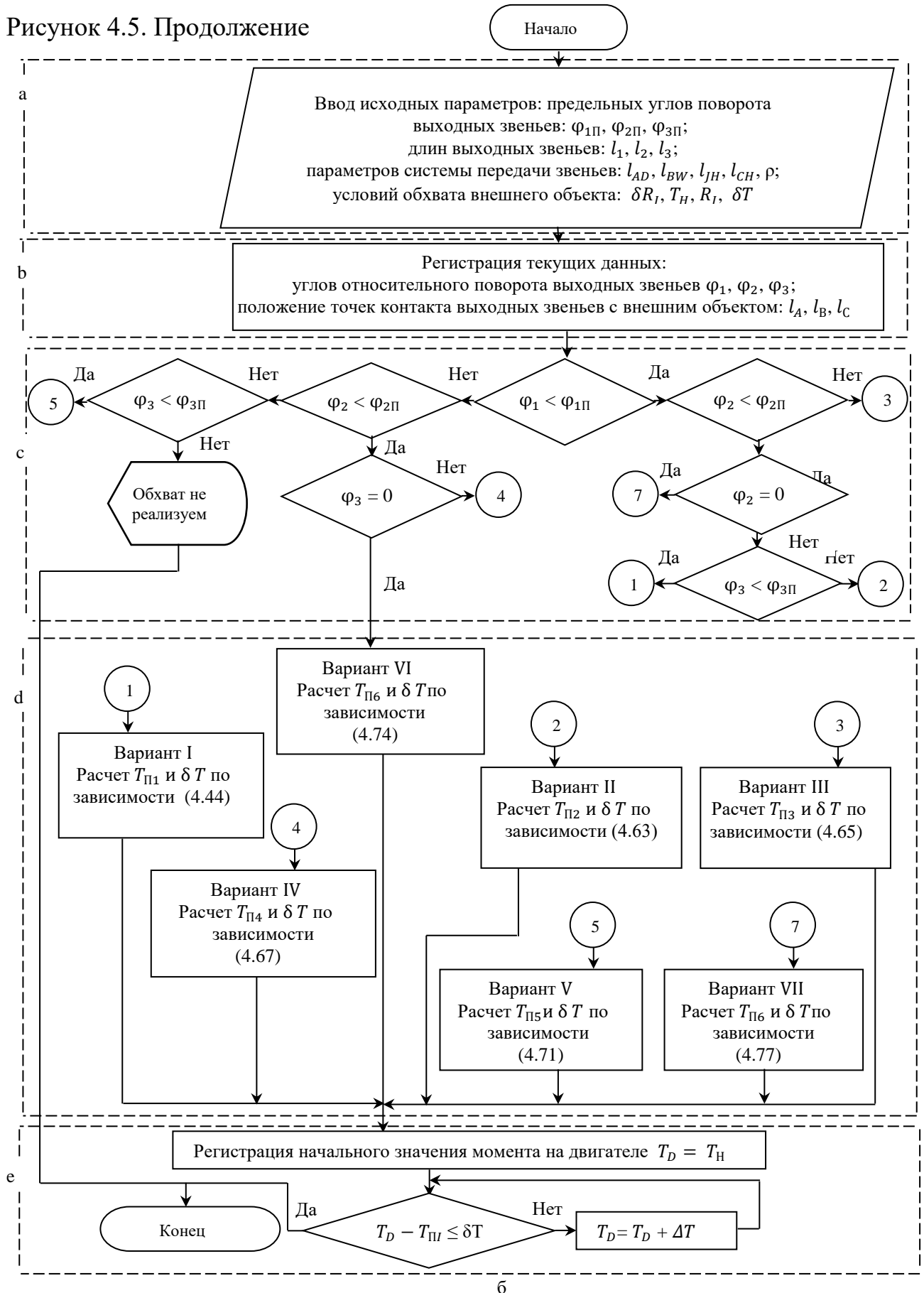


Рисунок 4.5 - Блок – схема алгоритма непрямого управления усилием R_I на объекте, создаваемом замыкающим звеном I : а – укрупненная; б – развернутая

Блок *a*. Ввод исходных параметров: предельно допустимых углов поворота выходных звеньев - $\varphi_{1П}, \varphi_{2П}, \varphi_{3П}$; длин выходных звеньев - l_1, l_2, l_3 ; параметров системы передачи звеньев - $l_{AD}, l_{BJ}, l_{JH}, l_{CH}, \rho$; величина шага изменения момента на двигателе - ΔT ; начальное значение момента на двигателе на этапе завершения обхвата - T_H ; заданная величина силы на управляемом звене - R_J ; допустимая величина расхождения фактической величины силы на управляемом звене от заданной - δR_J .

Блок *b*. Регистрация углов относительного поворота выходных звеньев $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, положение точек контакта выходных звеньев с объектом l_A, l_B, l_C .

Блок *c*. Идентификация варианта обхвата внешнего объекта, определение замыкающего звена I .

Блок *d*. Расчет момента на выходном звене привода $T_{Пк}$ (k – индекс варианта обхвата).

Блок *e*. Управление значением момента на двигателе T_D , где δT - величина допустимого отклонения приведенного момента, рассчитываемая через δR_I .

На основании текущего анализа углов относительного поворота выходных звеньев (блок *c*) идентифицируется вариант обхвата из вариантов, представленных на рисунке 4.4. Регистрация положения точки контакта выходного звена с внешним объектом выполняется автоматически. Последовательный раздельный поворот выходных звеньев позволяет рассчитывать углы относительного поворота φ_2 и φ_3 .

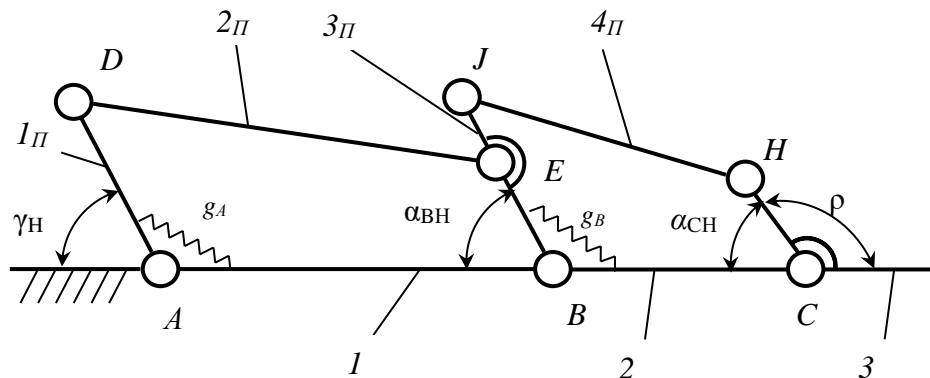


Рисунок 4.6 - Кинематическая схема исполнительной группы звеньев в исходном положении: 1, 2, 3 – выходные звенья; 1_П, 2_П, 3_П, 4_П – звенья системы передачи движения; g_A, g_B – связи функционирования (пружины)

При этом используются ранее полученные аналитические зависимости в разделах 3.3.4 и 3.3.5, заложенные в программу «Моделирование антропоморфного захвата» [147]. Исходным при этом является значение угла поворота ведущего звена AD (см. рисунок 3.15, 4.6), регистрируемое энкодером, и сигналы, фиксирующие касания проксимального и медиального звеньев.

Расчет момента $T_{Пк}$, приведенного к входному звену, приводом выполняется по соответствующей аналитической зависимости, учитывающей совокупность факторов: используемую систему передачи движения, способ введения дополнительных связей функционирования.

В дальнейшем аналитические зависимости приведенного момента $T_{Пк}$ формируются применительно к системе передачи движения рычажного типа.

4.5.2 Аналитические зависимости приведенного момента на двигателе от усилия на выходном звене исполнительной группы

4.5.2.1 Зависимости, определяющие расчетное положение звеньев исполнительной группы и дополнительных связей функционирования

Исходное положение звеньев является общим для всех возможных вариантов обхвата (см. рисунок 4.6). Выходные звенья имеют относительные углы поворота φ_i , равные нулю. Такое положение выходных звеньев является общим. Учет начальных значений углов, обоснованных в главе 3, выполняется прибавлением их к фактическому углу относительного поворота. Длины звеньев основной кинематической цепи и системы передачи движения, наряду с углом ρ , определяют положение звеньев системы передачи движения, начальный угол γ_H и ведущего звена привода – 1п [156].

Зависимость начального угла γ_H ведущего звена в исходном положении от параметров исполнительной группы звеньев имеет вид

$$\gamma_H = \arccos \frac{l_{DE}^2 + l_{AD}^2 - l_{AB}^2 - l_{BE}^2 + 2 l_{AB} l_{BE} \cos \alpha_{BH}}{2 l_{AD} (l_{AB}^2 + l_{BE}^2 - 2 l_{AB} l_{BE} \cos \alpha_{BH})^{0,5}} +$$

Зависимости (4.7) и (4.9) являются общими для всех вариантов удержания внешнего объекта при соответствующей подстановке значений углов.

В дальнейших расчетах будет использоваться угол, определяющий взаимное расположение звена JH относительно звена CH - α_{HK} (см. рисунок 4.7). Его величина определяется по теореме косинусов из рассмотрения треугольников CJB и CJH , имеющих общую сторону CG :

$$\alpha_{HK} = \arccos ((l_{CH}^2 + l_{JH}^2 - l_{CJ}^2)/(2 l_{CH} l_{JH})), \quad (4.11)$$

где

$$l_{CJ}^2 = l_2^2 + l_{BJ}^2 - l_2 l_{BJ} \cos(\alpha_{BK} - \varphi_2). \quad (4.12)$$

Исходная кинематическая схема обладает двумя избыточными подвижностями [114]. Адаптивное функционирование исполнительной группы звеньев обеспечивается за счет введения двух дополнительных связей функционирования, выполненных в виде пружин - g_A , g_B . В исходном положении, в силу отсутствия поворота звеньев системы передачи движения относительно выходных, пружины не деформированы и не создают силового воздействия звенья.

При обхвате внешнего объекта дополнительные связи функционирования формируют силовое взаимодействие выходных звеньев и звеньев системы передачи движения. Его величина определяется изменением их относительного положения. В связи с этим на предварительном этапе определяется величина деформации пружин как функция параметров кинематической схемы исполнительной группы звеньев.

После остановки выходного звена 1 на внешнем объекте дальнейшее движение звеньев системы передачи движения сопровождается сжатием пружины g_A , установленной между звеньями 1 и 1п. Величина момента пропорциональна угловой жесткости пружины σ_A и разности углов $\Delta\alpha_A = \alpha_{AK} - \alpha_{AH}$:

$$T_{1,1п} = -T_{1п,1} = \Delta\alpha_A \sigma_A. \quad (4.13)$$

$$\Delta\alpha_{AK} = (\pi - (\gamma - \varphi_1)). \quad (4.14)$$

После остановки звена 2 реализуется движение звеньев системы передачи движения и звена 3 с одновременным сжатием пружины g_B и создается момент:

$$T_{2,3п} = -T_{3п,2} = \Delta\alpha_B \sigma_B, \quad (4.15)$$

$$\Delta\alpha_B = \alpha_{BK} - \alpha_{BH}. \quad (4.16)$$

Моменты, определяемые зависимостями (4.13) и (4.15), являются общими для всех вариантов обхвата.

4.5.2.2 Зависимости приведенного момента при контакте трех выходных звеньев на объекте управления

Этап удержания характеризуется неизменным относительным положением выходных звеньев. В связи с этим исполнительная группа звеньев может быть представлена как неподвижная и находящаяся в состоянии равновесия.

Наиболее общим случаем является вариант контакта всех трех выходных звеньев с внешним объектом (вариант 1). На рисунке 4.7 представлена схема нагружения исполнительной группы звеньев, соответствующая завершению процесса обхвата ими объекта.

Алгоритм определения приведенного (движущего) момента T_{II} основывается на последовательном рассмотрении условия равновесия групп звеньев, начиная с той, в состав которой входит управляемое звено 3 (рисунок 4.8, а).

Группа включает звено 3 и звено 4п. При выделении рассматриваемой группы действия звеньев, не вошедших в нее, заменяются нормальной и тангенсальной составляющими: со стороны звена 2 на звено 3 - R_{23}^n, R_{23}^t (вдоль и поперек звена 2), со стороны звена 3п на звено 4п - $R_{3п,4п}^n, R_{3п,4п}^t$.

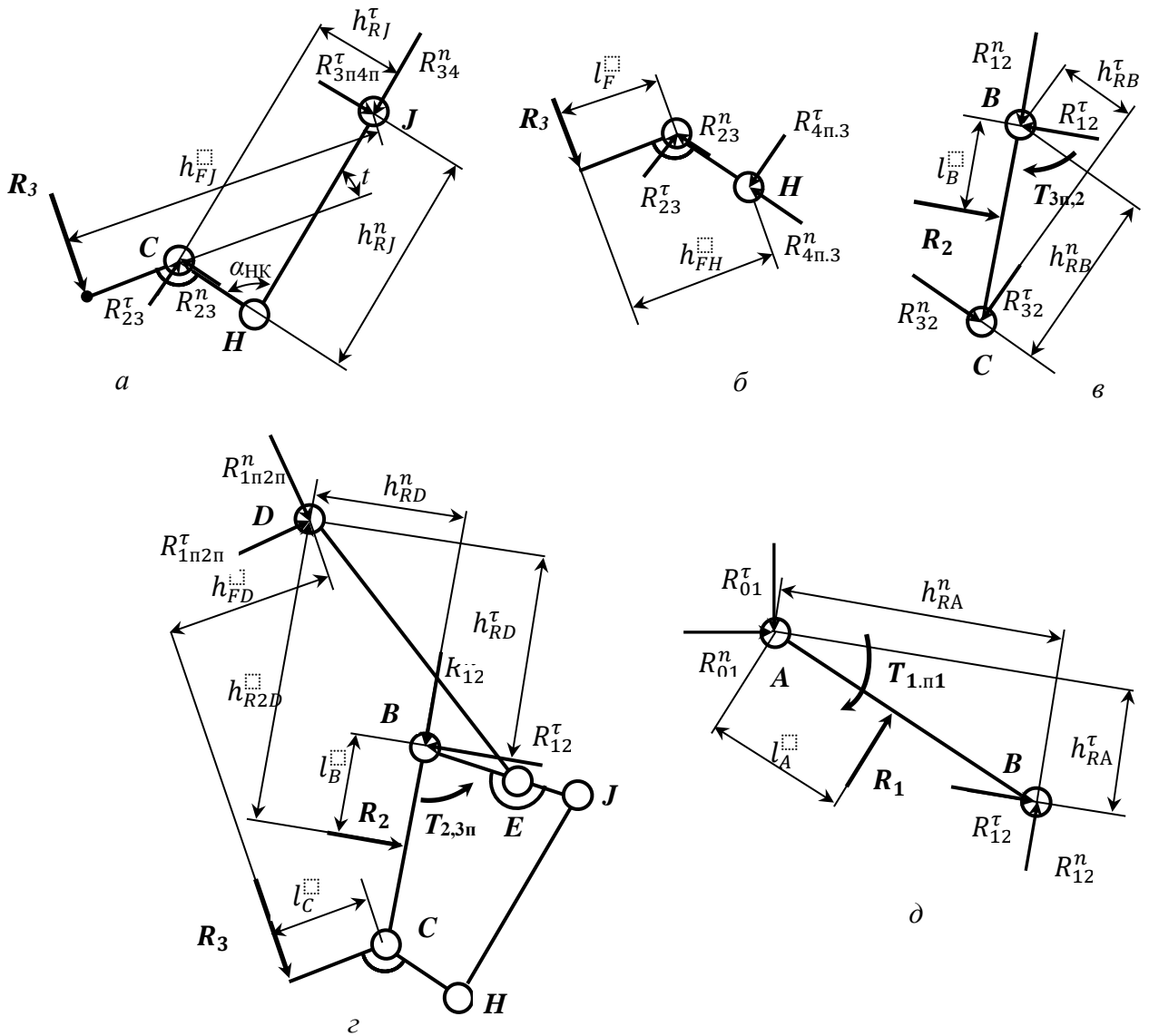


Рисунок 4.8 - Нагружение групп звеньев: а - 3, 4п; б - 3; в - 2; г - 2, 3, 2п, 3п, 4п; д - 1

На группу звеньев действует четыре неизвестных составляющих реакций в кинематических парах С и J. Трех уравнений связи недостаточно. В связи с этим предварительно рассматривается условие равновесия звена 3 (группа включает звено 3 и звено 4п). При выделении рассматриваемой группы действия звеньев, не вошедшие в нее, заменяются нормальной и тангенсальной составляющими: со стороны звена 2 на звено 3 - R_{23}^n, R_{23}^τ (вдоль и поперек звена 2), со стороны звена 3п на звено 4п - $R_{3п.4п}^n, R_{3п.4п}^\tau$. На группу звеньев действует четыре неизвестных составляющих реакций в кинематических парах С и J. Трех уравнений связи недостаточно. В связи с этим предварительно рассматривается условие равновесия звена 3 (группа

включает звено 3 и звено 4п). При выделении рассматриваемой группы действия звеньев, не вошедших в нее, заменяются нормальной и тангенсальной составляющими: со стороны звена 2 на звено 3 - R_{23}^n, R_{23}^t (вдоль и поперек звена 2), со стороны звена 3п на звено 4п - $R_{3п.4п}^n, R_{3п.4п}^t$. На группу звеньев действует четыре неизвестных составляющих реакций в кинематических парах C и J . Трех уравнений связи недостаточно. В связи с этим предварительно рассматривается условие равновесия звена 3 (группа включает звено 3 и звено 4п). При выделении рассматриваемой группы действия звеньев, не вошедших в нее, заменяются нормальной и тангенсальной составляющими: со стороны звена 2 на звено 3 - R_{23}^n, R_{23}^t (вдоль и поперек звена 2), со стороны звена 3п на звено 4п - $R_{3п.4п}^n, R_{3п.4п}^t$. На группу звеньев действует четыре неизвестных составляющих реакций в кинематических парах C и J . Трех уравнений связи недостаточно. В связи с этим предварительно рассматривается условие равновесия звена 3 (группа включает звено 3 и звено 4п). При выделении рассматриваемой группы действия звеньев, не вошедших в нее, заменяются нормальной и тангенсальной составляющими: со стороны звена 2 на звено 3 - R_{23}^n, R_{23}^t (вдоль и поперек звена 2), со стороны звена 3п на звено 4п - $R_{3п.4п}^n, R_{3п.4п}^t$. На группу звеньев действует четыре неизвестных составляющих реакций в кинематических парах C и J . Трех уравнений связи недостаточно. В связи с этим предварительно рассматривается условие равновесия звена 3 (рисунок 4.8, б).

На звено 3 также действует четыре неизвестных: R_{23}^n, R_{23}^t – в кинематической паре C (вдоль и поперек CH), $R_{4п.3}^n, R_{4п.3}^t$ – в кинематической паре H (вдоль и поперек части CH). Однако на данном этапе достаточно определить R_{23}^t . Из условия равновесия выделенного звена 3 (см. рисунок 4.8, б) в форме суммы моментов относительно точки H

$$\Sigma M_H = R_3 h_{FH} - R_{23}^t l_{CH} = 0 \quad (4.17)$$

следует

$$R_{23}^{\tau} = R_3 h_{FH} / l_{CH} , \quad (4.18)$$

$$h_{FH} = l_C - l_{CH} \cos \rho , \quad (4.19)$$

где l_C - расстояние от точки контакта звена 3 с внешним объектом (рисунок 4.8, б) до центра кинематической пары C .

Возвращаясь к группе звеньев 3, 4п, из условия равновесия в виде суммы моментов относительно точки J определяется R_{23}^n :

$$\Sigma M_J = R_3 h_{FJ} - R_{23}^{\tau} h_{RJ}^{\tau} - R_{23}^n h_{RJ}^n = 0 , \quad (4.20)$$

$$R_{23}^n = (R_3 h_{FJ} - R_{23}^{\tau} h_{RJ}^{\tau}) / h_{RJ}^n , \quad (4.21)$$

$$h_{RJ}^n = l_{HJ} \sin \alpha_{HK} , \quad (4.22)$$

$$h_{RJ}^{\tau} = ((l_{CH} - l_{HJ} \cos \alpha_{HK})^2)^{0,5} , \quad (4.23)$$

$$h_{FJ} = l_C - l_{CH} \cos \rho + l_{HJ} \cos t , \quad (4.24)$$

$$t = \rho - \alpha_{HK} . \quad (4.25)$$

Далее из условия равновесия звена 2 (рисунок 4.8, в) в форме уравнения моментов относительно точки B определяется R_2 . На звено 2 действуют со стороны звена 3 реакции $R_{32}^{\tau} = -R_{23}^{\tau}$, $R_{32}^n = -R_{23}^n$. Особенностью нагружения звена 2 является наличие момента $T_{2,3п}$ как результат принятой системы введения дополнительных связей функционирования [120].

$$\Sigma M_B = -T_{2,3п} - R_{32}^{\tau} h_{RB}^{\tau} + R_{32}^n h_{RB}^n + R_2 l_B = 0 , \quad (4.26)$$

$$R_2 = (T_{2,3п} + R_{32}^{\tau} h_{RB}^{\tau} - R_{32}^n h_{RB}^n) / l_B = 0 , \quad (4.27)$$

$$h_{RB}^{\tau} = l_{BC} \sin(\rho - \varphi_2) , \quad (4.28)$$

$$h_{RB}^n = l_{BC} \cos(\rho - \varphi_2) . \quad (4.29)$$

Из условия равновесия звена 2 относительно точки C определяется тангенсальная составляющая реакции со стороны звена 1 на звено 2:

$$\Sigma M_C = -T_{2,3п} + R_{12}^{\tau} l_{BC} - R_2 (l_{BC} - l_B) = 0 , \quad (4.30)$$

$$R_{12}^{\tau} = (T_{2,3п} + R_2 (l_{BC} - l_B)) / l_{BC} . \quad (4.31)$$

Значение R_{12}^n определяется из условия равновесия группы звеньев 2, 3, 2п, 3п, 4п (рисунок 4.8, г) в форме уравнения моментов относительно точки D

$$\Sigma M_D = R_2 h_{R2} + R_3 h_{FD} - R_{12}^{\tau} h_{RD}^{\tau} - R_{12}^n h_{RD}^n - T_{2.3\Pi} = 0, \quad (4.32)$$

$$R_{12}^n = (R_2 h_{R2D} + R_3 h_{FD} - R_{12} h_{RD}^{\tau} - T_{2.3\Pi}) / h_{RD}^n = 0, \quad (4.33)$$

где

$$h_{RD}^{\tau} = l_{AB} \cos \varphi_2 + l_{AD} \sin (\varphi_1 + \varphi_2 - \gamma_K + 1,5\pi). \quad (4.34)$$

$$h_{R2D} = l_B + h_{RD}^{\tau}, \quad (4.35)$$

$$h_{RD}^n = l_{AB} \cos \varphi_2 + l_{AD} \cos (\varphi_1 + \varphi_2 - \gamma_K + 1,5\pi). \quad (4.36)$$

Для определения значения плеча h_{FD} воспользуемся соотношением, определяющим зависимости проекции условного векторного контура (рисунок 4.9), из которого следует

$$h_{FD} = l_C + CB^I + BA^I + AD^I, \quad (4.37)$$

$$h_{FD} = l_F + l_{CB} \cos \varphi_3 + l_{AB} \cos (\varphi_1 + \varphi_2) + l_{AD} \cos (\alpha_{AK} - \varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.38)$$

Далее из условия равновесия звена 1 относительно точки A определяется значение R_1 (рисунок 4.8, д):

$$\Sigma M_A = -T_{1,1\Pi} + R_1 l_A + R_{12}^n h_{RA}^n + R_{12}^{\tau} h_{RA}^{\tau} = 0, \quad (4.39)$$

$$R_1 = (T_{1,1\Pi} - R_{12}^n h_{RA}^n - R_{12}^{\tau} h_{RA}^{\tau}) / l_A, \quad (4.40)$$

где

$$h_{RA}^n = l_{AB} \sin \varphi_2, \quad (4.41)$$

$$h_{RA}^{\tau} = l_{AB} \cos \varphi_2. \quad (4.42)$$

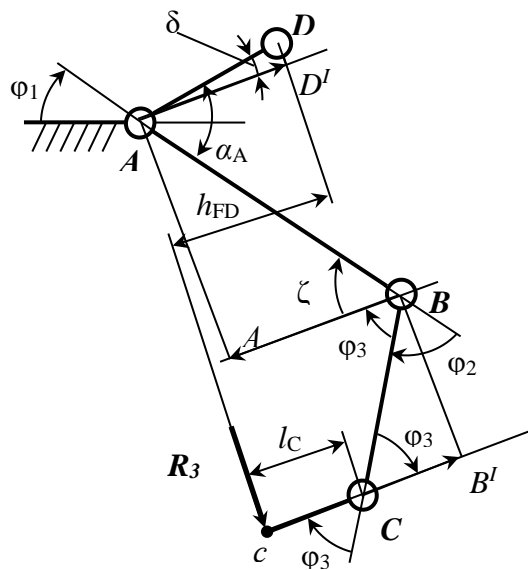


Рисунок 4.9 – К определению плеча действия силы R_3

Найденные реакции со стороны внешнего объекта на звенья 1 и 2 - R_1 , R_2 позволяют перейти к рассмотрению условия равновесия всей исполнительной группы звеньев и определить движущий момент $T_{П1}$ (рисунок 4.10).

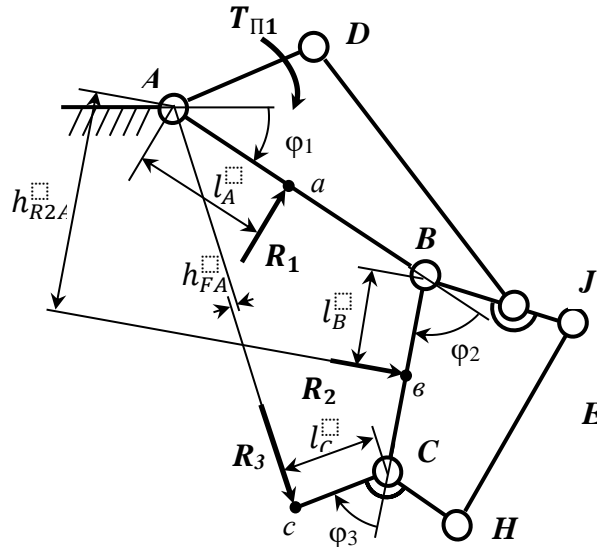


Рисунок 4.10 – Схема нагружения исполнительной группы звеньев при варианте I взаимодействия с внешним объектом

Из условия равновесия относительно точки A исполнительной группы звеньев (рисунок 4.10) следует

$$\Sigma M_A = -T_{П1} + R_1 l_A + R_2 h_{R2A} + R_3 h_{FA} = 0, \quad (4.43)$$

$$T_{П1} = R_1 l_A + R_2 h_{R2A} + R_3 h_{FA}, \quad (4.44)$$

где

$$h_{R2A} = l_B + l_{AB} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right), \quad (4.45)$$

$$h_{FA} = l_C + l_{BC} \cos \varphi_3 - l_{AB} \cos(\pi - \varphi_2 - \varphi_3). \quad (4.46)$$

Момент $T_{П1}$ используется для расчета контролируемого параметра δT (4.5), величина которого сравнивается с допустимым отклонением приведенного момента δT . При этом расчет δT выполняется по той же

зависимости (4.40), однако вместо R_3 используется допустимая разница усилия на управляемом звене δR_I .

Полученная зависимость (4.40) позволяет рассчитать контролируемый параметр δT для варианта, в котором объектом управления является звено 3.

4.5.2.3 Определение вида зависимости приведенного момента при контакте с внешним объектом проксимального и медиального выходных звеньев

Схема нагружения для варианта II (см. рисунок 4.4, б) взаимодействия звеньев 1 и 2 с внешним объектом представлен на рисунке 4.11.

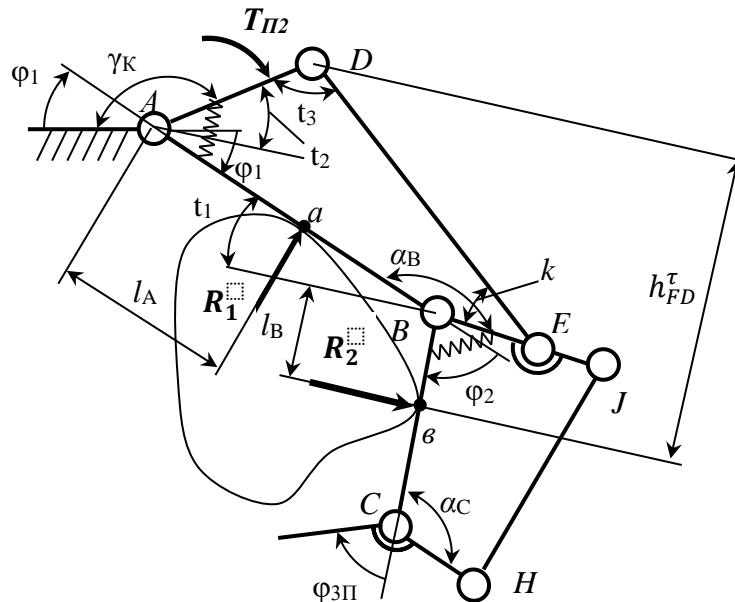


Рисунок 4.11 - Схема нагружения исполнительной группы звеньев при обхвате внешнего объекта по варианту II (см. рисунок 4.4)

В данном варианте управляемым является выходное звено 2. Однако, в силу имевшего место поворота звена 3 (на предельный угол $\varphi_{3П}$), геометрические соотношения между углами, представленными в выражениях (4.7) – (4.12), сохраняются. При этом в них следует использовать вместо угла φ_3 угол $\varphi_{3П}$.

Принципиальный подход к приведению силы, действующей в точке b (см. рисунок 4.11), не меняется. Отличающаяся схема нагружения определяет новый алгоритм деления на группы.

Из исполнительной группы звеньев выделяется группа звеньев 2, 3, 2п, 3п, 4п (рисунок 4.12, *a*). Действия звеньев, не вошедших в выделенную группу, звено 1 и звено 1п, заменяем реакциями соответственно $R_{1п.2п}^n$, $R_{1п.2п}^τ$ и $R_{1.3п}^n$, $R_{1.3п}^τ$. При этом реакции со стороны звена 1п на 2п направлены вдоль и поперек звена 2п, а со стороны 1 на 3п вдоль и поперек звена 3п.

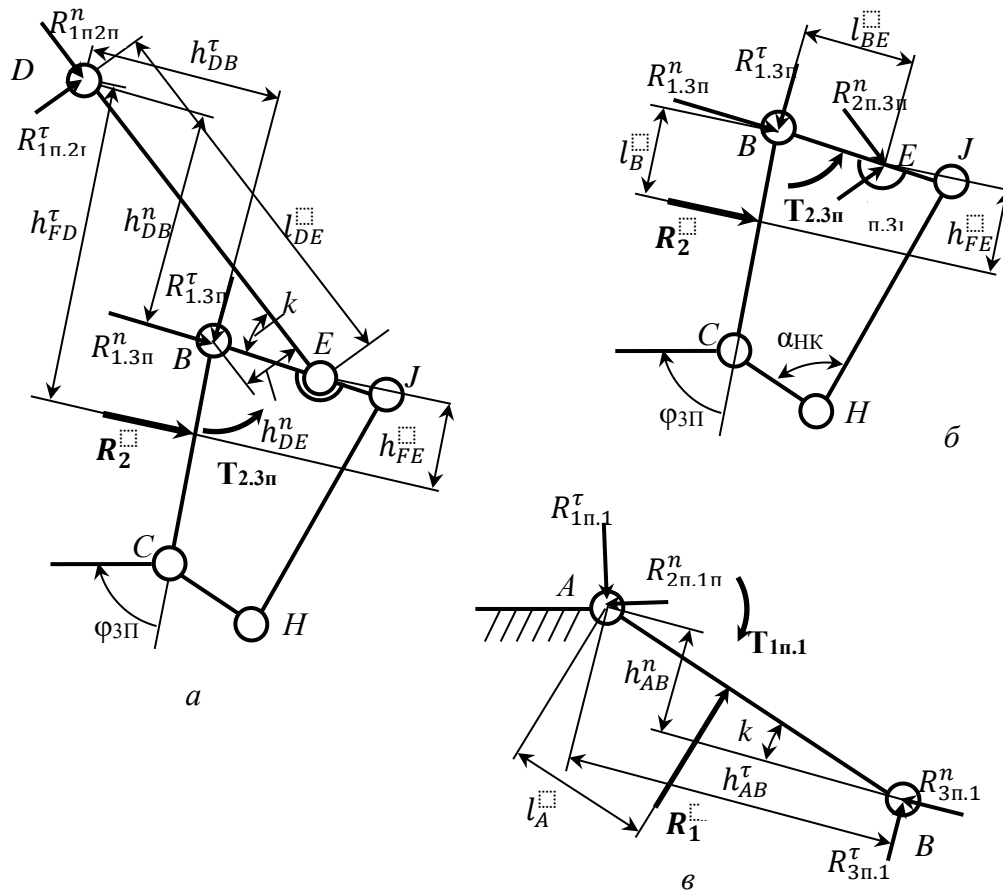


Рисунок 4.12 - Нагружение групп звеньев: *a* - 2, 3, 2п, 3п, 4п; *б* - 2, 3, 3п, 4п; *в* - 1п, 2

Неизвестная $R_{1.3п}^τ$ определяется из условия равновесия группы звеньев 2, 3, 3п, 4п (рисунок 4.12, *б*) в форме уравнения моментов относительно точки *E*:

$$\Sigma M_E = R_{1.3п}^τ l_{BE} + R_2 h_{FE} + T_{2.3п} = 0, \quad (4.47)$$

$$R_{1.3п}^τ = -(R_2 h_{FE} + T_{2.3п}) / l_{BE}, \quad (4.48)$$

где

$$h_{FE} = l_B - l_{BE} \cos(CBE). \quad (4.49)$$

Угол *CBE* определяется из рассмотрения треугольников *CJB* и *CJH*, имеющих общую сторону *CJ*. Используя теорему косинусов, получим

$$\cos(CBE) = (l_2^2 + l_{BJ}^2 - l_{HC}^2 - l_{JH}^2 + l_{BJ} l_2 \cos \alpha_{HK}) / (2 l_{BJ} l_2). \quad (4.50)$$

Из условия равновесия группы звеньев 2, 3, 2п, 3п, 4п (см. рисунок 4.12,

а) в виде уравнения равновесия относительно точки D определяется $R_{1.3п}^n$:

$$R_{1.3п}^n = (R_{1.3п}^\tau h_{DB}^\tau - T_{2,3п} - R_2 h_{FD}^\tau) / h_{DB}^n, \quad (4.51)$$

где

$$h_{DB}^\tau = l_{DE} \cos k - l_{BE}, \quad (4.52)$$

$$h_{DB}^n = l_{DE} \sin k. \quad (4.53)$$

Для определения угла k (рисунок 4.12, в) и h_{FD}^τ следует использовать информацию, представленную на рисунке 4.8:

$$h_{FD}^\tau = l_B + l_{AB} \sin t_1 + l_{AD} \sin t_2. \quad (4.54)$$

Из рассмотрения четырехугольника $ADEB$ следует

$$k = \arccos \frac{l_{AD}^2 + l_{AB}^2 - 2 l_{AD} l_{AB} \cos(\pi - (\gamma_K - \varphi_1))}{l_{DE}^2 + l_{BE}^2 - 2 l_{DE} l_{BE}}. \quad (4.55)$$

Из анализа угла ABC вытекает, что

$$t_1 = \pi/2 - \varphi_2. \quad (4.56)$$

И далее из рассмотрения угла DAB следует

$$t_2 = (\gamma_K - \varphi_1) - (\pi/2 - \varphi_2). \quad (4.57)$$

По найденным реакциям в кинематических парах из условия равновесия группы звена 1 относительно точки A , определяется реакция R_1 (рисунок 4.12, в):

$$\Sigma M_A = R_1 l_A - T_{1.1п} + R_{3п.1}^\tau h_{AB}^\tau - R_{3п.1}^n h_{AB}^n = 0, \quad (4.58)$$

$$R_1 = (T_{1.1п} - R_{3п.1}^\tau h_{AB}^\tau + R_{3п.1}^n h_{AB}^n) / l_A, \quad (4.59)$$

где

$$h_{AB}^\tau = l_{AB} \cos k, \quad (4.60)$$

$$h_{AB}^n = l_{AB} \sin k. \quad (4.61)$$

Из условия равновесия относительно точки A исполнительной группы звеньев (рисунок 4.13) следует

$$\Sigma M_A = -T_{II2} + R_1 l_A + R_2 h_{FA} = 0, \quad (4.62)$$

$$T_{II2} = R_1 l_A + R_2 h_{FA}, \quad (4.63)$$

где

$$h_{FA} = l_B + l_{AB} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_2\right). \quad (4.64)$$

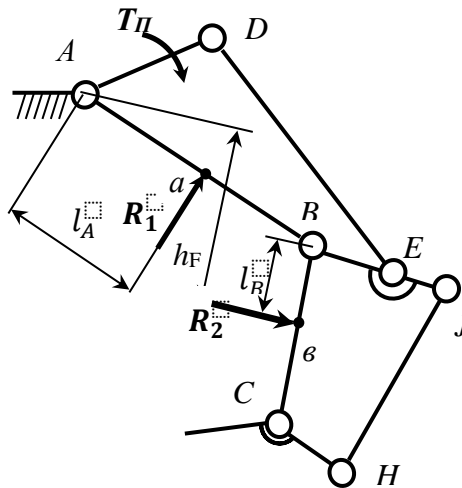


Рисунок 4.13 - Нагружение исполнительной группы звеньев при обхвате по варианту II

Аналогично ранее полученной зависимости для варианта I (4.44), момент $T_{\Pi 2}$ используется для расчета регулируемого параметра $T_D - T_{\Pi 2}$ (блок e на рисунке 4.5). Допустимое отклонение δT рассчитывается по зависимостям, совпадающим по структуре с (4.47) - (4.64), в которых вместо R_2 используется допустимая разница усилия на управляемом звене δR_1 .

4.5.2.4 Определение приведенного момента при контакте с объектом проксимального выходного звена

Вариант III (см. рисунок 4.4, б) взаимодействия звена 1 с объектом представлен на рисунке 4.14. Объект управления - выходное звено 1. Особенностью данного варианта обхвата является то, что момент, необходимый для реализации движения на конечной стадии, определяется деформацией дополнительных связей функционирования пружин g_A, g_B на предельную величину. Независимо от величины угла поворота управляемого звена 1 - φ_1 , величина момента, обусловленного их деформацией, заранее известна. При этом оно совпадает с моментом на двигателе T_H , предшествующем контакту звена AB объектом (блок a на рисунке 4.5).

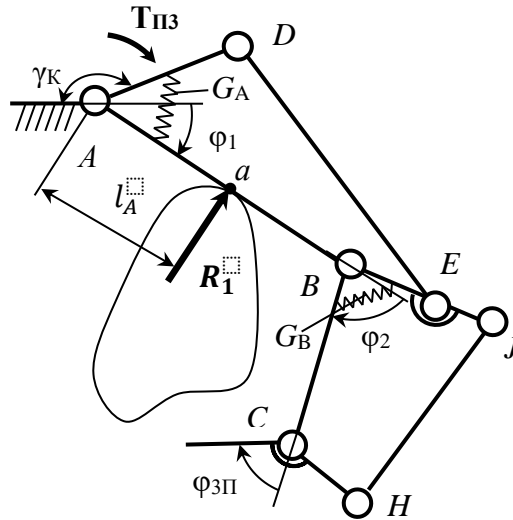


Рисунок 4.14 - Схема нагружения исполнительной группы звеньев при обхвате объекта по варианту III

Это соответствует значению на первом цикле расчета приведенного момента (блок *e* на рисунке 4.5). В связи с этим значение приведенного момента определяется только требуемым значением силы R_1 :

$$T_{ПЗ} = R_1 l_A . \quad (4.65)$$

4.5.2.5 Определение приведенных моментов для вариантов обхвата при достижении проксимальным звеном предельного положения

Общим для вариантов взаимодействия выходных звеньев IV, V, VI является поворот проксимального звена на предельно возможный угол $\varphi_{1П}$ (рисунок 4.15). Как следствие, независимо от реализуемых углов поворота звеньев 2 и 3, соответственно φ_2 , φ_3 , влияние дополнительной связи функционирования g_A на величину приведенного момента неизменно. Кроме того, во всех этих вариантах управляемым является звено 3, алгоритм определения приведенного момента в значительной части имеет совпадающую последовательность действий, аналогичную рассмотренной в 4.4.2.2.

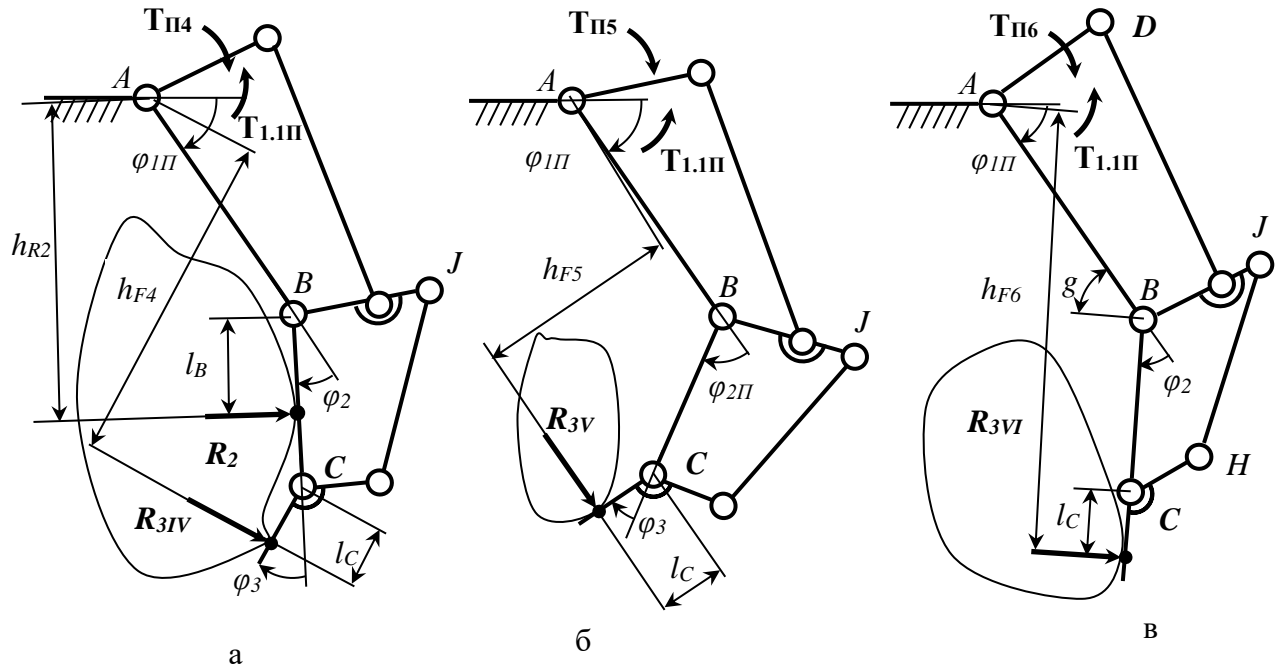


Рисунок 4.15 - Схема нагружения исполнительной группы звеньев при обхвате внешнего объекта по вариантам: а – IV; б – V; в – VI

Для варианта IV последовательность силового анализа совпадает до стадии определения реакции R_2 (см. рисунок 4.8, *м*) по зависимостям (4.17) – (4.29). Далее из условия равновесия исполнительной группы звеньев относительно центра кинематической пары A следует (рисунке 4.15, а)

$$\Sigma M_A = -T_{II4} + T_{1.1II} + R_2 h_{R2} + R_{3IV} h_{F4} = 0, \quad (4.66)$$

$$T_{II4} = R_1 l_{R1} + R_2 h_{R2} + F_{3IV} h_{F4}, \quad (4.67)$$

где

$$h_{R2} = l_B + l_1 \cos \varphi_2, \quad (4.68)$$

$$h_{F4} = l_C + l_2 \cos \varphi_3 + l_1 \cos(\varphi_2 + \varphi_3). \quad (4.69)$$

После подстановки в выражение (4.66) вместо F_{3IV} значения δF_I определяется величина допустимого отклонения приведенного момента δT .

Аналогично для варианта обхвата V (рисунок 4.15, б)

$$\Sigma M_A = -T_{II5} + T_{1.1II} + R_{3V} h_{F5} = 0, \quad (4.70)$$

$$T_{II5} = T_{1.1II} + R_{3V} h_{F5}, \quad (4.71)$$

где

$$h_{F5} = l_C + l_2 \cos \varphi_3 + l_1 \cos(\varphi_{2II} + \varphi_3). \quad (4.72)$$

функционирования g_A , g_B и, как следствие, не возникают моменты соответственно $T_{1п,1}$ и $T_{3п,2}$

Момент в кинематической паре A определяется как

$$\Sigma M_A = -T_{П7} + R_{37} (l_1 + l_2 + l_3) = 0, \quad (4.76)$$

откуда

$$T_{П7} = R_{37} (l_1 + l_2 + l_3). \quad (4.77)$$

4.6 Выводы главе 4

Анализ известных публикаций показал, что для антропоморфного захвата с групповым приводом и изменяемой структурной схемой разработаны преимущественно алгоритмы управления на этапе удержания внешнего объекта [55, 56]. Используемый в ряде хватных модулей импедансный способ управления при обхвате основан на деформируемости объекта и совместном движении с выходными звеньями, что не является общим свойством объектов [152]. Кроме того, изменение в процессе обхвата объекта управления исключает возможность использования классического замкнутого способа управления [86].

Результаты выполненных исследований:

1. Установлено, что исполнительная группа с групповым приводом и изменяемой структурой может взаимодействовать с объектом по одному из семи возможных вариантов. С учетом ограничений на углы относительного поворота выходных звеньев определяется замыкающее звено, реализующее максимальное силовое воздействие на объект. Замыкающим звеном может выступать любое из выходных звеньев.

2. Разработаны алгоритмы:

- идентификации формы недетерминированного объекта и его положение на опоре;
- непрямого управления усилием на замыкающем звене без использования датчиков силы, основанный на непрерывном анализе значения

текущего момента на двигателе и момента, рассчитанного (приведенного) по заданной величине усилия на выходном звене.

3. Получены аналитические зависимости для расчета приведенного момента к двигателю для всех семи возможных вариантов обхвата как функции: углов относительного поворота выходных звеньев; параметров рычажной системы передачи движения; предложенного способа введения дополнительной связи функционирования.

Алгоритмы учитывают особенность функционирования группового привода – изменение объектов управления в процессе обхвата. Последовательность включения двигателей оппозитных исполнительных групп звеньев определяется на основе анализа изменения условий взаимодействия с внешним объектом и оценки внутренних параметров. Это позволяет выполнять обхват и удержание недетерминированных объектов в автоматическом режиме без участия оператора.

Для работы алгоритмов необходимо минимальное аппаратное оснащение – энкодер, установленный на двигателе, и датчики контакта на поверхности выходных звеньев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена важная для развития сервисной робототехники проблема повышения эксплуатационных возможностей их захватных модулей. Совокупность разработанных моделей и алгоритмов представляет собой решение актуальной научно - технической задачи, обеспечивающей построение адаптивных антропоморфных захватных модулей с малой массой и способных взаимодействовать с недетерминированными объектами при выполнении действий в условиях, потенциально опасных для человека.

Основные результаты и итоги выполненных исследований состоят в следующем:

1. Анализ тенденций при создании антропоморфных захватных модулей показал, что повышение эффективности сервисных роботов достигается за счет перехода на новый класс механизмов с групповым приводом и изменяемой структурной схемой, что обеспечивает снижение массы модуля, возможность взаимодействия с недетерминированными объектами без участия оператора. Установлено, что не разработаны методы: исследования свойств таких механизмов, позволяющих учитывать специфику их строения, аналитического определения места введения в структуру базового элемента – дополнительной связи функционирования. Обоснована актуальность разработки методов анализа свойств нового класса механизмов, структурного и параметрического синтеза, методов управления.

2. Разработан метод анализа механизмов с изменяемой в процессе работы структурой по функциональным схемам. Выработаны правила их построения, исследования взаимодействия между выходными звеньями, звеньями системы передачи движения и внешним объектом. Доказано, что анализ исполнительных групп звеньев, выполняемый с ее использованием, обеспечивает идентификацию способа обхвата и позволяет формировать технические решения, реализующие требуемый способ обхвата: по контуру, щипковый, комбинированный, за счет установленной совокупности

необходимых конструктивных элементов - дополнительных связей строения и функционирования и мест их ведения в структурную схему.

Материалы данного раздела диссертации в виде раздела «Метод исследования механизмов с изменяемой структурой» введен в дисциплину «Основы автоматического управления», читаемую студентам по направлению подготовки 27.03.03 «Системный анализ и управление» (МИРЭА – Российский технологический университет).

3. Разработан метод структурного синтеза антропоморфного захвата, отличающийся обоснованным разделением его на независимые иерархические уровни. На каждом из них выполняется оценка возможных вариантов построения с использованием индивидуальных критериев. Получена аналитическая зависимость каждого критерия оптимальности в виде отношения показателя качества взаимодействия с объектом, обеспечиваемого на данном уровне, к совокупности затрат, выраженных через проектируемые параметры. Установлено, что оптимальной является структурная схема, имеющая попарно оппозитные четыре идентичные исполнительные группы, связанные с основанием вращательными парами V класса с параллельными осями вращения. Доказано, что из трех основных вариантов построения структуры группового привода оптимальной является схема, в соответствии с которой дополнительные функциональные связи в виде пружин вводятся между выходными звеньями и звеньями системы передачи движения.

4. Разработан метод параметрического синтеза рычажной системы передачи движения выходным звеньям, отличающийся обеспечением значения усилий на выходных звеньях, при обхвате объектов с предельными размерами, с наименьшим отклонением от среднего значения. Обоснована аналитическая форма критерия оптимальности, учитывающая величину момента, создаваемого на каждом из выходных звеньев. Отклонение значения усилий на выходных звеньях, выраженные через углы между шатуном и ведомым коромыслом, при обхвате объектов с диаметром 20 и 120 мм не превышают $34,7^{\circ}$. Метод позволяет учитывать ограничения, накладываемые

на поперечные размеры исполнительной группы, определяемые длинами звеньев системы передачи движения. Полученные значения параметров системы передачи движения обеспечивают поперечные размеры исполнительной группы в пределах 32 мм, что соответствует параметру пальца перчатки космонавта. Установленные в результате параметрического синтеза длины звеньев привода позволяют спроектировать антропоморфный захват, способный взаимодействовать с инфраструктурой космонавта. Результаты параметрического и структурного синтеза использованы в АО «НПО Андроидная техника» при выполнении ОКР «Система антропоморфная робототехническая» (Шифр СЧ ОКР – «Теледроид-НА»).

5. На основе анализа силового взаимодействия, выполненного по функциональным схемам, установлено, что введение дополнительных связей функционирования между звеньями системы передачи движения и выходными звеньями обеспечивает создание на внешнем объекте пружинами усилий, возрастающих с увеличением угла поворота последующих, не контактирующих с объектом, выходных звеньев. При этом формируются дополнительные силовые контуры, обеспечивающие распределение усилий на объект между всеми выходными звеньями. Данное свойство повышает надежность фиксации объекта между оппозитными исполнительными группами на этапе обхвата и сохраняется на этапе его удержания и кардинально отличается от известных вариантов, при которых основное усилие формируется только на выходном звене, контактирующем с объектом последним. Способ установки пружин защищен патентом на полезную модель № 185794 и используется в захватном модуле антропоморфного робота, создаваемого АО «НПО Андроидная техника» в рамках договора с ПАО «РКК «Энергия».

6. Сервисный робот взаимодействует, как правило, с недетерминированными объектами в зонах, недоступных для визуального контроля оператором. Разработанный алгоритм обхвата захватным модулем не идентифицированных объектов основан на учете специфики

функционирования группового привода с изменяемой структурой – последовательным движением выходных звеньев, начиная с проксимального. Непрерывный сравнительный анализ моментов на двигателях оппозитных исполнительных групп и основанный на этом режим их включения и выключения обеспечивают неизменное положение незакрепленного объекта при обхвате без использования дополнительных внутренних и внешних датчиков и выполняется в адаптивном режиме движения выходных звеньев. Это обеспечивает функционирование сервисного робота в условиях ограниченной видимости без участия оператора. Алгоритм использован при модернизации системы управления «Мобильного роботизированного манипулятора для работы с радиоактивными отходами», выполненного АО «НПО «Андроидная техника» для Федерального государственного унитарного предприятия «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» в рамках проекта «Каньон».

7. Расширение функциональных возможностей захватного модуля с групповым приводом обеспечивается за счет внедрения разработанного алгоритма непрямого управления заданным усилием на дистальном выходном звене, основанном на идентификации положения выходных звеньев, определении взаимного положения звеньев системы передачи движения, расчете приведенного к ведущему звену момента. Получены аналитические зависимости приведенного момента для всех возможных вариантов взаимодействия исполнительной группы с объектом. Алгоритм управления усилием без датчиков сил, устанавливаемых на выходных звеньях, использован при модернизации системы управления роботизированного манипулятора (проект «Каньон»). Это позволило дополнить существующий копирующий режим управления захватным модулем, автоматически выполняемым без участия оператора.

Теоретическое обоснование и аналитические зависимости, положенные в основу алгоритма управления заданным усилием на дистальном звене, введены в виде раздела «Алгоритмы управления движением звеньев

антропоморфного захватного модуля с изменяемой структурой при обхвате недетерминированных объектов» в дисциплины «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование», «Основы проектирования систем управления автономных роботов», читаемых студентам по направлению подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» в МИРЭА – Российский технологический университет.

Таким образом, на основе разработанных методов структурного и параметрического синтеза, алгоритмов управления захватных модулей, использующих в приводе новый класс механизмов с изменяемой в процессе работы структурной схемой, разработана концепция, направленная на создание антропоморфного захватного модуля с групповым приводом выходных звеньев исполнительной группы, способного взаимодействовать с недетерминированными объектами без участия оператора.

Результаты работы использованы при модернизации системы управления действующего захватного модуля роботизированного манипулятора и заложены в создаваемый в рамках проекта ПАО «РКК Энергия» робот космического исполнения, выполняемый АО «НПО «Андроидная техника».

Дальнейшим развитием научного направления является применение разработанных методов синтеза и алгоритмов управления при построении группового привода для параллельных исполнительных групп захватного модуля. Это позволит реализовать движение от 6 до 12 выходных звеньев от одного двигателя. Основной принцип построения адаптивного захватного модуля с общим приводом защищен патентом № 218694.

Список литературы

1. Schraft R.D., Schmierer G. Service Robots-Products, Scenarios, Visions. PETERS. – 2000.
2. Kargov, A. Development of an anthropomorphic hand for a mobile assistive robot / A. Kargov, T. Asfour, C. Pylatiuk, R. Oberle, H. Klosek, S. Schulz, K. Regenstein, G. Bretthauer // 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. – IEEE, 2005. – С. 182-186.
3. Schraft, R.D. A mobile robot platform for assistance and entertainment / R. Dieter Schraft, B. Graf, A. Traub // Industrial Robot: An International Journal. – 2001. – Т. 28. – №. 1. – С. 29-35.
4. Mousavi, M. A new method of measuring the stiffness of astronauts' EVA gloves / M. Mousavi, S. Appendino, A. Battezzato, A. Bonanno, F.C. Chen, M. Crepaldi, D. Demarchi // Acta Astronautica. – 2014. – Т. 97. – С. 130-137.
5. Carrozza, M.C. A wearable artificial hand for prosthetics and humanoid robotics applications / M.C. Carrozza, B. Massa, S. Micera, M. Zecca, P. Dario // Proceedings of the 2001 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. – 2001.
6. Kawasaki, H. Educational – industrial complex development of an anthropomorphic robot hand 'Gifu hand' / H. Kawasaki, H. Shimomura, Y. Shimizu // Advanced Robotics. – 2001. – Т. 15. – №. 3. – С. 357-363.
7. Parlaktuna, O. Adaptive control of free-floating space manipulators using dynamically equivalent manipulator model / O. Parlaktuna, M. Ozkan // Robotics and Autonomous Systems. – 2004. – Т. 46. – №. 3. – С. 185-193.
8. Бурдин, Б.В. Использование виртуальных 3D-моделей для экспериментальной отработки бортовых полетных операций, выполняемых с помощью антропоморфных роботов / Б.В. Бурдин, М.В. Михайлюк, И.Г. Сохин, М.А. Торгашев // Extreme Robotics. – 2013. – Т. 1. – №. 1. – С. 219-229.
9. Yuh, J., Underwater robotics / J. Yuh, M. West // Advanced Robotics. – 2001. – Т. 15. – №. 5. – С. 609-639.

10. Юревич, Е.И. Опыт и перспективы развития модульных робототехнических систем экстремальной робототехники / Е.И. Юревич, С.Г. Цариченко // Труды XXI Международной научно-практической конференции «Экстремальная робототехника». - СПб. – 2010. – С. 21-26.

11. Мотиенко, А.И. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения / А.И. Мотиенко, А.Л. Ронжин, Н.А. Павлюк // Системы анализа и обработки данных. – 2015. – №. 3 (60). – С. 147-165.

12. Качанов, С.А. Адаптация технологий, реализуемых при создании антропоморфных роботов и робототехнических комплексов в интересах решения задач МЧС России / С.А. Качанов, В.Б. Мошков, А.Ю. Баранник, А.В. Якутов // Технологии гражданской безопасности. – 2016. – Т. 13. – №. 4 (50). – С. 14-18.

13. Van Der Hulst, F. P. J. A functional anatomy based kinematic human hand model with simple size adaptation / F.P.J Van Der Hulst, S. Schätzle, C Preusche, A. Schiele // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2012. – С. 5123-5129.

14. You, W. S. Design of a 3D - printable, robust anthropomorphic robot hand including intermetacarpal joints / W.S. You, Y.H. Lee, H.S. Oh, G. Kang, H.R. Choi // Intelligent Service Robotics. – 2019. – Т. 12. – С. 1-16.

15. Feix, T. The grasp taxonomy of human grasp types / T. Feix, J. Romero, H.B. Schmiedmayer, A.M. Dollar, D. Kragic // IEEE Transactions on human-machine systems. – 2015. – Т. 46. – №. 1. – С. 66-77.

16. Jones L. A., Lederman, S. J. Human hand function. – Oxford university press, 2006.

17. Ciocarlie, M. Dimensionality reduction for hand-independent dexterous robotic grasping / M. Ciocarlie, C. Goldfeder, P. Allen // 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2007. – С. 3270-3275.

18. Tsagarakis, N.G. Walk-man: A high-performance humanoid platform for realistic environments / N.G. Tsagarakis, D.G. Caldwell, F. Negrello, W. Choi, L. Baccelliere, V.G. Loc, J. Noorden // *Journal of Field Robotics*. – 2017. – T. 34. – №. 7. – C. 1225-1259.

19. Kojima, K. Development of life-sized high-power humanoid robot jaxon for real-world use / K. Kojima, T. Karasawa, T. Kozuki, E. Kuroiwa, S. Yukizaki, S. Iwaishi, T. Ishikawa, R. Koyama // *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. – IEEE, 2015. – C. 838-843.

20. Kaneko, K. Humanoid robot HRP-2Kai—Improvement of HRP-2 towards disaster response tasks / K. Kaneko, M. Morisawa, S. Kajita // *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. – IEEE, 2015. – C. 132-139.

21. Stasse, O. TALOS: A new humanoid research platform targeted for industrial applications / O. Stasse, T. Flayols, R. Budhiraja, K. Giraud-Esclasse, J. Carpentier, J. Mirabel, A. Del Prete... // *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*. – IEEE, 2017. – C. 689-695.

22. Barbieri, L. Design, prototyping and testing of a modular small-sized underwater robotic arm controlled through a Master-Slave approach / L. Barbieri, F. Bruno, A. Gallo, M. Muzzupappa, M.L. Russo // *Ocean Engineering*. – 2018. – T. 158. – C. 253-262.

23. US 20140265401 A1 (L.-AA Demers, S. Lefrancois, J.-P. Jobin: Gripper having a two degree of freedom underactuated mechanical finger for encompassing and pinch grasping) // *United States*. – 2014.

24. Kok, Y.Y., Design and Evaluation of an Underactuated Adaptive Finger for Parallel Grippers / Y.Y. Kok, K.H. Low // *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. – IEEE, 2018. – C. 1615-1620.

25. Bullock, I.M. A two-fingered underactuated anthropomorphic manipulator based on human precision manipulation motions / I.M. Bullock, A.M.

Dollar // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2016. – C. 384-391.

26. Franchi, G. Technical report: use of hybrid systems to model the RobotiQ adaptive gripper / G Franchi, K Hauser // Bloomington, IN. – 2014.

27. Spiliotopoulos, J. A reconfigurable gripper for dexterous manipulation in flexible assembly / J. Spiliotopoulos, G. Michalos, S. Makris // Inventions. – 2018. – T. 3. – №. 1. – C. 4.

28. Stuart, H. The ocean one hands: An adaptive design for robust marine manipulation / H. Stuart, S. Wang, O. Khatib, M.R. Cutkosky // The International Journal of Robotics Research. – 2017. – T. 36. – №. 2. – C. 150-166.

29. Odhner, L.U. A compliant, underactuated hand for robust manipulation / L.U. Odhner, L.P. Jentoft, M.R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R.R. Ma, M. Buehler, R. Kohout // The International Journal of Robotics Research. – 2014. – T. 33. – №. 5. – C. 736-752.

30. Lee, Y.H. Design of anthropomorphic robot hand with IMC joints / Y.H. Lee, W.S. You, G. Kang, H.S. Oh // 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). – IEEE, 2016. – C. 336-337.

31. Butterfaß, J. DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand / J. Butterfaß, M. Grebenstein, H. Liu // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. – T. 1. – C. 109-114.

32. Mulsow, N.A. Underactuated gripper design for the assembly of infrastructure in space / N.A. Mulsow, P. Kampmann // Proceedings of the 14th International Symposium on Artificial Intelligence. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS-2018). – 2018.

33. Shahmohammadi, M. A series elastic, compact differential mechanism: On the development of adaptive, lightweight robotic grippers and hands / M. Shahmohammadi, M. Liarokapis // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2021. – C. 6110-6116.

34. Mizushima, K. Multi-fingered robotic hand based on hybrid mechanism of tendon-driven and jamming transition / K. Mizushima, T. Oku, Y. Suzuki, T. Tsuji, T. Watanabe // 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). – IEEE, 2018. – C. 376-381.

35. Vu, Q. A model of four-finger gripper with a built-in vacuum suction nozzle for harvesting tomatoes / Q. Vu, A. Ronzhin // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” ER (ZR) 2019, Kursk, Russia, 17-20 April 2019. – Springer Singapore, 2020. – C. 149-160.

36. Bridgwater, L. B. The robonaut 2 hand-designed to do work with tools / L.B. Bridgwater, C.A. Ihrke, M.A. Diftler, M.E. Abdallah, N.A. Radford, J.M. Rogers, S. Yayathi... // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2012. – C. 3425-3430.

37. Badger, J. ROS in space: A case study on Robonaut 2 / J. Badger, D. Gooding, K. Ensley, K. Hambuchen, A. Thackston // Robot Operating System (ROS) The Complete Reference (Volume 1). – 2016. – C. 343-373.

38. Lee, D.H. KITECH-hand: A highly dexterous and modularized robotic hand / D.H. Lee, J.H. Park, S.W. Park, M.H. Baeg, J.H. Bae // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2016. – T. 22. – №. 2. – C. 876-887.

39. Grebenstein, M. The DLR hand arm system / M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, T. Bahls // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – IEEE, 2011. – C. 3175-3182.

40. Radford, N.A. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot / N.A. Radford, P. Strawser, K. Hambuchen, J.S Mehling, W.K. Verdeyen, A.S. Donnan, J. Holley // Journal of Field Robotics. – 2015. – T. 32. – №. 3. – C. 397-419.

41. Chan, W.P. Multimodal sensing and active continuous closed-loop feedback for achieving reliable manipulation in the outdoor physical world / A. Nasrollahi, W. Deng // Journal of Field Robotics. – 2019. – T. 36. – №. 1. – C. 17-33.

42. Lange, F. Decoupled Control of Position and/or Force of Tendon Driven Fingers/ F. Lange, G. Quere, A. Raffin // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2019. – C. 1176-1182.

43. Kim, Y. J. RoboRay hand: A highly backdrivable robotic hand with sensorless contact force measurements / Y.J. Kim, Y. Lee, J. Kim, J.W. Lee, K.M. Park, K.S. Roh, J.Y. Choi // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2014. – C. 6712-6718.

44. Kim, U. Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand / U. Kim, D. Jung, H. Jeong, J. Park, H.M. Jung // Nature communications. – 2021. – T. 12. – №. 1. – C. 7177.

45. Neha, E. Grasp analysis of a four-fingered robotic hand based on matlab simmechanics / E. Neha, M. Suhaib, S. Asthana // Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME). – 2020. – T. 9. – №. 2. – C. 169-182.

46. Nanayakkara, V.K. The role of morphology of the thumb in anthropomorphic grasping: a review / V.K. Nanayakkara, G. Cotugno, N. Vitzilaios, D. Venetsanos, T. Nanayakkara, M.N. Sahinkaya // Frontiers in mechanical engineering. – 2017. – T. 3. – C. 5.

47. Fu, Y. Development of a multi-DOF exoskeleton based machine for injured fingers / Y. Fu, P. Wang, S. Wang // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – IEEE, 2008. – C. 1946 – 1951.

48. You, W.S. Design of a 3D-printable, robust anthropomorphic robot hand including intermetacarpal joints / W.S. You, Y.H. Lee, H.S. Oh, G. Kang, H.R. Choi // Intelligent Service Robotics. – 2019. – T. 12. – C. 1-16.

49. Stillfried G., van der Smagt P. Movement model of a human hand based on magnetic resonance imaging (MRI). – 2010.

50. Kashef, S.R. Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria / S.R. Kashef, S. Amini, A. Akbarzadeh // Mechanism and Machine Theory. – 2020. – T. 145. – C. 103677.

51. Espinosa-Garcia, F. J. Design and simulation of a robotic hand with foldable palm based on mechanisms with variable topologies / F.J. Espinosa-Garcia, R. Tapia-Herrera, E. Lugo-González, M. Arias-Montiel // XXI Congreso Mexicano de Robótica (COMROB). – 2019. – C. 300-305.

52. Friedl, W. FRCEF: the new friction reduced and coupling enhanced finger for the Awiwi hand / W. Friedl, M. Chalon, J. Reinecke, M. Grebenstein // 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). – IEEE, 2015. – C. 140-147.

53. Franchi, G. Technical report: use of hybrid systems to model the RobotiQ adaptive gripper / G. Franchi, K. Hauser // Bloomington, IN. – 2014.

54. Jia, G. Design and analysis of an underactuated robotic hands for grasping space irregular-shaped non-cooperative objects/ G. Jia, B. Li, H. Huang, G. Li, Q. Cao, Y. Wu // 2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). – IEEE, 2017. – C. 650-655

55. Glick, P.E. Robust capture of unknown objects with a highly under-actuated gripper / P.E. Glick, N. Van Crey, M.T. Tolley, D. Ruffatto// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – C. 3996-4002.

56. Elangovan, N. Improving robotic manipulation without sacrificing grasping efficiency: A multi-modal, adaptive gripper with reconfigurable finger bases / N. Elangovan, L. Gerez, G. Gao, M. Liarokapis // IEEE Access. – 2021. – T. 9. – C. 83298-83308.

57. Ruan, S. COSA-FBA hand: an underactuated hand with five-gear mechanisms and built-in actuators / S. Ruan, W. Zhang, T. Zhang, S. Song // Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016. – Springer Singapore, 2017. – C. 121-130

58. Xiao, H. Electronic coupled and self-adaptive grasp robotic finger / H. Xiao, D. Che, W. Zhang, Z. Sun // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – IEEE, 2013. – C. 1568-1573.

59. Zhang, A. A novel piezoelectric actuated 2-DOF joint for underwater manipulator: design, simulation, and experimental investigation / A. Zhang, L. Wang, J. Jin, D. Chen, R. Liu, H. Zhao // *Smart Materials and Structures*. – 2021. – Т. 30. – №. 10. – С. 105032.

60. Zhang, Y., Xu Q. Adaptive sliding mode control with parameter estimation and Kalman filter for precision motion control of a piezo-driven microgripper / Y. Zhang, Q. Xu // *IEEE transactions on control systems technology*. – 2016. – Т. 25. – №. 2. – С. 728-735.

61. Inouye, J. M. Anthropomorphic tendon-driven robotic hands can exceed human grasping capabilities following optimization / J.M. Inouye, F.J. Valero-Cuevas // *The International Journal of Robotics Research*. – 2014. – Т. 33. – №. 5. – С. 694-705

62. Sakagami, Y. The intelligent ASIMO: System overview and integration / Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama // *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. – IEEE, 2002. – Т. 3. – С. 2478-2483.

63. Laliberte, Underactuation in robotic grasping hands / T. Laliberte, L. Birglen, C. Gosselin // *Machine Intelligence & Robotic Control*. – 2002. – Т. 4. – №. 3. – С. 1-11.

64. Жданова, Ю. И. Алгоритм адаптивного управления оппозитными исполнительными системами с переменной структурой / Ю.И. Жданова // «Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики» Серия Естественные и Технические Науки . № 2. 2021. С.51 – 57.

65. Hirano, D., Nagaoka K., Yoshida K. Design of underactuated hand for caging-based grasping of free-flying object / D. Hirano, K. Nagaoka, K. Yoshida // *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. – IEEE, 2013. – С. 436-442.

66. Ren, Z. HERI hand: A quasi dexterous and powerful hand with asymmetrical finger dimensions and under actuation / Z. Ren, C. Zhou, S. Xin // *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – IEEE, 2017. – С. 322-328.

67. Qiao, S. Self-adaptive grasp process and equilibrium configuration analysis of a 3-DOF UACT robotic finger / S. Qiao, H. Guo, R. Liu, Z. Deng // *Mechanism and Machine Theory*. – 2019. – T. 133. – C. 250-266.
68. Backus, S. B. Design and testing of the JPL-Nautilus Gripper for deep-ocean geological sampling / S.B. Backus, R. Onishi, A. Bocklund, A. Berg // *Journal of Field Robotics*. – 2020. – T. 37. – №. 6. – C. 972-986.
69. Kang, L. Modeling, Design, and Implementation of an Underactuated Gripper with Capability of Grasping Thin Objects / L. Kang, S.H. Kim, B.J. Yi // *Machines*. – 2021. – T. 9. – №. 12. – C. 347.
70. Wu L. C. Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation / L.C. Wu, G. Carbone, M. Ceccarelli // *Mechanism and Machine Theory*. – 2009. – T. 44. – №. 2. – C. 336-348.
71. Licheng, W. A fully rotational joint underactuated finger mechanism and its kinematics analysis/ W. Licheng, K. Yanxuan, L. Xiali // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 2016. – T. 13. – №. 5. – C. 1729881416663373
72. Ko, T. A tendon-driven robot gripper with passively switchable underactuated surface and its physics simulation based parameter optimization / T. Ko // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2020. – T. 5. – №. 4. – C. 5002-5009.
73. Kobayashi, A. Analysis of precision grip force for uGRIPP (underactuated gripper for power and precision grasp) / A. Kobayashi, K. Yamaguchi, J. Kinugawa // *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. – IEEE, 2017. – C. 1937-1942.
74. Jia, G. Design and analysis of an underactuated robotic hands for grasping space irregular-shaped non-cooperative objects / G. Jia, B. Li, H. Huang, G. Li, Q. Cao, Y. Wu // *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. – IEEE, 2017. – C. 650-655.
75. Rea, P. On the design of underactuated finger mechanisms for robotic hands / P. Rea // *Advances in Mechatronics*. – 2011. – C. 131-154.

76. Bakhy, S.H. The mechanism analysis of underactuated robotic finger for optimum grasping using gradient descent method / S.H. Bakhy, E.H. Flaieh, M.A. Jabbar // *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. – 2018. – T. 21. – №. 1. – C. 118-126.

77. Jabbar, M. A. A new multi-objective algorithm for underactuated robotic finger during grasping and pinching assignments / M.A. Jabbar, S.H. Bakhy, E.H. Flaieh // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2020. – T. 671. – №. 1. – C. 012135.

78. Southern, T. Space suit glove design with advanced metacarpal phalangeal joints and robotic hand evaluation / T. Southern, D.P. Roberts, N. Moiseev, A. Ross, J.H Kim // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. – 2013. – T. 84. – №. 6. – C. 633-638.

79. Sun, L. Design and Research of an Underactuated Manipulator Based on the Metamorphic Mechanism / L. Sun, H. Zhang, H. Lin, W. Pan // *Sensors*. – 2022. – T. 22. – №. 13. – C. 4766

80. Kang, L. Design and implementation of a multi-function gripper for grasping general objects / L. Kang, J.T. Seo, S.H. Kim, W.J. Kim, B.J. Yi // *Applied Sciences*. – 2019. – T. 9. – №. 24. – C. 5266.

81. Su, J. A Parallel and Active Hybrid Grasping Robot Finger with a Single Chain Transmission Mechanism / J. Su, W. Zhang // *2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. – IEEE, 2018. – C. 840-845.

82. Yang, Y. LIPSA hand: a novel underactuated hand with linearly parallel and self-adaptive grasp / Y. Yang, W. Zhang, X. Xu, H. Hu, J. Hu // *Mechanism and Machine Science: Proceedings of ASIAN MMS 2016 & CCMMS 2016*. – Springer Singapore, 2017. – C. 111-119.

83. Chu, Z. Y. Impedance identification using tactile sensing and its adaptation for an underactuated gripper manipulation / Z.Y. Chu, S.B. Yan, J Hu, S. Lu // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2018. – T. 16. – №. 2. – C. 875-886.

84. Wang, C. Feature sensing and robotic grasping of objects with uncertain information: A review / C. Wang, X. Zhang, X. Zang, Y. Liu, G Ding, W. Yin, J. Zhao // *Sensors*. – 2020. – T. 20. – №. 13. – C. 3707.
85. Cui, J. Experiment on impedance adaptation of under-actuated gripper using tactile array under unknown environment / J.Cui, M. Lai, Z. Chu, F. Sun // *Science China Information Sciences*. – 2018. – T. 61. – C. 1-14.
86. Huynh, B.P. Optimal fuzzy impedance control for a robot gripper using gradient descent iterative learning control in fuzzy rule base design / B.P Huynh, Y.L. Kuo // *Applied Sciences*. – 2020. – T. 10. – №. 11. – C. 3821.
87. de Gea, J. Modelling and simulation of robot arm interaction forces using impedance control / J. de Gea, F. Kirchner // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2008. – T. 41. – №. 2. – C. 15589-15594.
88. Caccavale, F. Six-dof impedance control of dual-arm cooperative manipulators / F. Caccavale, P. Chiacchio, A. Marino, L. Villani // *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*. – 2008. – T. 13. – №. 5. – C. 576-586.
89. Raiola, G. Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots / G. Raiola, C.A. Cardenas, T.S. Tadele, T. De Vries, S. Stramigioli // *IEEE Robotics and automation letters*. – 2018. – T. 3. – №. 2. – C. 1237-1244.
90. Park J., Choi Y. Input-to-state stability of variable impedance control for robotic manipulator / J. Park, Y. Choi // *Applied Sciences*. – 2020. – T. 10. – №. 4. – C. 1271.,
91. Jung, S. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment / S. Jung, T.C. Hsia, R.G. Bonitz // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2004. – T. 12. – №. 3. – C. 474-483.
92. Li, Z. Adaptive impedance control of human–robot cooperation using reinforcement learning / Z. Li, J. Liu, Z Huang, Y. Peng, H. Pu, L. Ding // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2017. – T. 64. – №. 10. – C. 8013-8022.

93. Kim, B. Impedance learning for robotic contact tasks using natural actor-critic algorithm / B. Kim, J. Park, S. Park, S. Kang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 2009. – Т. 40. – №. 2. – С. 433-443.
94. Li Y., Ge S. S. Impedance learning for robots interacting with unknown environments / Y. Li, S.S. Ge // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2013. – Т. 22. – №. 4. – С. 1422-1432.
95. Zhou, J. Intuitive control of humanoid soft-robotic hand BCL-13 / J. Zhou, X.J. Chen, U. Chang, J. Pan // 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). – IEEE, 2018. – С. 314-319.,
96. Neha, E. Grasp analysis of a four-fingered robotic hand based on matlab simmechanics. / E. Neha, M. Suhaib, S. Asthana, S. Mukherjee // J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. 2020, 9, pp. 169–182.
97. Bogdanov, A. Synthesis of structural scheme of drive of adaptive multiple-link gripper / A. Bogdanov, A. Permyakov, Y. Zhdanova // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 161. – С. 03009.
98. Katsura, S. Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control / S. Katsura, Y. Matsumoto, K. Ohnishi // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2007. – Т. 54. – №. 1. – С. 530-538.
99. Egawa, K. Multi-layer Observers Design for Force Control with Robot Finger Pad by Using Element Description Method / K. Egawa, S. Katsura // IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2022. – С. 1-6.
100. Dewapura, P. W. Haptic feature selection using Statistical Analysis for Haptic Object Reconstruction. / P.W. Dewapura, A.M.H.S Abeykoon // – 2023. University of Moratuwa Sri Lanka.
101. Макаров, А. Н. Теоретические основы построения, методы расчета и конструирование манипуляционных устройств металлургического производства / А.Н. Макаров // Дис... док. тех. наук. – Магнитогорская гос. горнометаллургическая акад. им. ГИ Носова. - Москва, - 1996. – 367 с.

102. Liang, D. PASA-GB Hand: a novel parallel and self-adaptive robot hand with gear-belt mechanisms / D. Liang, W. Zhang // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2018. – Т. 90. – №. 1. – С. 3-17.

103. Babin, V. Picking, grasping, or scooping small objects lying on flat surfaces: A design approach / D. Liang, W. Zhang // *The International Journal of Robotics Research*. – 2018. – Т. 37. – №. 12. – С. 1484-1499.

104. Hussain, I. Modeling and prototyping of an underactuated gripper exploiting joint compliance and modularity/ I. Hussain, F Renda, Z. Iqbal, M. Malvezzi, G. Salvietti, L. Seneviratne, D. Gan, D. Prattichizzo // *IEEE Robotics and automation letters*. – 2018. – Т. 3. – №. 4. – С. 2854-2861.

105. Гудимова, Л.Н. Понятие кинематических пар квазивысоких классов и их использование при устранении избыточных связей в шарнирных механизмах / Л.Н. Гудимова, Л.Т. Дворников, А.Г. Никитин // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2021. – №. 1 (35). – С. 27-30.

106. Bargsten, V., de Gea Fernandez J. Compi: Development of a 6-dof compliant robot arm for human-robot cooperation / V. Bargsten, J. de Gea Fernandez // *Proceedings of the 8th International Workshop on Human-Friendly Robotics (HFR)*. – 2015.

107. Manz, M. Development of a self-adaptive gripper and implementation of a gripping reflex to increase the dynamic payload capacity / M. Manz, S. Bartsch, M. Simnofske, F. Kirchner // *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*. – VDE, 2016. – С. 1-7.

108. Zhao, D. Topology and analysis of three-phalanx COSA finger based on linkages for humanoid robot hands / D. Zhao, W. Zhang // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – С. 465-476.

109. Cheng, M. Design of an Underactuated Finger Based on a Novel Nine-Bar Mechanism / M. Cheng, S. Fan, D. Yang, L. Jiang // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2020. – Т. 12. – №. 6. – С. 065001.

110. Chen, W. Analysis and Synthesis of Underactuated Compliant Mechanisms Based on Transmission Properties of Motion and Force / W.Chen, C.Xiong, Y. Wang // IEEE Transactions on Robotics. – 2020. – Т. 36. – №. 3. – С. 773-788.
111. Xiong, C.H. Design and implementation of an anthropomorphic hand for replicating human grasping functions / C.H. Xiong, W.R. Chen, B.Y. Sun, M.J. Liu, S.G. Yue, W.B. Chen // IEEE Transactions on Robotics. – 2016. – Т. 32. – №. 3. – С. 652-671.
112. Chen, W. Mechanical adaptability analysis of underactuated mechanisms / W. Chen, C. Xiong, W. Chen, S. Yue // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2018. – Т. 49. – С. 436-447.
113. Khakpour, H. Numerical analysis of the grasp configuration of a planar 3-DOF linkage-driven underactuated finger / H. Khakpour, L. Birglen // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2013. – Т. 8. – №. 2.
114. Жданова, Ю.И. Методика построения антропоморфного захвата с адаптивным управлением / Ю.И. Жданова // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. – 2020. – №. 3. – С. 24-30.
115. Huang, M. Design, analysis, and testing of a novel compliant underactuated gripper / M. Huang, Q. Lu, W. Chen, J. Qiao, X. Che // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Т. 90. – №. 4. – С. 045122.
116. Nguyen, T.V.T. Optimizing compliant gripper mechanism design by employing an effective bi-algorithm: fuzzy logic and ANFIS / T.V.T. Nguyen, N.T. Huynh, N.C. Vu, V.N.D. Kieu, S.C. Huang // Microsystem Technologies. – 2021. – Т. 27. – №. 9. – С. 3389-3412.
117. Sun, H. Design, Analysis, and Experiment of a Scissor-Shaped Deployable Metamorphic Hand / H. Sun, W. Sun, B. Chen, Y. Hou // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2022. – Т. 14. – №. 6.
118. Wang, D. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms / D.

Wang, Y. Xiong, B. Zi, S. Qian, Z. Wang, W. Zhu // Mechanism and Machine Theory. – 2021. – Т. 155. – С. 104092.

119. Жданова, Ю.И. Обоснование структурной схемы исполнительной группы антропоморфного захвата с групповым приводом и адаптивным управлением движения звеньев / Ю.И. Жданова, Е.А. Дудоров, А.А. Богданов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – №. 2 (214). – С. 20-26.

120. 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.

121. 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.

122. 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.

123. Glick, P.E. Robust capture of unknown objects with a highly under-actuated gripper / P.E. Glick, N. Van Crey, M.T. Tolley, D. Ruffatto // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – IEEE, 2020. – С. 3996-4002.

124. Раков, Д. Л. Прямые и обратные задачи структурного синтеза при поиске новых технических решений / Д.Л. Раков // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2007. – №. 2. – С. 42-49.

125. Бочкарев, С.В. Структурный синтез сложного электротехнического оборудования на основе метода удовлетворения ограничений / С.В. Бочкарев, М.В. Овсянников, А.Б. Петроченков, С.А. Буханов // Электротехника. – 2015. – №. 6. – С. 63-69.

126. Жданова, Ю. И. Структурный синтез антропоморфного захвата с адаптивным управлением движением выходных звеньев / Ю.И. Жданова // Современная наука и инновации. – 2020. – №. 4. – С. 18-27.

127. Kang, L. Design of a 3-DOF linkage-driven underactuated finger for multiple grasping / L. Kang, J.T. Seo, D. Yoon, S.H. Kim, I.H. Suh, B.J. Yi // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2019. – С. 5608-5613.

128. Kim, S.H. Evaluation of Usability of a 3-DOF Linkage-Driven Robotic Gripper Through Grasping Experiments / S.H. Kim, M.U.A. Khan, L. Kang, J.T. Seo, B.J. Yi, Y. Choi, S. Lee, J.Y. Lee // 2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). – IEEE, 2020. – С. 266-271.

129. Жданова, Ю.И. Развитие метода анализа механических систем с изменяемой структурой / Ю.И. Жданова, В.В. Мошкин, М.П. Романов // Автоматизация промышленности. - 2024. - № 5. - С. 26-31.

130. Dollar, A. M. The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation / A.M. Dollar, R.D. Howe // The international journal of robotics research. – 2010. – Т. 29. – №. 5. – С. 585-597.

131. Backus, S. B. and Dollar A. M. An Adaptive Three-Fingered Prismatic Gripper With Passive Rotational Joints / S.B. Backus, A.M. Dollar // IEEE Robot. Autom. Lett., Jul. 2016 vol. 1, no. 2, pp. 668–675. Из гл 3.2

132. Torielli, D. Towards an Open-Source Hardware Agnostic Framework for Robotic End-Effectors Control / D. Torielli, L. Bertoni, N. Tsagarakis, L. Muratore // 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). – IEEE, 2021. – С. 688-694.

133. Liu, T. Synthesizing Diverse and Physically Stable Grasps With Arbitrary Hand Structures Using Differentiable Force Closure Estimator / T. Liu, Z. Liu, Z. Jiao, Y. Zhu, S.C. Zhu // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2021. – Т. 7. – №. 1. – С. 470-477.

134. de Oliveira, D.M. 6D Grasping Based On Lateral Curvatures and Geometric Primitives / D. M. de Oliveira, C.C.B. Vitorino, A.G.S. Conceição // 2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE). – IEEE, 2021. – C. 138-143.

135. Oliver, G. Towards footwear manufacturing 4.0: shoe sole robotic grasping in assembling operations / G. Oliver, P. Gil, J.F. Gomez, F. Torres // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – T. 114. – №. 3. – C. 811-827.

136. Maeda G., Fukaya N., Maeda S. F1 Hand: A Versatile Fixed-Finger Gripper for Delicate Teleoperation and Autonomous Grasping // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022.

137. de Oliveira, D. M6D Grasping Based On Lateral Curvatures and Geometric Primitives / D.M de Oliveira, C.C.B Vitorino, AGS. Conceição // 2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE). – IEEE, 2021. – C. 138-143.

138. Morrow, J. Measuring a Robot Hand's Graspable Region using Power and Precision Grasps / J. Morrow, J. Campbell, N. Nishat, R. Balasubramanian, C. Grimm // arXiv preprint arXiv:2204.12658. – 2022.

139. Campeau-Lecours A. Jaco assistive robotic device: Empowering people with disabilities through innovative algorithms. – 2016.

140. Bertoni, L. Towards a generic grasp planning pipeline using end-effector specific primitive grasping actions / L. Bertoni, D. Torielli, Y. Zhang, N.G. Tsagarakis, L. Muratore // 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). – IEEE, 2021. – C. 722 -729.

141. Shao. L. Unigrasp: Learning a unified model to grasp with multifingered robotic hands / L. Shao, .F Ferreira, M. Jorda, V. Nambiar, J. Luo, E. Solowjow, J.A. Ojea, O. Khatib, J. Bohg // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – T. 5. – №. 2. – C. 2286-2293.

142. Wen, R. Force-guided high-precision grasping control of fragile and deformable objects using semg-based force prediction / R. Wen, K. Yuan, Q. Wang, S. Heng, Z. Li // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 2762-2769.

143. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2 т./ Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.; пер. с англ. ОВ Шихеевой. – 2005.

144 Островский Г. М., Зиятдинов Н. Н., Лаптева Т. В. Оптимизация технических систем. – КноРус, 2012.

145. Zhdanova, Y. I. Method of optimization synthesis of parameters of actuating system of anthropomorphic gripper with adaptive control / Y.I. Zhdanova, V.V. Moshkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 971. – №. 4. – С. 042065.

146. Zhdanova, Y. I. Parametric synthesis of system of transmission of motion to links of anthropomorphic gripper of variable structure / Y.I. Zhdanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 537. – №. 3. – С. 032089.

147. Жданова Ю.Ю, Мошкин В.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612029 от 19.11.2021 г. «Моделирование антропоморфного захвата» («Захват»).

148. Салагор, А.Ю. Современные роботизированные комплексы разминирования: зарубежные и отечественные разработки / А.Ю. Салагор, И.В. Степанов // Актуальные вопросы совершенствования тактико-специальной, огневой и профессионально-прикладной физической подготовки в современном контексте практического обучения сотрудников органов внутренних дел. 2019. С. 341-344.

149. Шашок, В.Н. Подход к разработке мобильных робототехнических комплексов разминирования / В.Н Шашок, С.И Филиппов, Д.В Багаев, А.Н Малышев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. №. 3 (152). С. 58-70

150. Bogdanov, A. A. Synthesis of Structure of Actuating Link Group with Common Drive Based on Formation and Analysis of Scheme of Functioning / A.A. Bogdanov, A.F. Permyakov, Y.I. Zhdanova // 2019 International Science and Technology Conference" EastConf". – IEEE, 2019. – С. 1-5

151. Жданова, Ю.И., Мошкин В.В., Романов М.П. Алгоритмы управления двигателями антропоморфного захвата с групповым приводом / Ю.И. Жданова, В.В. Мошкин, М.П. Романов // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 4. С. 72–83.

152. Li, M. Fuzzy impedance control of an electro-hydraulic actuator with an extended disturbance observer / M. Li, J. Wei, J. Fang, W Shi, K. Guo // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. 2019. Vol. 20. № 9. P. 1221-1233.

153. Wang, X. Active gripping impedance force control with dual fingers hand / X. Wang, Y. Zhao, X.Fan, H. Wu // Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. IEEE, 2011. Vol. 9. P. 4531-4534.

154. Жданова, Ю.И. Алгоритм не прямого управления антропоморфным захватом по параметру усилие на выходном звене / Ю.И. Жданова, М.П. Романов, В.В. Мошкин // Необратимые процессы в природе и технике. Труды Десятой Всероссийской конференции. Москва. – 2023. – С. 50 - 53.

155 Пат. № 144196 Российская Федерация. Захват / Богданов А.А., Кутлубаева Ю.И., Пермяков А.Ф. А.Ф. Пермяков заявитель и патентообладатель А.Ф. Пермяков № 2014113274/02 заявл. 04.04.2014; опубл. 10.08.2014.

156. Zhdanova, Y.I. Method of adaptive gripper drive control signal formation / Y.I. Zhdanova, V.V. Moshkin, I.G. Zhidenko // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1515. – №. 4. – С. 042046.

157. Zhdanova, Y. I., Moshkin V. V., Zhidenko I. G. Research of kinematics of an actuating group of an anthropomorphic gripper with a common drive / Y.I.

Zhdanova, V.V. Moshkin, I.G. Zhidenko // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – T. 224. – C. 01029.

Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационного исследования

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
АНДРОИДНАЯ ТЕХНИКА

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
АО «НПО «Андроидная техника»
В.В. Чеха
« 18 » 07 2024 г.

АКТ о использовании

результатов полученных в диссертации Ю.И. Ждановой
«Методы анализа, синтеза и алгоритмы управления антропоморфным захватным модулем сервисного робота с групповым приводом выходных звеньев»

Настоящий акт составлен в подтверждение использования результатов диссертационной работы в проектах, выполненных АО «НПО Андроидная техника».

При разработке ОКР «Система антропоморфная робототехническая» (Шифр СЧ ОКР – «Теледроид-НА») выполняемой в соответствии с техническим заданием ПАО «РКК «Энергия» от 2020 г. использованы результаты, направленные на создание адаптивного антропоморфного захватного модуля:

- принципы построения системы передачи движения в исполнительных группах звеньев с групповым приводом и изменяемой структурной схемой;
- алгоритм параметрического синтеза многозвенной системы передачи движения выходным звеньям.

Полученные решения обеспечили: адаптивное управление движением звеньев выполняемые от одного двигателя, минимизацию габаритов захватного модуля.

В рамках модернизации конструкции и систем «Мобильного роботизированного манипулятора для работы с радиоактивными отходами» - заказчик Федеральное государственное унитарное предприятие «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» (проект «Каньон»), внедрен захватный модуль, обеспечивающий обхват нефиксированных внешних объектов.


Алгоритмическое обеспечение модуля построено на полученных в диссертационном исследовании:

1 Аналитических зависимостей значения приведенного момента к двигателю по заданной величине допустимого усилия на выходном звене исполнительной группы.

2 Алгоритме управления двигателями групповых приводов оппозитных исполнительных групп звеньев при обхвате нефиксированных внешних объектов без их смещения.

Реализация результатов исследований позволило: внедрить автоматический режим обхвата объектов без участия оператора в дополнении к существующему копирующему режиму управления, контролировать усилие на замыкающем звене без использования силовых датчиков на выходных звеньях.

Руководитель проекта
«Теледроид»



Б. Г. Колбасин

Руководитель проекта
«Каньон»



А. М. Арефьев



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454
тел.: (499) 215 65 65 доб. 1140, факс: (495) 434 92 87
e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru



УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор

Н.И. Прокопов

«03» июня 2024 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы на соискание учёной степени
кандидата технических наук по научной специальности

2.5.4. «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Ждановой Юлии Ильдаровны

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

Результаты диссертационной работы по научной специальности
2.5.4. «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» старшего
преподавателя кафедры системной инженерии Ждановой Юлии Ильдаровны
были использованы в период с 2020 по 2024 г. в учебном процессе на кафедрах
системной инженерии и проблем управления Института искусственного
интеллекта РТУ МИРЭА.

В материалы дисциплины «Основы автоматического управления» для
направления подготовки 27.03.03 «Системный анализ и управление» внедрен
раздел «Метод анализа сложных механических систем с переменной структурой
по функциональным схемам».

В дисциплины: «Детали мехатронных модулей, роботов и их

конструирование», «Основы проектирования систем управления автономных роботов», читаемые студентам по направлению подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» внедрены соответственно разделы, «Методы структурного и параметрического синтеза антропоморфного захватного модуля» и «Алгоритмы управления движением звеньев антропоморфного захватного модуля с изменяемой структурой при обхвате недетерминированных объектов».

Изученные материалы в последующем использовались студентами бакалавриата при прохождении технологической практики и выполнении выпускных квалификационных работ.

При участии Ждановой Ю.И. были подготовлены и изданы два методических указания по выполнению практических работ и одно учебное пособие. В методических указаниях «Программное и алгоритмическое обеспечение систем сбора и обработки данных. Ч. 1 и Ч. 2 / Ю. И. Жданова, В. В. Мошкин. — М.: РТУ МИРЭА, 2022. — 35 с.» представлены технологии графического программирования, применяемые для описания алгоритма управления движения выходных звеньев исполнительных групп. В учебном пособии «Методы оптимизации в системной инженерии / Ю. И. Жданова, А. А. Пастушков. — М.: РТУ МИРЭА, 2021. — 214 с.» отражены предложенные в диссертационной работе подходы к формализации критерия оптимальности систем, описываемые не связанными между собой проектируемыми параметрами.

И.о. директора
Института искусственного интеллекта,
кандидат технических наук, доцент

 Ш.Г. Магомедов

Заведующий кафедрой системной
инженерии кандидат технических наук,
доцент

 А.С. Королев

Заведующий кафедрой
проблем управления
доктор технических наук, профессор

 М.П. Романов