

На правах рукописи



Несмиянов Иван Алексеевич

**СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ
ТРИПОДА**

Специальность 05.02.18 – Теория механизмов и машин

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Волгоград 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет»

Научный консультант	Жога Виктор Викторович , доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
Официальные оппоненты	Смелягин Анатолий Игоревич , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» Хейло Сергей Валерьевич , доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет дизайна и технологии» Рыбак Лариса Александровна , доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «28» ноября 2017 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.059.05 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101990, Москва, М.Харитоньевский пер., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) и на сайте <http://www.imash.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д 002.059.05.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н.

Бозров В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Работа посвящена решению проблем структурного и параметрического синтеза, механики и управления манипуляторов параллельно – последовательной структуры на основе трипода с поворотным основанием, синтеза и реализации заданных траекторий выходного звена манипуляторов.

Обычно структура манипуляторов представляет последовательность связанных кинематическими парами звеньев. Такие манипуляторы обладают рядом достоинств, однако консольность таких конструкций не позволяют реализовать перемещения больших масс, особенно на больших скоростях. Поэтому в последнее время находят применение манипуляционные механизмы параллельной структуры (*l*-координатные), обладающие лучшей грузоподъемностью, повышенной жесткостью системы, достижении высоких скоростей и ускорений грузозахватного устройства.

Учитывая недостатки манипуляторов параллельной структуры, к одним из которых относятся ограниченность рабочей зоны, относительно небольшая маневренность, возникает необходимость разработки манипуляторов параллельно – последовательной структуры, которые объединяли бы преимущества обеих структурных схем манипуляционных систем.

Проблемами автоматизации и роботизации манипуляционных систем занимались К.В. Фролов, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, А.В. Тимофеев, Ю.В. Подураев, И.А. Каляев, Д.Я. Паршин. Изучению структуры, кинематики и динамики манипуляционных устройств параллельной структуры, их функциональных механизмов, разработке методов анализа и синтеза, способам управления движением посвящены работы В.А. Глазунова, В.М. Герасуна, Ф.М. Диментберга, А.Н. Евграфова, С.Л. Зенкевича, В.Л. Жавнера, А.Ш. Колискова, М.З.Коловского, А.И. Корендясева, А.Ф. Крайнева, В.И. Пындака, Л.А. Рыбак, Б.Л. Саламандры, А.В. Сергеева, Л.И. Тывеса, С.В. Хейло, Е.И. Юревича, А.С. Ющенко, а также зарубежных ученых *J. Angeles, V. Arakelian, S. Briot, G. Gogu, C. Goselin, X. Kong, J. Merlet.* и др.

Большинство систем управления манипуляторами, разработанных А.Е. Кобринским, М.З. Коловским, А.И. Корендясевым, А.Ф. Крайневым и др., являются системами программного управления различного уровня и реализуют заданные программные движения захвата. Управление движением манипуляторов на основе использования современных методов и технологий обработки знаний реализованы в работах Е.И. Юревича, А.С. Ющенко, И.М. Макарова, Д.А. Поспелова, В.Ф. Филаретова, Т. Тэрано и др.

Одно из основных требований, определяющих работоспособность манипуляторов, является обеспечение подхода рабочего органа манипулятора к требуемым точкам объекта обслуживания с заданной ориентацией рабочего органа. В связи с этим встает вопрос об оценке функциональных возможностей манипулятора в зоне обслуживания. Часто число обобщенных координат манипулятора превышает число обобщенных координат захвата и заданному конечному положению объекта соответствует множество конфигураций системы.

Такая неопределенность требует формулировки и решения оптимизационной задачи позиционирования манипулятора.

Исследованием механизмов манипуляторов параллельной структуры с соединением исполнительных звеньев в виде треугольной пирамиды не много, им посвящены работы В.А. Глазунова, В.М. Герасуна, В.И. Пындака, А.П. Потемкина, А.Ф. Рогачева, А.С. Горобцова. Поэтому до сих пор актуальными являются исследования посвященные оптимизации геометрических, кинематических и силовых параметров манипуляторов с механизмами параллельной структуры и разработка методик их расчета и проектирования, а также задача обоснованного выбора конструктивных параметров манипулятора на этапе проектирования и режимов программных движений при выполнении различных технологических операций. Актуальными являются исследования и разработка методов синтеза и оптимизация параметров управляемого перемещения манипуляционных робототехнических систем параллельно – последовательной структуры.

В связи с этим, синтез программных движений выходного звена манипулятора с избыточными координатами при совместном решении прямой задачи манипулятора-трипода на подвижном основании, и обратной задачи определения обобщенных координат манипуляционного захватного устройства, по известным абсолютным координатам рабочего органа с минимальным энергопотреблением и высоким быстродействием, являются актуальным.

В исполнительных механизмах, с управляемым движением выходного звена, часто используют необратимый редуктор. Однако наличие необратимой передачи в приводном механизме требует аналитического описания ее влияния на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания.

Поэтому разработка аналитических методов исследования кинематики и динамики приводов манипулятора – трипода с самотормозящейся передачей и упругими звеньями, является дальнейшим развитием методов управления перемещением выходных звеньев.

Цель исследования. Разработка методов структурного и параметрического синтеза кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной модульной структуры и синтез их оптимальных программных движений.

Задачи исследования.

1. Анализ и классификация показателей качества погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры, характеризующих маневренность, манипулятивность, мобильность, приемистость. Количественная и качественная оценка технологических операций: объем обслуживаемой зоны; программные траектории рабочего органа; время цикла; точность воспроизведения траекторий и погрешность позиционирования; специальные требования.

2. Разработка методов и алгоритмов структурного и геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода на подвижном основании.

3. Постановка и решение оптимизационной задачи позиционирования захвата манипулятора при его перемещении из начального положения в заданное конечное. Разработка методов формирования траекторий захвата манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Вывод условий существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и знакопостоянства относительных линейных скоростей штоков исполнительных звеньев при движении по прямолинейной траектории.

4. Разработка математических моделей динамики пространственного управляемого движения манипулятора, как многомассовой электромеханической системы с голономными связями и приводом с самотормозящейся передачей с учетом упругости ее звеньев, анализ ее влияния на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания.

5. Разработка аналитических методов динамического синтеза программных движений захвата манипулятора и линейных исполнительных звеньев из условия минимума критерия обобщенной энергии точки крепления подвеса. Вывод аналитических условий устойчивости оптимальных траекторий захвата.

6. Разработка аналитического метода идентификации математической параметров модели манипулятора. Построение системы управления с обратной связью по положению и скорости, решающую задачу контурного управления. Проведение экспериментальных исследований на полномасштабном образце манипулятора с целью проверки полученных теоретических результатов.

Научная новизна работы заключается в развитии теории синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода и аналитическом построении оптимальных программных движений и алгоритмов управления исполнительными звеньями манипулятора-трипода, а именно:

1. Установлены закономерности эволюции структурных схем механизмов погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в зависимости от значений показателей качества и вида технологических операций.

2. Разработаны метод и алгоритмы оптимального синтеза рациональных структурных схем механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, позволяющие значительно сузить границы поиска целочисленных решений. Развита метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными поступательными механизмами и поворотным основанием, обеспечивающий значения показателей качества, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

3. Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры, для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат. Решена задача формирования траекторий, выведены условия существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и условий

знакопостоянства линейных скоростей исполнительных звеньев при движении выходного звена манипулятора-трипода по прямолинейной траектории.

4. Разработаны математические модели динамики манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены голономные нестационарные связи. Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволяет исследовать ее влияние на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания и сформулировать условия отсутствия силового и динамического заклинивания привода.

5. Получено решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата. Получены аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата. Проведено сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по синусоидальному закону.

6. Разработана аналитическая методика параметрической идентификации жесткостных параметров привода исполнительных звеньев манипулятора, основанная на спектральном анализе экспериментальных результатов. Спроектированная система управления позволяет определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения, минимизирующих время достижения заданной точки.

Новизна технических решений подтверждается патентами РФ на изобретения и патентами РФ на полезную модель.

Методология и методы исследования основывались на основных положениях теории механизмов и машин, теоретической механики, теории оптимального управления, методах оптимизации, математического, компьютерного и физического моделирования управляемых движений приводных электромеханических систем манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

При решении задач на ЭВМ использовался пакет математических вычислений «*Mathcad*», прикладные программы, созданные на *C++*, *Visual Basic*.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением фундаментальных положений механики, проведением параметрической идентификации по значениям динамических ошибок реальной электромеханической системы и ошибок принятой модели, а также

сопоставлением результатов численного и натурального моделирования реализуемых законов программного движения выходного звена манипулятора.

Положения, выносимые на защиту:

- Закономерности эволюции структурных схем пространственных механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в зависимости от показателей качества. Метод и алгоритмы оптимального синтеза, условия существования рациональных структурных схем механизмов параллельно-последовательной структуры. Метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными поступательными механизмами и поворотным основанием.

- Метод решения задачи определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры из условия минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат.

- Методика решения задачи формирования пространственных траекторий захвата манипулятора-трипода. Условия существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и условия знакопостоянства линейных скоростей исполнительных звеньев при движении исполнительного механизма выходного звена по прямолинейной траектории.

- Математическая модель динамики манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющая проводить расчеты динамики пространственных движений звеньев манипулятора, на которые наложены нестационарные голономные связи, с учетом динамики исполнительных приводов с самотормозящейся передачей, с упругими звеньями и необратимыми потерями.

- Аналитические условия отсутствия силового и динамического заклинивания привода.

- Методика решения задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата. Аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата и результаты сравнения кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по синусоидальному закону.

- Аналитическая методика идентификации упругих параметров механизма приводов исполнительных звеньев манипулятора, основанная на спектральном анализе экспериментальных результатов. Результаты экспериментальных исследований зависимостей изменения длин звеньев манипулятора от времени при движении захвата по прямой и по произвольной траектории. Характеристики изменения усилий в исполнительных звеньях в условиях возникновения режима динамического и силового заклинивания в самотормозящейся передаче электропривода.

Теоретическая и практическая значимость заключается в разработанных методах структурного и геометрического синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры, позволяющих на этапе проектирования создавать рациональные конструкции без избыточных связей и лишних подвижностей. Предложенные способы задания траекторий выходного звена манипулятора параллельно-последовательной структуры по синтезированным законам позволяют осуществлять эффективное управление рабочим органом манипулятора по оптимальным траекториям и с минимальными инерционными нагрузками.

Реализация результатов работы.

На основе полученных результатов теоретических исследований разработана конструкция манипулятора-трипода на подвижном основании, представляющая собой пространственный механизм параллельно-последовательной структуры. Разработанный манипулятор-трипод грузоподъемностью 2000 Н входит в состав робототехнического комплекса РШ-7 (рисунок 1, а) на базе шагающего шасси, а также опытно эксплуатировался на самоходном колесном шасси Т-16МГ (рисунок 1, б).



а)



б)

Рисунок 1 - Манипулятор – трипод на поворотном основании, установленный на мобильном шагающем роботе РШ-7 (а) и на колесном самоходном шасси (б)

Использование универсальных шарниров в конструкции манипулятора позволяет применять широкий спектр сменного рабочего оборудования: крюковая подвеска, позиционируемый захват, различный инструмент. Вследствие чего разработанный манипулятор-трипод на подвижном основании, снабженный распределенной системой управления, реализующей разработанные методы синтеза управляющих движений, может использоваться в различных отраслях народного хозяйства: сельское хозяйство, строительство, коммунальное хозяйство, перерабатывающая промышленность, транспортно-складские работы и др.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы, результаты исследований обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях:

– Ежегодная Международная научно-практическая конференция Волгоградского ГАУ, г. Волгоград, 2004-2016 гг.;

- Научно-практическая конференция «Агроинженерная наука – сельскохозяйственному производству», г. Москва 9-11 октября 2001 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Современные технологии и средства механизации и технического обслуживания в АПК», г. Саранск 24-27 сентября 2002 г.;
- Simpozion stiintific international "70 ani ai Universitatii Agrare de Stat din Moldova". Chisinau 7-8 octombrie 2003;
- Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника»: ЭР-2010, г. Москва 18-20 мая 2010 г.; ЭР-2012, г. Санкт-Петербург 25-26 сентября 2012 г.; ЭР-2013, г. Санкт-Петербург 2-3 октября 2013 г.; ЭР-2014, г. Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК, 1-2 октября 2014 г.;
- Всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2011, с. Дивноморское 3-8 октября 2011 г.; МКПУ-2012, г. Санкт-Петербург 9-11 октября 2012 г.; МКПУ-2013, с. Дивноморское 30 сентября-5 октября 2013 г.; МКПУ-2015), 28 сентября – 03 октября 2015 г., с. Дивноморское, 2015 г.;
- Международная конференция «Прогресс транспортных средств и систем-2013», г. Волгоград 24-26 сентября 2013 г.;
- V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект», г. Железногорск 9 ноября 2013 г.;
- Ежегодная Международная научно-практическая конференция. Современное машиностроение: наука и образование. Санкт-Петербург, Сб-П ГПУ. 2012 – 2016 гг.
- XX CISM-IFTOMM SYMPOSIUM ON Theory and Practice of Robots and Manipulators - RoManSy 2014/ June 23-26, 2014 Moscow, Russia;
- Международная научно-практическая конференция «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях». Мичуринск-Наукоград РФ, 10-12 ноября 2014 г.;
- 7-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2014». Р. Беларусь, г. Минск. 19-21 ноября 2014 г.;
- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20-24 августа 2015 г.;
- XII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами (УБС'2015)». Волгоград, 07-11 сентября 2015 г.;
- Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. First Conference, CIT&DS 2015. Volgograd, Russia, September 15-17, 2015 г.;
- XII Международная научно-техническая конференция «Вибрация-2016. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины». Курск, Юго-Зап. гос. ун-т, 18-20 мая 2016 г.;
- “Dynamics of Strongly Nonlinear Systems”, the 22-nd International Conference on VIBROENGINEERING held in Moscow, Russia, 4-7 October, 2016 г.;

– Доклад на заседании научно-технического совета отдела «Механика машин и управление машинами» ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, 8 ноября 2016 г.;

Участие в научно-исследовательских проектах.

Под руководством автора реализован проект РФФИ №13-08-00387-а «Исследование кинематических и динамических характеристик робота-манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами».

Автор принимает участие в качестве исполнителя в проектах: РФФИ №15-01-04577-а «Разработка интеллектуальных методов автоматического управления функционированием шагающего робота в недетерминированной внешней среде» и РФФИ 16-48-340395 р_а «Исследования и разработка манипулятора параллельной структуры с управляемым захватным устройством для технологических операций сельскохозяйственного производства».

Публикации.

Основные положения диссертации отражены в 79 публикациях, в том числе в 18 статьях в журналах по перечню ВАК, 6 в иностранных изданиях, 8 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель, 1 свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы отражены в отчетах по грантам РФФИ №13-08-00387-а и №15-01-04577-а.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, приложений. Общий объём диссертации 311 страниц, в тексте имеется 5 таблиц и 129 рисунков. Список литературы представлен на 50 страницах из 398 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования, используемые в работе. Представлены сведения об апробации работы, публикациях, теоретической и практической значимости результатов исследований.

В первой главе выполнен анализ опыта применения манипуляторов параллельной структуры в промышленности, сельском хозяйстве, непромышленных отраслях. Как показывает анализ, в сервисных роботах и манипуляторах для сельского хозяйства, перерабатывающей промышленности, строительства, коммунального хозяйства и других сфер производственной деятельности наибольшее распространение нашли погрузочные манипуляторы со степенью подвижности манипуляционного механизма от $W=3$ и выше, работающие в ангулярной системе координат, скорость захватного устройства (исполнительного звена) которого, как правило, составляет до 0,5 м/с.

Анализ технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, перерабатывающей промышленности и др. показывает, что значительный объём операций можно выполнять с помощью манипуляторов, где движение захвата

обеспечивается механизмом в виде трипода, в котором обеспечивается пересечение в одной точке геометрических осей исполнительных звеньев, что исключает появление в механизме манипулятора изгибающих моментов от приложенных нагрузок на выходное звено - захват.

Выделено семейство манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода и показана необходимость развития теории структурного синтеза и оптимизации законов управления для таких манипуляторов.

Объединение достоинств параллельных манипуляторов и манипуляторов с открытыми кинематическими цепями на основе агрегатно-модульного построения позволяет увеличить зону действия манипуляторов параллельно-последовательной структуры в базовой плоскости.

На настоящее время так и не существует окончательно сформулированной теории, которая позволяла бы эффективно проводить синтез механизмов параллельной и параллельно-последовательной структуры для заданных целей.

Анализ исследований показывает, что в подавляющем большинстве задачи структурного синтеза чаще всего решаются вариационными методами с помощью алгоритмов с итерационными процедурами. Этот метод отличается простотой постановки и реализации, но решение может быть представлено огромным количеством вариантов, большинство из которых будут просто выбракованы из-за невозможности сборки работоспособного механизма. Следовательно, актуальным является ограничение области поиска рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

Для погрузочных манипуляторов одной из основных характеристик является зона обслуживания, поэтому желательно оптимизировать параметры манипулятора исходя из условия обеспечения максимальной площади рабочего пространства при заданных ходах линейных приводов.

Ручное управление погрузочными манипуляторами параллельно-последовательной структуры при отработке заданных прямолинейных и криволинейных траекторий затруднено и малоэффективно, следовательно, необходима разработка систем управления, реализующих в автоматическом режиме перемещение выходного звена манипулятора по заданным конфигурации, траектории и законам, которые в свою очередь обеспечивали бы наиболее благоприятный режим работы приводных двигателей исполнительных механизмов.

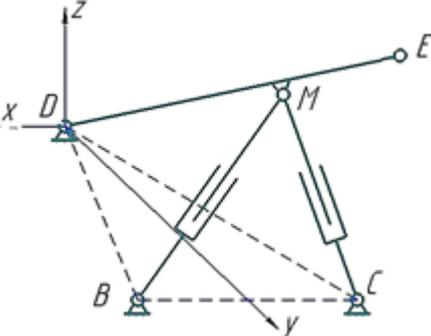
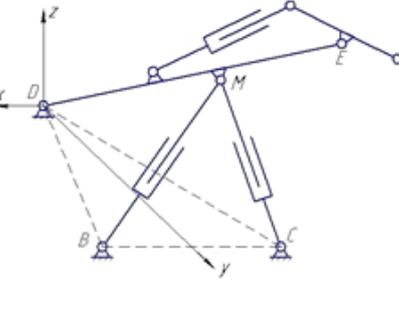
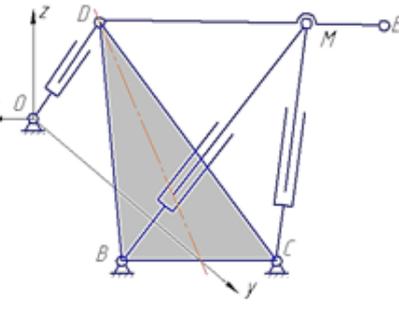
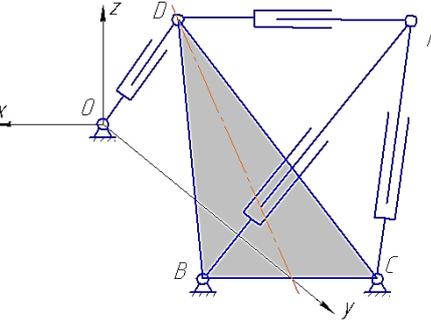
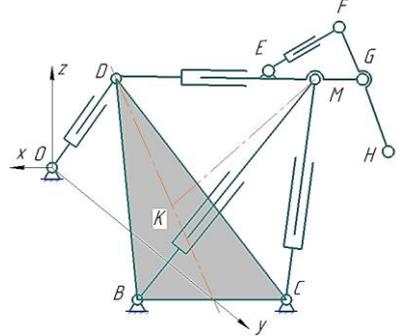
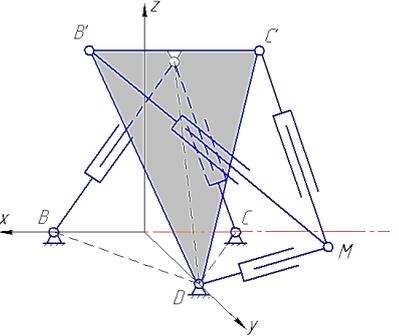
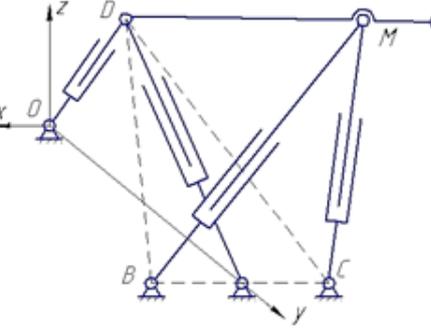
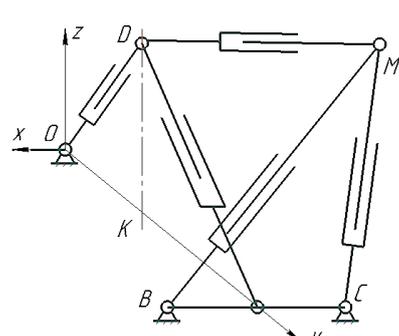
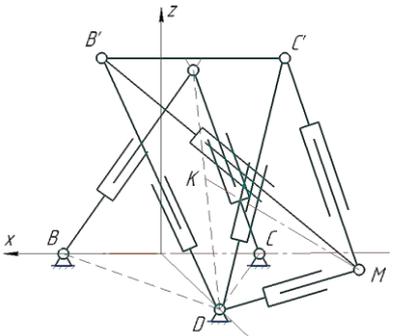
Проведен анализ современных методов исследования манипуляторов параллельной структуры. Выделены основные направления исследования механизмов параллельно-последовательной структуры.

Во второй главе рассмотрены возможные компоновочные схемы манипуляторов параллельной, параллельно – последовательной, неполнопараллельно – последовательной структур и их возможных комбинаций, построенных на базе трипода с различной степенью подвижности (таблица 1). На основе блочно-модульного строения представлена эволюция параллельно-последовательных манипуляторов.

Добавление дополнительной подвижности в основании трипода позволяет создавать параллельно – перекрестные структуры, неполнопараллельные манипуляторы получаются заменой изменяемого звена неизменяемым.

Таблица 1

Эволюция манипуляторов параллельно-последовательной структуры

 <p>1. Неполнопараллельный, $W=2, m_6=0$</p>	 <p>2. Неполнопараллельно-последовательный, $W=3, m_6=0$</p>	 <p>3. Неполнопараллельно-последовательный, $W=3, m_6=0$</p>
 <p>4. Параллельно-последовательный, $W=4, m_6=1$</p>	 <p>5. Параллельно-последовательный, $W=5, m_6=2$</p>	 <p>6. Параллельный комбинированный, $W=5, m_6=2$</p>
 <p>7. Неполнопараллельно-перекрестно-последовательный, $W=4, m_6=1$</p>	 <p>8. Параллельно-последовательно-перекрестный, $W=5, m_6=2$</p>	 <p>9. Параллельно-перекрестно-комбинированный, $W=7, m_6=2$</p>

На основе анализа предложенных параллельно-последовательных манипуляторов найдены зависимость маневренности m_6 манипулятора параллельно-последовательной структуры в базовой плоскости от степени подвижности выходного звена W (рисунок 3); зависимость минимально необходимого количества кинематических пар от количества степеней подвижности выходного звена W и минимально необходимого числа подвижных

звеньев n (рисунок 4); число независимых контуров Гохмана k от числа степеней подвижности W (3) и другие аналитические и графические зависимости.

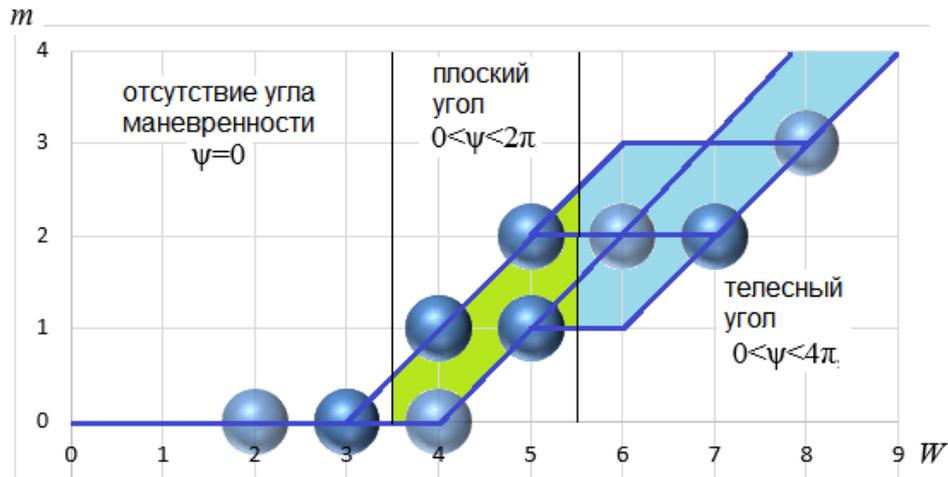


Рисунок 3 – Зависимость маневренности и формы угла сервиса в базовой плоскости от степени подвижности выходного звена

Как показывает анализ, область существования параллельно-последовательных манипуляторов на основе трипода (рисунок 4) ограничена слева по подвижности $W \geq 1$, снизу по числу подвижных звеньев $n_{min} \geq 3$ и сектором между прямыми $n_{min} = 2W$ и $n_{min} = 3W$.

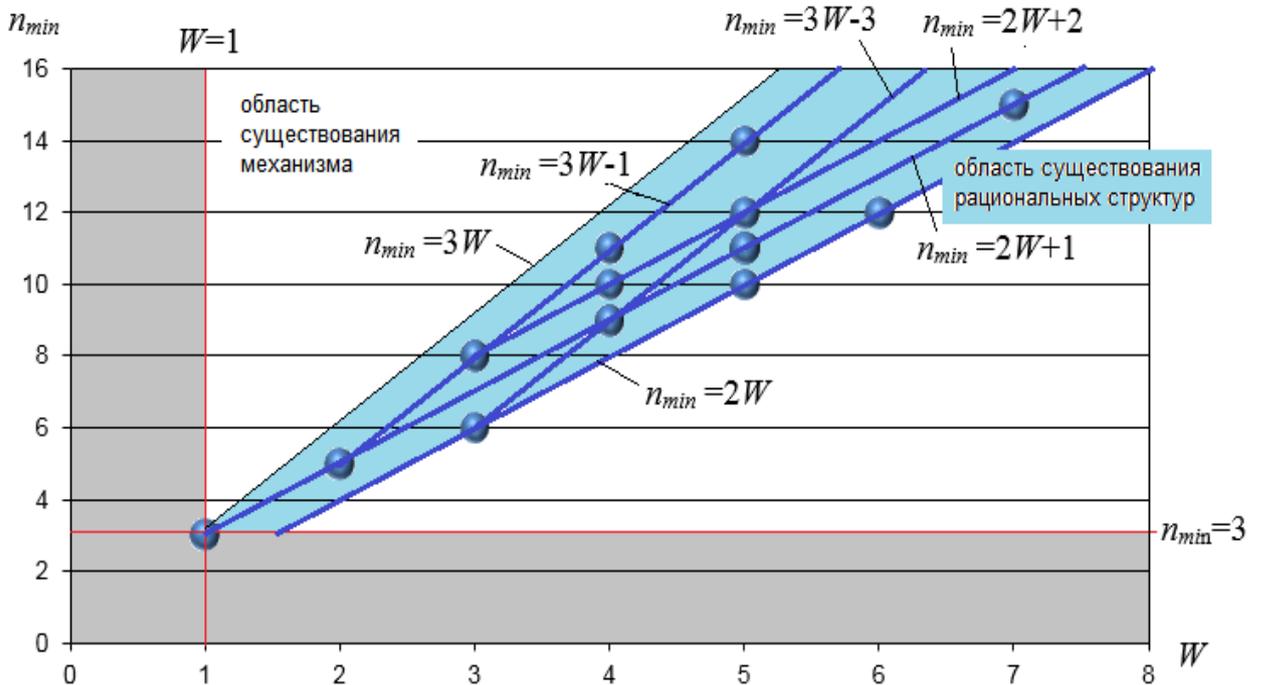


Рисунок 4 – Зависимость минимально достаточного количества подвижных звеньев от степени подвижности выходного звена

Внутри сектора проходит множество прямых, общую запись которых можно представить в виде

$$n_{min} = 2W + b \text{ и } n_{max} = 3W - b, \tag{1}$$

где b – коэффициент, зависящий от степени подвижности выходного звена W .

Коэффициент b принимает следующие значения

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } W = 1 \\ \frac{W}{2}, & \text{при } W \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

Для пространственных исполнительных механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры при отсутствии лишних подвижностей и избыточных связей число независимых контуров Гохмана k имеет следующую зависимость от числа степеней подвижности W

$$\begin{cases} k = W + 1, & \text{при } W = 1, \\ k = W, & \text{при } W = 2, \\ k = W - 1, & \text{при } W \geq 3. \end{cases} \quad (3)$$

Используя полученные зависимости разработан алгоритм итерационного синтеза рациональных структурных схем работоспособных механизмов с кинематическими парами не ниже III-го класса в виде следующей последовательности действий:

1. Задаётся требуемая степень подвижности механизма W .
2. Границы области поиска ограничиваются по числу подвижных звеньев прямыми (1) и (2) и по суммарному минимально необходимому числу кинематических пар

$$\Sigma p_{imin} \leq n_{min} + W \quad (4)$$

3. Определяется число независимых контуров Гохмана k из условия (3).
4. Задаются ограничения по подвижностям кинематических пар p_5, p_4, p_3 .
5. Решается система линейных уравнений

$$\begin{cases} W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ k = p_\Sigma - n, \\ p_\Sigma = p_5 + p_4 + p_3, \\ f_\Sigma = p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{cases} \quad (5)$$

и неравенства $f_\Sigma \geq W + 6k$, где f_k – сумма подвижностей кинематических пар.

6. Проверка полученных вариантов решений на целочисленность, анализ схем и выбор работоспособных и рациональных.

Алгоритм реализован в виде программы на языке *Visual Basic*.

Выявленные закономерности, представленные выше, позволили представить задачу поиска рациональных структурных схем в виде задачи условной оптимизации, которую можно решить методами линейного программирования.

В общем виде задача условной оптимизации имеет вид:

$$\begin{aligned} 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 &= W(n, p_i), \text{ при } n \rightarrow \min, \\ p_5 + p_4 + p_3 &\geq W + n_{min}, \\ p_5 + 2p_4 + 3p_3 &\geq W + 6k, \\ k &= \Sigma p_i - n, \\ n > 0, p_5 &\geq 0, p_4 \geq 0, p_3 \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

где $W(n, p_i)$ – целевая функция; k – определяется из условия (3).

Исходя из общей постановки задачи условной оптимизации, задавшись конкретным значением целевой функции W , система становится вполне определима, которую удобно представить матричным виде

$$X=A^{-1}B \quad (7)$$

или

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5/6 & 2/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} n - W/6 \\ \Sigma p_{i\min} \\ f_{\Sigma} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Таким образом, задача поиска рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры может быть сведена к задаче линейного программирования, при этом количество альтернативных решений зависит от заданных границ области поиска (ограничений) и начальных условий, например, задаваемого минимального числа подвижных звеньев механизма манипулятора.

С помощью разработанных алгоритмов выполнена оптимизация структуры по количеству кинематических пар погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом.

Для обеспечения заданной зоны обслуживания захвата манипулятора-трипода разработаны методика и алгоритм геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, симметричного относительно базовой плоскости, обеспечивающие значения показателей эффективности, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

Методика и алгоритм геометрического синтеза использованы при проектировании манипуляторов-триподов с заданными геометрическими параметрами.

В третьей главе решена прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов параллельно-последовательной структуры, приведен алгоритм формирования зоны обслуживания.

Решение обратной задачи кинематики для манипулятора – трипода на подвижном основании (схема 4, таблица 1), как наиболее обобщённого варианта компоновок, из которого без особых преобразований получаются схемы подавляющего большинства манипуляторов этого семейства, представлено в виде уравнений связей между обобщенными координатами захвата $x(t), y(t), z(t)$ в абсолютной системе отсчета и длинами звеньев $l_k(t), k = 1 \div 4$ - обобщенными координаты манипулятора:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{x^2 + (y + OA \cdot \sin \varphi)^2 + (z - OA \cdot \cos \varphi)^2}, \\ l_2(t) &= \sqrt{(x - OB)^2 + y^2 + z^2}, \\ l_3(t) &= \sqrt{(x + OB)^2 + y^2 + z^2}, \\ l_4(t) &= \sqrt{(OK - OA \cdot \sin \varphi)^2 + (OA \cdot \cos \varphi - DK)^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где OA, OB, OK, DK - геометрические параметры основания манипулятора – трипода и точек его крепления на поворотном основании (рисунок 5).

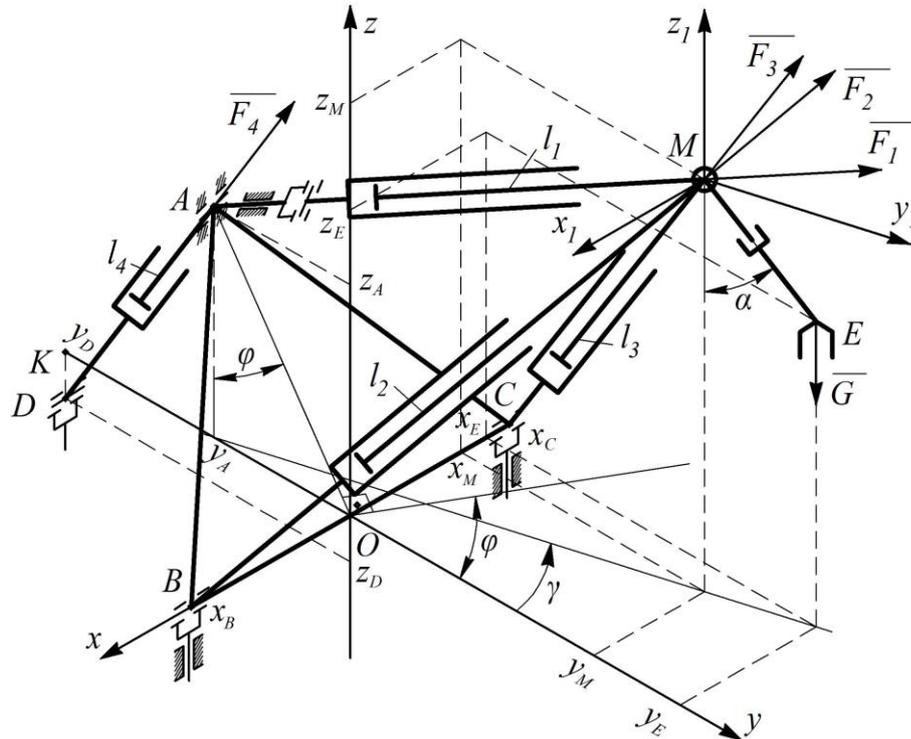


Рисунок 5 - Расчётная схема манипулятора – трипода на подвижном основании:

Решением прямой задачи кинематики получены зависимости между декартовыми координатами точки M , длинами звеньев l_1, l_2, l_3, l_4 и взаиморасположением их точек крепления. Эти зависимости применительно к рассматриваемой схеме (рисунок 5) в неподвижной системе координат имеют вид

$$\begin{cases} x_M = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4x_B}, \\ y_M = y_0 + \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\varphi) - \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \sin(\varphi), \\ z_M = \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\varphi) + \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \cos(\varphi), \end{cases} \quad (10)$$

где $A = -l_1^2(t) + 0,5l_2^2(t) + 0,5l_3^2(t)$, $\varphi(t) = \arcsin \frac{OK^2 + DK^2 + OA^2 - l_4^2(t)}{2OA\sqrt{DK^2 + OK^2}} + \gamma$, $\gamma = \arcsin \frac{DK}{\sqrt{DK^2 + OK^2}}$.

Полученная система уравнений (10) полностью определяет теоретическую возможную область перемещений точки M в пространстве, т.е. рабочую зону обслуживания манипулятора, а также позволяет сформулировать условия, исключающие попадания его в мертвое положение.

Сечения зоны обслуживания плоскостями yOz и xOy представлены на рисунке 6.

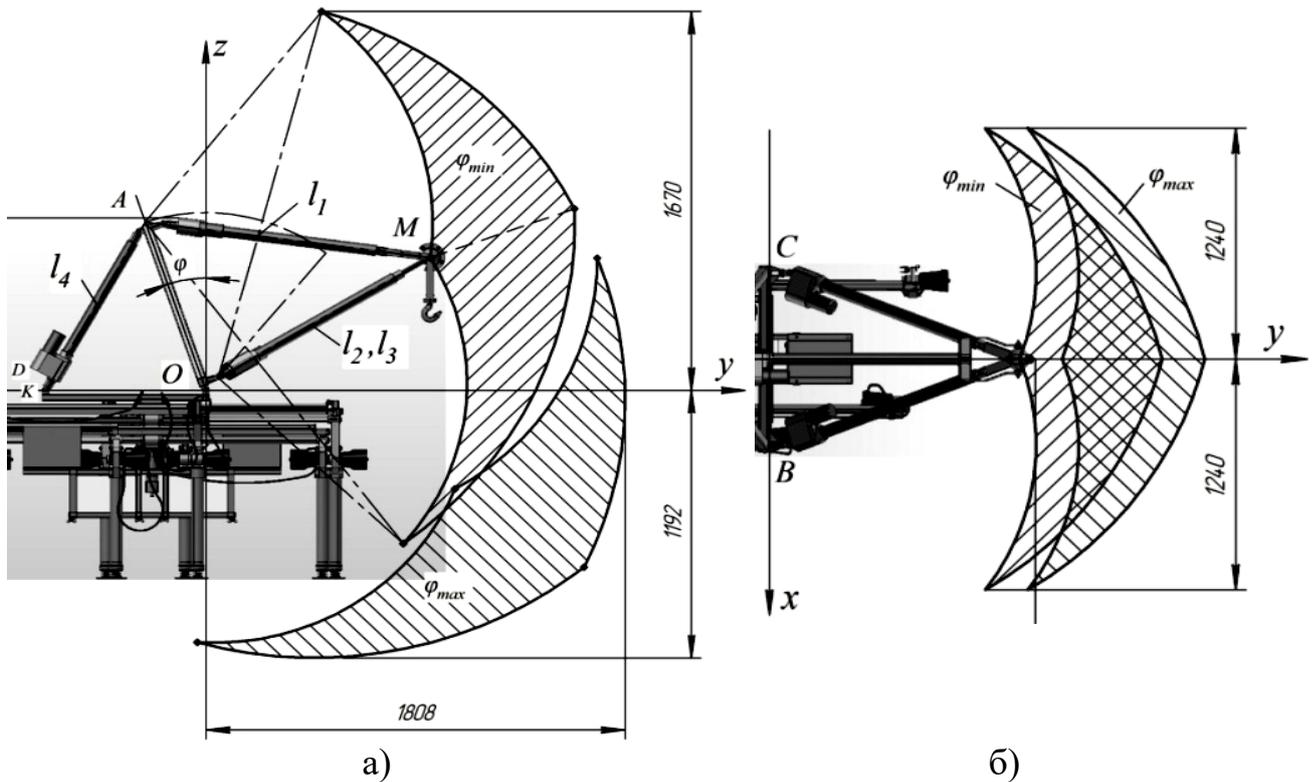


Рисунок 6 - Сечения зоны обслуживания манипулятора координатными плоскостями yOz (а) и xOy (б)

С целью определения усилий в исполнительных звеньях манипулятора и их кинематических характеристик разработана модель динамики движения манипулятора–трипода. Реальный механизм заменен динамически эквивалентным, содержащим две сосредоточенные массы: m в месте крепления захвата (точка M) и m_A в точке A поворотного основания (рисунок 5).

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение манипулятора со связями (9), полученных с помощью уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, представлена в следующем виде

$$A_q \cdot \vec{a}_q = I^T \cdot \vec{F}_l + \vec{Q}, \quad (11)$$

где $A_q = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_A A O^2 \end{pmatrix}$ – диагональная матрица инерционных коэффициентов;

$\vec{a}_q = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\varphi}]^T$ – вектор проекций ускорений захвата и углового ускорения поворотного основания;

$\vec{Q} = [0, 0, -mg, m_A g \cdot O A \sin \varphi]^T$ – вектор потенциальных сил;

$I^T(x, y, z, \varphi)$ – кинематическая матрица - транспонированная управляющая матрица.

Вектор усилий в звеньях манипулятора $\vec{F}_l = [F_1, F_2, F_3, F_4]^T$ находится из (11)

$$\vec{F}_l = (I^T)^{-1} (A_q \cdot \vec{a}_q - \vec{Q}), \quad (12)$$

где $(I^T)^{-1}$ – матрица обратная транспонированной управляющей.

Анализ усилий в звеньях манипулятора параллельно-последовательной структуры показал, что для компоновочных схем 3 - 9 (таблица 1) наиболее нагруженными звеньями механизма манипулятора являются звенья l_1 и l_4 .

Для оптимального планирования траекторий в пределах зоны обслуживания найдены значения весовых коэффициентов $C_i = N_i/G$, определяемых отношением усилий в линейных двигателях, к весовой нагрузке, приложенной к рабочему органу манипулятора в каждой точке обслуживаемого пространства.

Представлена общая постановка задачи формирования и планирования траекторий, а также рассмотрены варианты планирования траекторий для конкретного технологического процесса погрузки-разгрузки контейнеров манипулятором-триподом на подвижном основании для различных случаев. Обоснованы задачи выбора кусочной траектории и расстановки узловых точек, либо обхода препятствий по криволинейной траектории (рисунок 7).

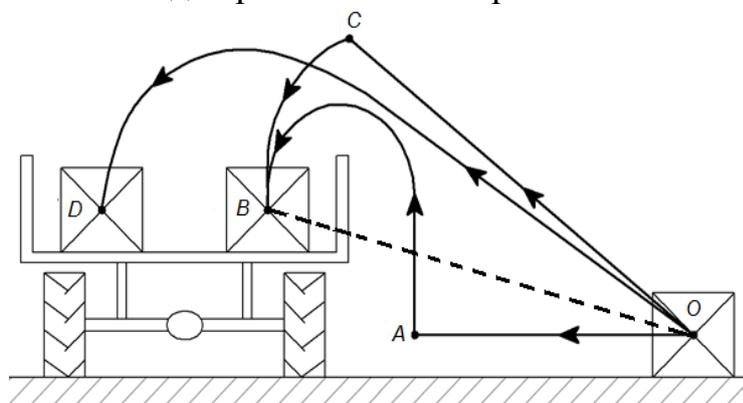


Рисунок 7 - Возможные кусочно-криволинейные траектории погрузки контейнеров манипулятором

Установлено, что при выполнении погрузочно-разгрузочных работ со штучными грузами без использования транспортеров длина траектории и её форма не являются постоянными, соответственно законы движения по траектории также могут различаться как для отдельных участков, так и в целом. Однако большая часть траекторий может быть представлена прямыми участками.

Общая задача перемещения исполнительного элемента (захвата) разделяется на три этапа – позиционирование захвата, обеспечиваемое геометрией механизма, синтез его траектории в пространстве, ограниченном рабочей зоной и определение закона движения по полученной траектории.

При планировании траекторий для конкретного технологического процесса учтены такие важные характеристики манипуляторов как маневренность и манипулятивность. Проведенные расчеты показывают, что из представленных в таблице 1 манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода ненулевой маневренностью в базовой плоскости обладают большинство, вследствие чего задача позиционирования осложняется множеством возможных конфигураций механической системы.

Задача позиционирования захвата манипулятора при выполнении технологических операций состоит в перемещении его из начального состояния, которое определяется координатами точки $M_0(x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0})$ в конечное положение $M_k(x_{M_k}, y_{M_k}, z_{M_k})$. То есть, при известной начальной конфигурации манипулятора, определяемой обобщенными координатами l_{i0} , требуется найти конечную конфигурацию - значения обобщенных координат l_{ik} . l_4 .

Для решения поставленной задачи минимизируется квадратичная функция

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 C_i (l_{ik} - l_{i0})^2 + \frac{1}{2} C_4 (\varphi_k - \varphi_0)^2. \quad (13)$$

На обобщённые координаты манипулятора наложены конструктивные ограничения

$$l_{i \min} \leq l_{ik} \leq l_{i \max} \text{ и } \varphi_{\min} \leq \varphi_k \leq \varphi_{\max}. \quad (14)$$

Значения весовых коэффициентов C_1, C_4 принимаются тем больше, чем больше диапазон изменения усилий в соответствующих звеньях манипулятора.

Целевая функция в соответствии с методом Лагранжа имеет вид:

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 C_i (l_{ik} - l_{i0})^2 + \frac{1}{2} C_4 (\varphi_k - \varphi_0)^2 + \sum_{n=1}^3 \lambda_n f_n, \quad (15)$$

где λ_n – неопределённые множители Лагранжа.

Значения l_{ik}, φ_k по теореме Куна-Такера определяются из необходимых условий минимума целевой функции Φ^* .

В результате методом нелинейного программирования решением из системы 7-ми нелинейных уравнений определяются оптимальные значения l_1, l_2, l_3, φ , определяющих положение точки M манипулятора и множителей Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Представленная методика решения задачи позиционирования аналогично решается и для манипуляторов других компоновок на базе трипода.

После решения задачи позиционирования, необходимо решать задачу определения законов изменения обобщённых координат $l_i(t)$. Оптимальная по времени перемещения траектория, это прямая. Поэтому приняв такую траекторию задача позиционирования сводится к перемещению схвата по прямолинейному отрезку.

Законы изменения обобщённых координат манипулятора определяются выражениями (16) и решают задачу траекторного управления

$$\begin{cases} S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0}}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0} - z_A}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2z_A z_{M0} + z_A^2 = l_1(S)^2, \\ S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0} - x_B}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_B x_{M0} + x_B^2 = l_2(S)^2, \\ S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0} - x_C}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_C x_{M0} + x_C^2 = l_3(S)^2. \end{cases} \quad (16)$$

где K, L_{M0}, K_X, K_Y, K_Z - постоянные коэффициенты, определяемые начальными условиями x_{M0}, y_{M0}, z_{M0} , S – длина дуги

Задача контурного управления решается выбором закона движения по прямой (16) и обеспечивается функцией изменения от времени дуговой координаты. Закон изменения длин актуаторов от l_{i0} до l_{ik} и угла φ от φ_0 до φ_k задан исходя из условия «мягкого» трогания и останова, обеспечивающий синусоидальный закон изменения ускорения захвата

$$\ddot{S} = \frac{2\pi S_K}{T^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (17)$$

Характер изменения обобщенных координат манипулятора и декартовых координат захвата при движении его по прямой траектории по закону (17) представлен на рисунке 8.

Рассматриваемые в настоящей работе манипуляторы параллельно-последовательной структуры имеют зону обслуживания, которая не является выпуклым множеством координат в силу геометрических параметров манипулятора и ангулярной зоны действия. Поэтому при планировании прямолинейных траектории проверяется принадлежность отрезка траектории выпуклой области в пределах зоны обслуживания.

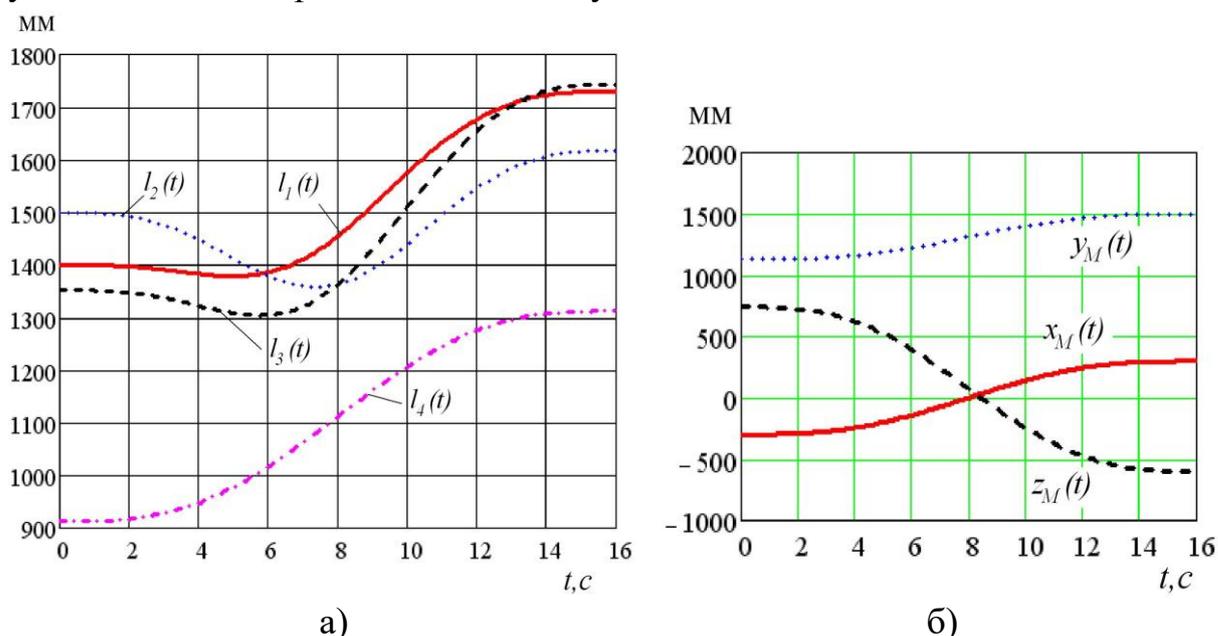


Рисунок 8 - Характер изменения обобщенных (а) координат манипулятора и декартовых координат (б) захвата при синусоидальном законе при перемещении его по прямолинейной траектории

При реализации прямолинейной траектории, возможны такие конечные точки позиционирования захвата манипулятора, для которых линейные скорости штоков звеньев 1, 2 и 3 изменяют знак, т. е. совершают в относительном движении возвратно – поступательные движения. Условие, при котором линейные скорости штоков звеньев 2 и (или) 3 знакопостоянные, состоит в выполнении неравенства $\beta \geq \pi/2$ и (или) $\gamma \geq \pi/2$, где β и γ углы между осями соответствующих звеньев и траекторией точки M (рисунок 9).

Значения углов β и γ между осями звеньев 2 и 3 и прямой M_0M_1 равны углам между их соответствующими направляющими векторами.

$$\beta = \arccos \left[\pm \frac{(x_{M0} - OB)(x_{Mk} - x_{M0}) + y_{M0}(y_{Mk} - y_{M0}) + z_{M0}(z_{Mk} - z_{M0})}{\sqrt{(x_{M0} - OB)^2 + (y_{M0})^2 + (z_{M0})^2} \cdot \sqrt{(x_{Mk} - x_{M0})^2 + (y_{Mk} - y_{M0})^2 + (z_{Mk} - z_{M0})^2}} \right], \quad (18)$$

$$\gamma = \arccos \left[\pm \frac{(x_{M0} + OB)(x_{Mk} - x_{M0}) + y_{M0}(y_{Mk} - y_{M0}) + z_{M0}(z_{Mk} - z_{M0})}{\sqrt{(x_{M0} + OB)^2 + (y_{M0})^2 + (z_{M0})^2} \cdot \sqrt{(x_{Mk} - x_{M0})^2 + (y_{Mk} - y_{M0})^2 + (z_{Mk} - z_{M0})^2}} \right]. \quad (19)$$

Условие, при котором линейная скорость штока звена 1 (рисунок 10) не изменяет знак имеет вид

$$V'_M - V'_A \geq 0 \quad (20)$$

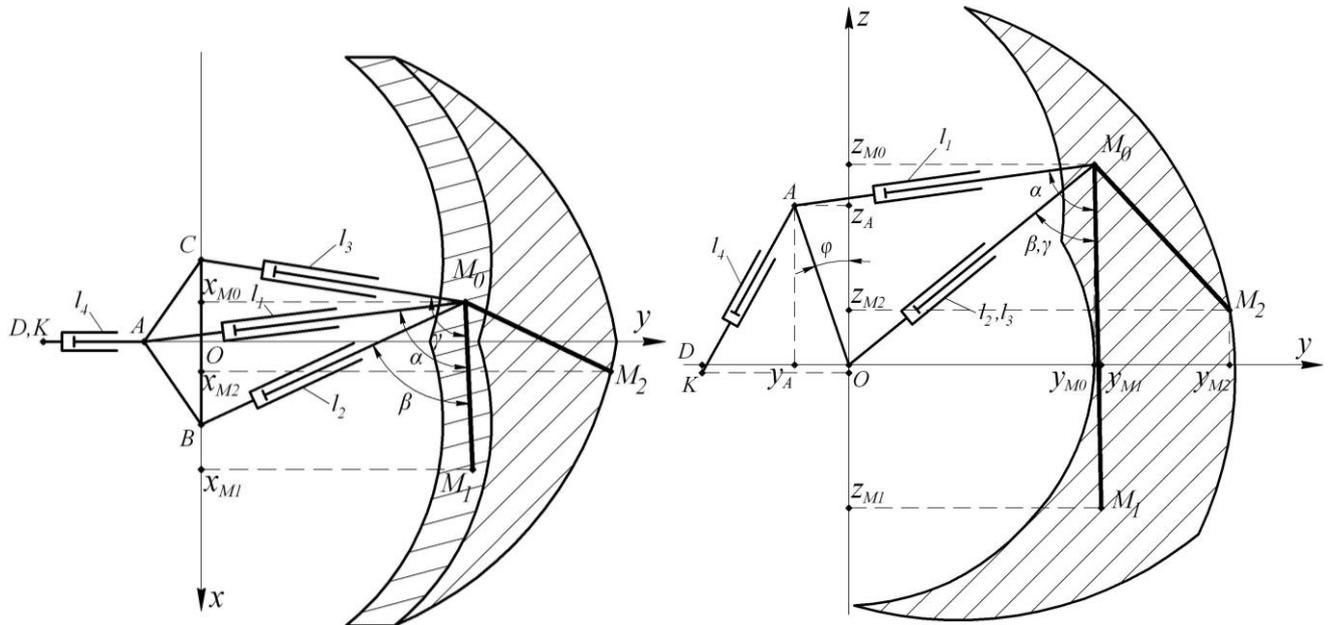


Рисунок 9 - К определению знака линейной скорости звеньев 2 и 3

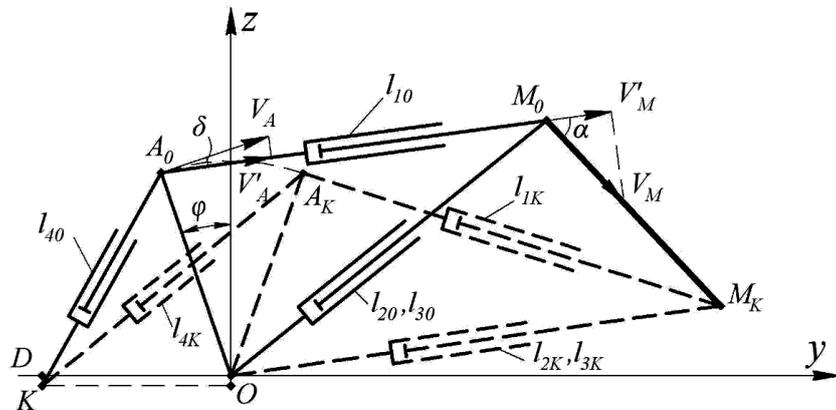


Рисунок 10 - К определению знака линейной скорости звена 1

Выполнение условий (18), (19) и (20) обеспечивает реализацию прямолинейной траектории при обработке которой, линейные скорости штоков звеньев 1, 2 и 3 не изменяют свой знак, таким образом реализуется наиболее благоприятный режим, с точки зрения управления, нагружения электропривода актуаторов и затрачиваемой работы.

В главе также выполнен параметрический синтез программных движений по криволинейным траекториям: по дуге окружности и по параболической траектории при заданном законе движения.

В четвёртой главе Разработаны математические модели манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие

проводить расчеты динамики пространственного управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены голономные связи. Расчетная схема манипулятора с четырьмя поступательными исполнительными звеньями, предназначенного для погрузочно-разгрузочных работ представлена в виде трех сосредоточенных масс: m в месте крепления захвата (точка M), m_A в точке A поворотного основания и m_G масса груза с подвесом в точке E (рисунок 5).

Дифференциальные уравнения Лагранжа с неопределенными множителями для обобщенных декартовых координат точки крепления подвеса $M[x(t), y(t), z(t)]$ и захвата с грузом $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ относительно абсолютной системы координат, и угла $\varphi(t)$ наклона основания манипулятора получены, используя формализм Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{d\Phi}{dq_k} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_k}, \quad k = 1 \div 7, \quad (21)$$

где $T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}m_G(\dot{x}_E^2 + \dot{y}_E^2 + \dot{z}_E^2) + \frac{1}{2}m_A \cdot O_1A^2 \cdot \dot{\varphi}^2$ - кинетическая энергия манипулятора; $\Pi = mg \cdot z + m_{AG} \cdot O_1A \cdot \cos \varphi + m_G g \cdot z_E$ - потенциальная энергия; $\Phi = \frac{1}{2}b(\dot{x}_E^2 + \dot{y}_E^2 + \dot{z}_E^2)$ - функция рассеивания Рэлея; b - коэффициент линейного вязкого сопротивления.

Значения приведенных масс определены из равенства кинетических энергий модели манипулятора и реального объекта.

Для рассматриваемой системы к уравнениям голономных связей (9) между обобщенными координатами точки крепления подвеса, захвата с грузом и длинами исполнительных звеньев $l_1(t), l_2(t), l_3(t), l_4(t)$ добавляются еще два:

$$\begin{aligned} f_5 &= \sqrt{(x-x_E)^2 + (y-y_E)^2 + (z-z_E)^2} - l_5 = 0, \\ f_6 &= x_E(y + OA \sin \varphi) - x(y_E + OA \sin \varphi) = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где l_5 - постоянная длина подвеса груза.

Задавшись программными законами $l_1^*(t), l_2^*(t), l_3^*(t), l_4^*(t)$ изменения обобщенных координат манипулятора, необходимыми для выполнения какого-либо технологического процесса решением системы семи дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение манипулятора с голономными связями, находятся движущие усилия в звеньях манипулятора $F_k, k = 1 \div 4$, усилие в подвесе F_5 и параметрическая траектория $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$.

При реализации движения захвата по прямой по закону изменения дуговой координаты, обеспечивающего трогание и остановку захвата с нулевыми значениями скорости и ускорения

$$S(t) = S(T) \cdot \left(10 \frac{t^3}{T^3} - 15 \frac{t^4}{T^4} + 6 \frac{t^5}{T^5} \right), \quad (25)$$

получены законы изменения движущих сил (рисунок 11).

Результаты численных исследований позволяют сформулировать технические требования к приводам, разрабатываемых образцов манипулятора.

На рисунке 12 приведены результаты численных исследований зависимости моментов сил сопротивления на валу электродвигателей исполнительных актуаторов при перемещении захвата манипулятора в плоскости yOz при нагрузке на захват равной 420 Н.

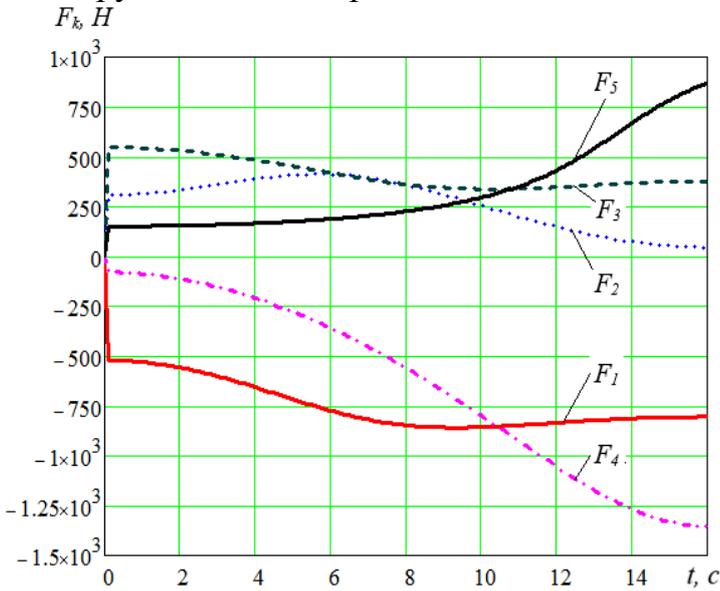


Рисунок 11 - Закон изменения движущих сил при движении захвата по прямой

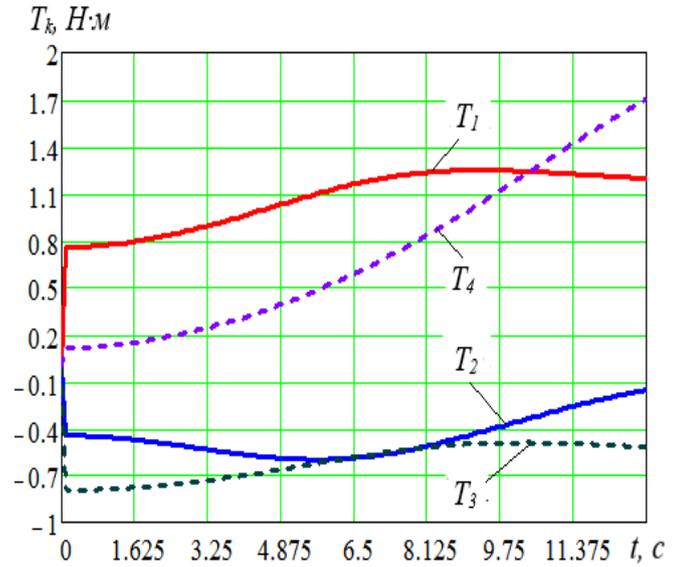


Рисунок 12 - Зависимости моментов сил сопротивления на валу электродвигателя исполнительных цилиндров при их выдвигении

В манипуляторах в качестве исполнительных звеньев часто применяют электроактуаторы с приводным механизмом, состоящим из двигателя постоянного тока, необратимого червячного редуктора, приводного винта, гайки и направляющей, связанной с поступательной парой скольжения (рисунок 13).

Механизм передачи движения от двигателя к перемещаемой массе принят трехмассовой системой, состоящей из ротора электродвигателя с червяком, червячного колеса с винтом и гайки со штоком. В качестве обобщенных координат k привода выбран угол поворота α_{1k} выходного вала двигателя (червяка), угол поворота α_{2k} червячного колеса и угол поворота α_{3k} винта при входе в гайку исполнительного цилиндра.

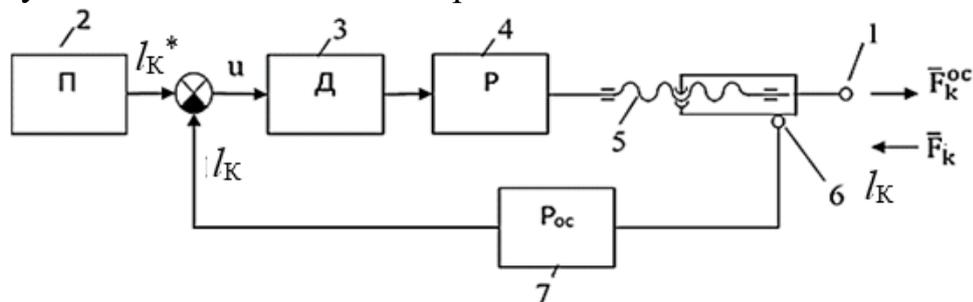


Рисунок 13 - Структурная схема приводного механизма исполнительного звена манипулятора; 1 – шток; 2 – устройство программного управления; 3 – электродвигатель; 4 – червячный редуктор; 5 – винтовая передача; 6 – датчик обратной связи; 7 – регулятор обратной связи

Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей, учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволяет исследовать ее влияние на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания и сформулировать условия отсутствия динамического заклинивания привода.

Для грузовых манипуляторов, при небольших значениях ускорений переносимого условия отсутствия силового и динамического заклинивания выглядят в виде

$$F_k \geq -\frac{T_{c2}}{0.45d_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{i}_k \left(m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45 p n d_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} \right), \quad \text{при } \omega_k > 0; \quad (23)$$

$$F_k \leq \frac{T_{c2}}{0.45d_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{i}_k \left(m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45 p n d_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} \right), \quad \text{при } \omega_k \leq 0. \quad (24)$$

где F_k – усилие на штоке, определяемое нагрузкой при работе манипулятора; T_{c1}, T_{c2} – постоянные моменты сил сопротивления, приложенные к червяку и к валу червячного колеса; ω_{1k} – угловая скорость на валу двигателя. I_1, I_2 – моменты инерции червяка с ротором и червячного колеса с винтом; m_3 – масса гайки со штоком исполнительного звена; β_3, p, n, d_3 – параметры винтовой передачи.

Для отсутствия динамического заклинивания должно выполняться условие

$$\frac{T_{c2}}{T_{c1}} > \frac{I_2 \frac{2\pi}{p n i \eta} + \frac{0.45 d_3 m_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i \eta}}{I_1 \frac{2\pi}{p n} i}. \quad (25)$$

Определена устойчивость движения исполнительных звеньев манипулятора – трипода на подвижном основании нахождением корней характеристического уравнения. Проведен анализ динамических ошибок с целью уменьшения отклонений реализуемых движений захвата от задаваемых

$$\psi_k = l_k(t) - l_k^*(t), \quad \dot{\psi}_k = \dot{l}_k(t) - \dot{l}_k^*(t), \quad (k = 1 \div 4). \quad (26)$$

Передаточная функция, связывающая динамическую ошибку в замкнутой системе управления с возмущением, имеет вид

$$W_{\phi\psi} = \frac{1}{p(\tau_1^2 p^2 + \tau_2 p + 1) + r \frac{p n}{2\pi s i} \cdot W_{oc}(p)}, \quad (27)$$

где $W_{oc}(p)$ – передаточная функция регулятора обратной связи.

Для анализа энергетических возможностей манипулятора (энергетически допустимой зоны обслуживания), принята прямолинейная траектория захвата по вертикали и горизонтали в направлениях осей Oz и Oy (рисунок 5) из крайних положений, допускаемых теоретической зоной обслуживания манипулятора.

Численные исследования проводились с манипулятором со следующими параметрами: максимальный допустимый момент на валу электродвигателя $T_{k,\max} = 0.55$ Н·м; максимальная нагрузка толкания и втягивания, соответствующая

этому моменту равна 2300 Н; первый исполнительный цилиндр изменяет свою длину в пределах $l_1 = (1465 \pm 305)$ мм, второй и третий в пределах $l_{2,3} = (1445 \pm 305)$ мм, четвертый $l_4 = (1072 \pm 229)$ мм; максимальная скорость при полной нагрузке 45 мм/с, в отсутствии нагрузки 65 мм/с. В результате решения задачи идентификации для разработанного манипулятора получено $m = 57$ кг, $m_A = 45$ кг.

Для указанных режимов работы приводов манипулятора-трипода на подвижном основании режимов динамического заклинивания не наблюдалось, это доказано проведенными теоретическими (рисунок 14), а в последствие и экспериментальными исследованиями.

Полученные аналитические выражения для оценки функциональных возможностей манипулятора позволяют проводить проектирование следящего привода манипулятора – трипода.

Решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата, позволяющих существенно снизить инерционные нагрузки на конструкцию представлено для двух случаев: при заданной конечной конфигурации манипулятора и при неизвестной конфигурации манипулятора в конечный момент времени.

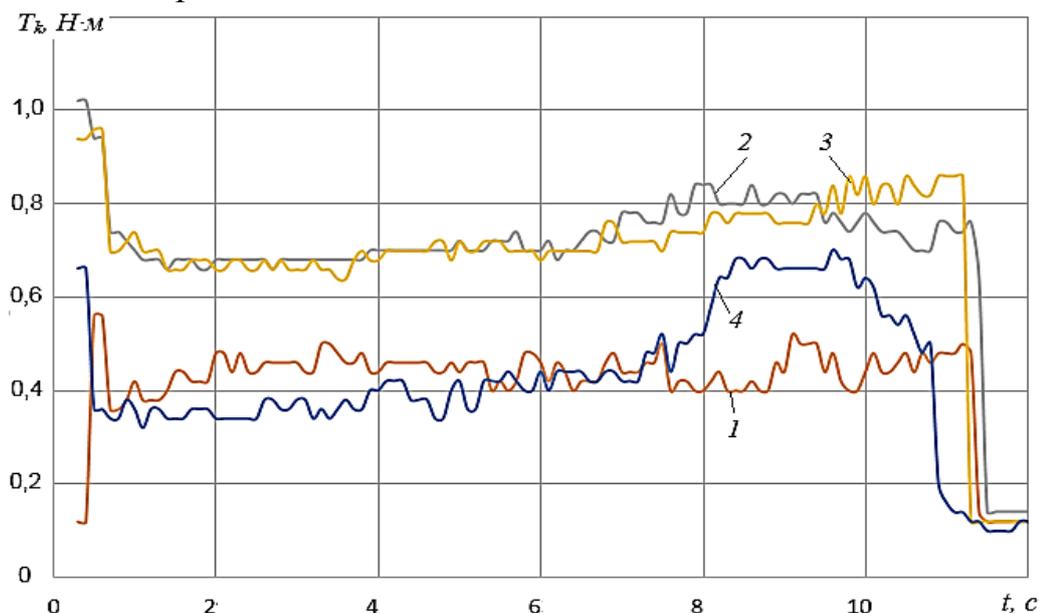


Рисунок 14 - Зависимость момента электродвигателя при выдвигении цилиндров: 1, 2, 3, 4 – номера соответствующих исполнительных звеньев

Для первого случая все переменные состояния известны в начальный $t_0 = 0$ и в конечный $t_f = T$ моменты времени.

Для грузового манипулятора целесообразно в качестве закона изменения длин исполнительных цилиндров принять законы, получающиеся в результате минимизации функционала

$$I = \int_0^T [\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2] dt. \quad (28)$$

Первые три слагаемых в функционале (28) представляют собой квадрат абсолютного ускорения точки подвеса захвата ($\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2$). Ограничение модуля этого ускорения, уменьшает величину возмущающих сил инерции, действующих на груз, переносимый на подвесе, и уменьшает амплитуду раскачивания груза при его перемещении. Четвертое слагаемое является квадратом касательного ускорения точки крепления привода, поворотного основания - $O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2$. При функционировании манипулятора этот привод является наиболее нагруженным, в том числе силами инерции. Так как, в прототипе исследуемого манипулятора, применяется электропривод постоянного тока с самотормозящейся механической передачей, то при значительных отрицательных ускорениях, возможно реализация режима силового или динамического заклинивания. Следствием является неустойчивая работа привода. В связи с этим, минимизация ускорения выходного звена (точка A) четвертого привода, является обоснованным. Управляющими функциями являются усилия в звеньях манипулятора $u_k(t) = F_k(t)$, $k = 1 \div 4$.

Задача решена методом классического вариационного исчисления. Траектория точки подвеса захвата, удовлетворяющая функционалу (28) – прямая

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3} t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2} t^2 + x_k(0). \quad (29)$$

Подставляя выражения $x_1 = x(t)$, $x_3 = y(t)$, $x_5 = z(t)$ и $x_7 = \varphi(t)$ в (9), находятся программные законы изменения длин исполнительных звеньев $l_1^*(t)$, $l_2^*(t)$, $l_3^*(t)$, $l_4^*(t)$.

Законы изменения обобщенных координат манипулятора и программные усилия, необходимые для реализации системой управления синтезированных законов движения звеньев манипулятора, находятся из решения уравнений динамики. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 15.

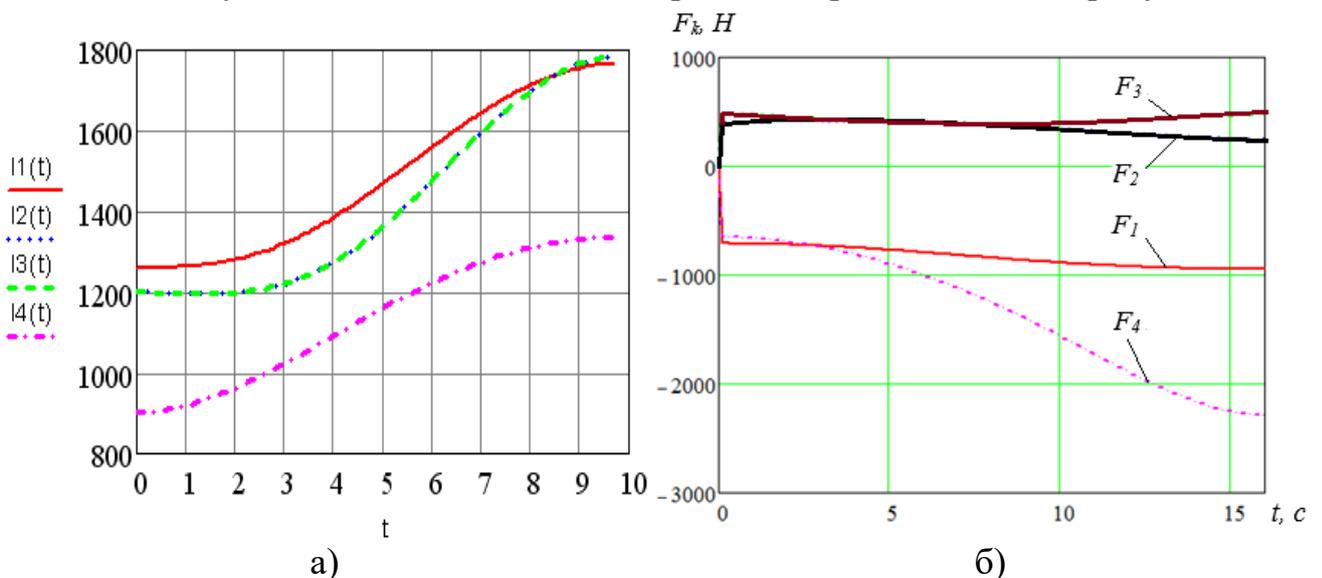


Рисунок 15 – Полученные в результате динамического синтеза законы изменения длин звеньев (а) и законы изменения программных управляющих усилий (б) в исполнительных звеньях манипулятора

Для второго случая синтеза оптимальных программных усилий при неизвестной конфигурации манипулятора в конечный момент времени, необходимость которого может возникнуть в случае ограниченного рабочего пространства, конечное значение угла поворота основания $\varphi(T)$ не задано, а потому неизвестны значения длин звеньев $l_1(T)$ и $l_4(T)$.

В этом случае критерий качества выбран в форме

$$I = V(x_7(T)) + \frac{1}{2} \int_0^T [\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2] dt. \quad (30)$$

В результате решения вариационной задачи получен закон изменения координат.

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3} t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2} t^2 + x_k(0). \quad (31)$$

Таким образом, траектория захвата, удовлетворяющая функционалу (30) прямая. Для определения закона изменения угла поворота основания принято в качестве функции конечного состояния следующее выражение

$$V(\varphi(T)) = -\frac{\mu \cdot O_1 A^2 \cdot \varphi^2(T)}{2T^3}, \quad (32)$$

где μ - постоянный коэффициент, значение которого определяется по результатам анализа, полученного решения и может корректироваться на стадии проектирования.

С учетом граничных условий получено

$$\varphi(t) = \frac{\mu \cdot \varphi(T)}{6T^3} t^3 - \frac{\mu \cdot \varphi(T)}{4T^2} t^2 + \varphi_7(0). \quad (33)$$

Тогда при $t=T$ определяется неизвестное значение угла поворота основания в конечный момент времени $\varphi(T) = \frac{12}{12 + \mu} \varphi(0)$, а из уравнений (9) находятся

программные законы изменения длин звеньев $l_k^*(t)$ манипулятора. Программные усилия, необходимые для реализации системой управления синтезированных законов движения звеньев манипулятора, находятся из решения уравнений динамики относительно управляющих усилий.

Полученные (29), (31) и (33) выражения использованы при расчёте параметров программного движения манипулятора-трипода на поворотном основании, в составе робототехнического комплекса РШ-7, изображённого на рисунке 1, а).

Проведено сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по различным траекториям и законам движения по траектории. Результаты численного моделирования движения захвата манипулятора по прямой траектории, задаваемой различными способами, представлено на рисунках 16, 17.

Как видно из рисунка 16, а) характер изменения обобщенных координат при движении точки крепления захвата по прямой по программным законам заданным параметрически (кривые 1', 2', 3', 4') практически идентичен характеру изменения обобщенных координат при движении по программным законам, полученным в результате динамического синтеза (кривые 1, 2, 3, 4). При

реализации программных движений манипулятора по прямой по законам, полученным в результате динамического синтеза, макси-мальные значения скоростей штоков электроцилиндров ниже на 10...25 мм/с, чем при движении точки крепления захвата по прямой, задаваемом параметрически (рисунок 16, б).

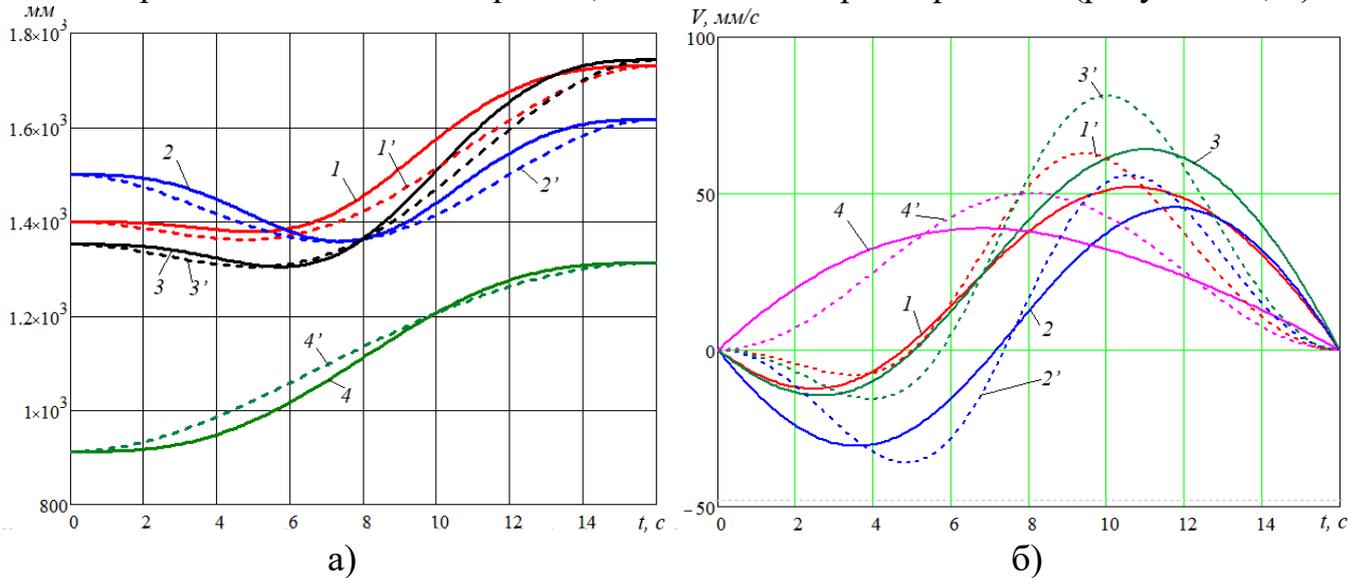


Рисунок 16 – Характер изменения обобщенных координат (а) и линейных скоростей (б) исполнительных звеньев при движении захвата по прямой по синтезированным законам – 1, 2, 3, 4 и по прямой траектории, заданной параметрически - 1', 2', 3', 4'

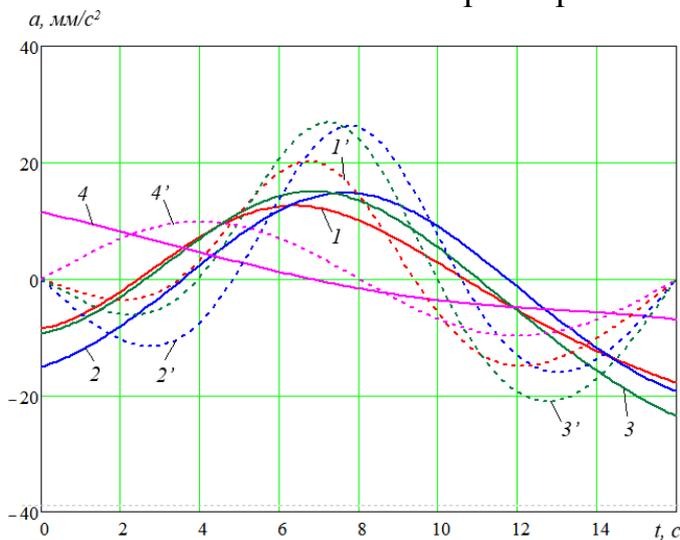


Рисунок 17 – Характер изменения линейных ускорений исполнительных звеньев при движении захвата по прямой по синтезированным законам – 1, 2, 3, 4 и по прямой траектории, заданной параметрически - 1', 2', 3', 4'

По результатам численного моделирования проведено сравнение результатов реализации программных движений по прямой траектории и по законам, полученным в результате динамического синтеза с результатами движения точки крепления захвата манипулятора по законам «мягкого» трогания

Вследствие чего максимальные значения ускорений штоков исполнительных звеньев по законам, полученным в результате динамического синтеза меньше на 8...12 мм/с² (рисунок 17), Однако хотя ускорения штоков электроцилиндров при реализации синтезированных законов программных движений (кривые 1, 2, 3, 4) изменяются более монотонно, чем при программных движениях, заданных параметрически (кривые 1', 2', 3', 4'), в момент трогания и останова происходит скачкообразное возрастание ускорений.

и останова по заранее неопределенной траектории при одинаковых конфигурациях манипулятора (рисунок 18).

Численное моделирование для этих случаев проводилось при одинаковом времени перемещения захвата из начального положения в конечное.

Сравнение управляющих усилий в исполнительных звеньях при реализации программных движений по прямой траектории (кривые 1, 2, 3, 4) и по заранее неопределенной траектории (кривые 1', 2', 3', 4') показывает, что законы изменения усилий практически одинаковы в обоих случаях. Работа движущих сил, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении захвата по прямой меньше на 5,3%...18,2% (в зависимости от исполнительного звена) чем при движении захвата по заранее неопределенной траектории при одном и том же законе программного движения.

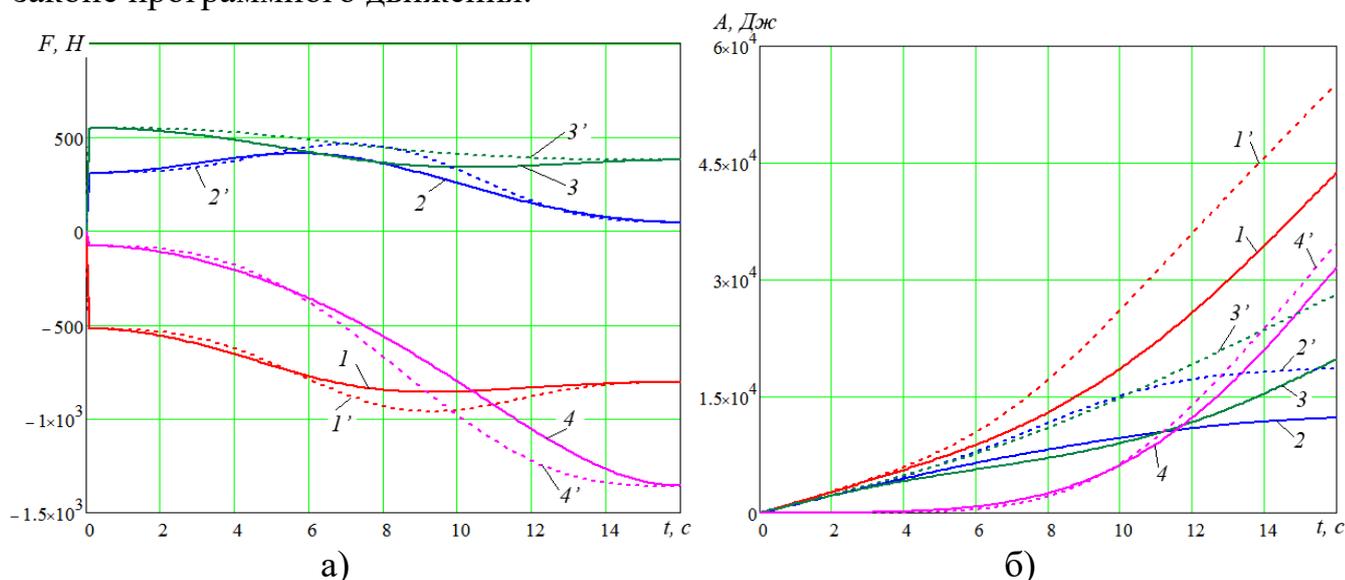


Рисунок 18 – Характер изменения управляющих усилий (а) в исполнительных звеньях и работа движущих сил (б), затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

В пятой главе с целью экспериментальной проверки результатов теоретических исследований спроектировано и изготовлено два варианта систем управления, предназначенных для разных по составу и функциональным возможностям манипуляционных устройств. В первом варианте встроенная система управления реализуется по централизованной схеме с единственным мощным контроллером или одноплатным микрокомпьютером, а во втором – многопроцессорная распределенная модульная структура

Спроектирована система управления, позволяет определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения, минимизирующих время достижения заданной точки.

Численное и экспериментальное моделирование проводилось для одинаковых начальных условий и одинаковых конфигурациях манипулятора-трипода на подвижном основании (рисунок 19). Приведенные расчетные и экспериментальные зависимости изменения длин звеньев манипулятора от времени при движении захвата по прямой показали, что максимальное расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10% (рисунок 20). Совпадение, с учетом ошибок измерений, теоретических и экспериментальных результатов может служить подтверждением практической реализуемости, исследованных законов движения.

Проведена идентификация параметров математической модели манипулятора оценкой динамики парциальных движений. При этом оценивалась динамика упругого привода манипулятора при перемещении одной дискретной массы и при перемещении двух дискретных масс.

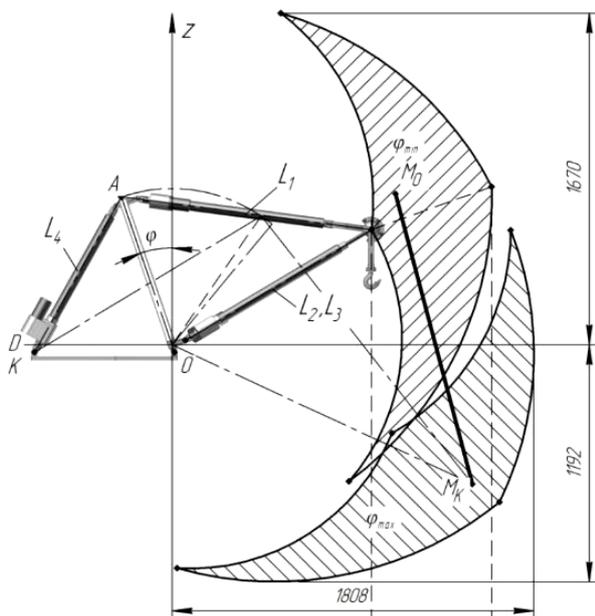


Рисунок 19 - Перемещение захвата по прямой траектории для синусоидального закона изменения ускорения

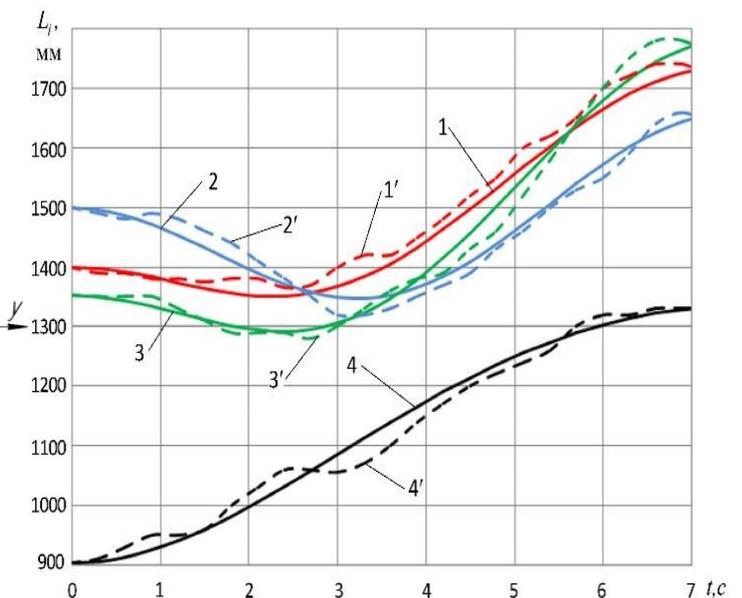


Рисунок 20 - Расчетные (кривые 1-4) и экспериментальные (кривые 1'-4') зависимости изменения длин звеньев 1 - 4 манипулятора от времени при движении захвата по прямой

На рисунке 21 приведены экспериментальные и теоретические зависимости аналога момента $T_1(t)$ на валу электродвигателя для двух режимов перемещения захвата манипулятора – выдвигание первого цилиндра (кривая 1, 2), втягивание первого цилиндра (кривая 3, 4), а также экспериментальные зависимости изменения длины хода первого цилиндра при выдвигании (кривая 5) и втягивании (кривая 6).

Экспериментальные исследования динамики движения манипулятора, показывают (рисунок 21), что изменения моментов приводных электродвигателей носит колебательный характер. Эти колебания вызываются силами инерции элементов конструкции манипулятора и переносимого груза, начальными условиями, а также переменностью управляющих сил и внешних нагрузок.

Оценка собственных частот механизма привода и проведенный спектральный анализ экспериментальных результатов, показали, что основной вклад в колебания привода составляют первая $6,38 \text{ с}^{-1}$ и вторая частоты $21,2 \text{ с}^{-1}$.

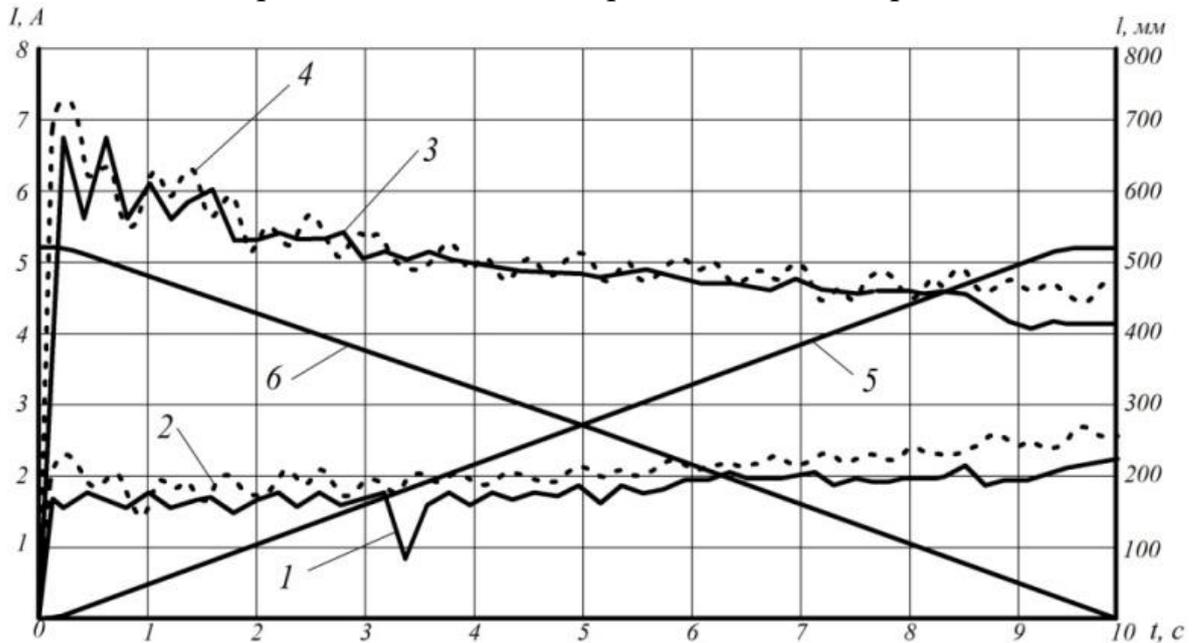


Рисунок 21 - Зависимость аналога момента, развиваемого электродвигателем привода исполнительного звена манипулятора: 1, 3 – экспериментальные кривые, 2, 4 – теоретические, а также экспериментальные зависимости изменения длины хода первого звена при выдвигании (кривая 5) и втягивании (кривая 6)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Расширена классификация пространственных механизмов параллельной структуры. Сформулированы ограничения области существования структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в виде аналитических и графических зависимостей.

2. Разработаны методы и алгоритмы оптимального синтеза и критерии выполнения условий существования рациональных структурных схем механизмов параллельно-последовательной структуры, позволяющие сузить границы поиска решений.

3. Разработан метод и алгоритм геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода, обеспечивающие значения показателей эффективности, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

4. Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры, для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат манипулятора.

5. Разработаны математические модели манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики пространственного управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены нестационарные голономные связи.

6. Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей, учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволила сформулировать аналитические условия при выполнении которых возможно возникновение неустойчивого режима работы привода при силовом и (или) динамическом заклинивании в передаче.

7. Представлены решения задач динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата, позволяющих существенно снизить инерционные нагрузки на конструкцию. Получены аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата. Сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по другим законам, позволило сформулировать условия рационального выбора закона перемещения захвата.

8. Проведена идентификация параметров математической модели манипулятора на основе исследования спектральных характеристик парциальных движений. Спроектирована система управления, позволяющая определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения.

9. Проведен сравнительный анализ кривых изменения координат, который показывает адекватность математической модели: переход от начальной к конечной конфигурации манипулятора выполняется при различных задаваемых законах перемещения захвата. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10%. Совпадение, с учетом ошибок измерений, теоретических и экспериментальных результатов служит подтверждением практической реализуемости, исследованных законов движения.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в периодических изданиях по перечню ВАК РФ:

1. **Несмиянов, И.А.** Улучшение динамических характеристик гидропривода погрузчика / И.А. Несмиянов, Ю.Г. Лапынин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. - №6. – с. 36-37.

2. **Несмиянов, И.А.** Совершенствование систем управления погрузочными манипуляторами / И.А. Несмиянов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. - №4. – С.21-22.

3. Герасун, В.М. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов** // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. - №2. - С.24-28.

4. Герасун, В.М. Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси / В.М. Герасун, А.Ф. Рогачёв, **И.А. Несмиянов**, В.Е. Павловский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. - №5. – С.51-54.

5. Герасун, В.М. Рычажные механизмы в телескопических стрелах погрузочных манипуляторов / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, П.В. Турыгин // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. - №8. – с.32-35.

6. **Несмиянов, И.А.** Система управления погрузочным манипулятором параллельной структуры / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьёва, В.И. Токарев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. Агроинженерия. – 2012. - №3 (54). – с.42-44.

7. Герасун, В.М. Исследование устойчивости транспортного агрегата с манипулятором / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, С.Д. Фомин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2013. - №1(29) – с.204-211.

8. Герасун, В.М. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. - №3. – с.2-8.

9. Герасун, В.М. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора-трипода с поворотным основанием / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. - №6. – с.21-26.

10. Герасун, В.М. Оценка массовых характеристик манипулятора с пространственным механизмом / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов, В.А. Серов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2013. - №3(31). – с.175-179.

11. **Несмиянов, И.А.** Система управления манипулятора сельскохозяйственного робота / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.Е. Павловский, Н.С. Воробьёва // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №3(35). – с.226-231.

12. Nesmiyanov, I. THE CONTROL SYSTEM OF THE MANIPULATOR AGRICULTURAL ROBOT. / **I.A. Nesmianov** V.V. Zoga, V.E. Pavlovsky, N.S.Vorobieva // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №3(35). – с.232-237.

13. Жога, В.В. Динамический синтез оптимальных программных движений манипулятора-трипода. / В.В. Жога, В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. - №2. – с.85-92.

14. **Несмиянов, И.А.** Программно-аппаратный комплекс мониторинга эксплуатационно-технологических параметров погрузочного агрегата. / Несмиянов И.А., Евдокимов А.П., Токарев В.И., Захаров Е.Н. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №4(36). – с.227-231.

15. Пындак, В.И. Расширение функциональных возможностей гидроманипуляционных систем. / В.И. Пындак, Н.С. Воробьева, **И.А. Несмиянов** // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2015. - № 3 (39). - С. 158-162.

16. Жога, В.В. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – т. 17 - №8. – с.525-530.

17. **Несмиянов, И.А.** Динамика манипулятора-трипода с упругой самотормозящейся передачей. / И.А. Несмиянов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2016. - № 3 (43). - С. 245-252.

18. Захаров, Е.Н. Синтез законов управления погрузочным манипулятором-триподом из условия минимизации ускорения поворотного основания / Е.Н. Захаров, **И.А. Несмиянов**, С.Д. Фомин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. - 2016. - № 4 (44). - С. 278-285.

Статьи и доклады в российских изданиях

19. **Несмиянов, И.А.** Пути повышения эффективности сельскохозяйственных погрузочных машин / И.А. Несмиянов // Материалы международной конференции «Естествознание на рубеже столетий». - Т. 3. - М.: 2001. - С.78-79.

20. Герасун, В.М. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических цепях манипуляторов / В.М. Герасун, А.Ф. Рогачёв, **И.А. Несмиянов** // Экстремальная робототехника. Труды XXI международной научно-технической конференции.– Санкт–Петербург: Изд–во «Политехника–сервис»; 2010. - С.169-172.

21. Герасун, В.М. Особые положения трипода в кинематических цепях манипуляторов / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Т.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С.196-198.

22. Герасун, В.М. Синтез манипулятора для информационного мобильного робота / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке, образовании и аграрном производстве – залог успешного развития АПК». Волгоградская ГСХА, - 2011. - С.17-20.

23. **Несмиянов, И.А.** Особенности структурного анализа и синтеза пространственных погрузочных манипуляторов / И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке, образовании и аграрном производстве – залог успешного развития АПК». Волгоградская ГСХА, - 2011. – С.21-24.

24. **Несмиянов, И.А.** Частный случай управления погрузочным манипулятором / И.А. Несмиянов, В.И. Токарев, Д.С. Елисеев. // Материалы международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке,

образовании и аграрном производстве – залог успешного развития АПК». Том.2 – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградская ГСХА. – 2011. – с.106-108.

25.Жога, В.В. Аварийно-спасательный робот высокой профильной проходимости / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Еременко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Экстремальная робототехника: труды международной научно-технической конференции. Санкт Петербург, - 2011. – С.138-141.

26.**Несмиянов, И.А.** Антропоморфная система управления погрузочным манипулятором-триподом / И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Материалы Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем». Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, - 2012.- С.233-236

27.**Несмиянов, И.А.** Структурно-геометрический синтез манипулятора-трипода с кинематическими парами 5 класса / И.А. Несмиянов, В.М. Герасун, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем». Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, - 2012. – С.236-240

28.**Несмиянов, И.А.** Моделирование зоны обслуживания погрузочного манипулятора / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем». Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, - 2012. – С. 286-290.

29.Токарев, В.И. Направления совершенствования погрузчиков сельскохозяйственного назначения. / В.И. Токарев, Д.Б. Курбанов, **И.А. Несмиянов** // Современные научные исследования и инновации. - 2012. - № 3 [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/03/10518>.

30.**Несмиянов, И.А.** Кинематические особенности погрузчика с последовательным соединением гидроцилиндров в механизме поворота стрелы / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, П.В. Турыгин // Современная техника и технологии. – № 6 - 2012. [Электронный ресурс].- Режим доступа:URL: <http://technology.snauka.ru/2012/06/1157>.

31.Герасун, В.М. Кинематическое исследование манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 2-й международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, - 2012. –с.251-258.

32.Герасун, В.М. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования / В.М. Герасун, В.И. Пындак, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. - 2012. №44. - 24 с.

33.Герасун, В.М. Исследование манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, В.А. Шурыгин // Экстремальная

робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – С.81-85.

34. **Несмиянов, И.А.** Направления развития роботизированных погрузочных манипуляторов для агропромышленного комплекса [Электронный ресурс]/ И.А. Несмиянов, В.И. Токарев // Современная техника и технологии. –2012.- №11. – Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2012/11/1382>.

35. Герасун, В.М. Синтез программных движений манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС). – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», - 2012 - С.722-725.

36. Герасун, В.М. Синтез программных законов движения звеньев манипулятора из условия минимума ускорений / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва // Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Сталинградской битве: «Интергация науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО». Том.5. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. - С.89-92.

37. **Несмиянов, И.А.** Задача позиционирования манипулятора на основе пространственного исполнительного механизма – как задача оптимального синтеза / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьёва, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Сталинградской битве: «Интергация науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО». Том.5. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. - С.138-143.

38. **Несмиянов, И.А.** О новых моделях и алгоритмах структурного синтеза пространственных манипуляторов параллельной кинематики / И.А. Несмиянов // Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Сталинградской битве: «Интергация науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО». Том.5. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. - С.257-261.

39. Герасун, В.М. Особенности сельскохозяйственных роботов и требования к ним / В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Жога // Робототехника и искусственный интеллект: материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Сиб. федер. ун-т; Железнодорожный филиал СФУ. – Красноярск: Центр информации, ЦНИ «Монография», 2013. – с.26-28.

40. Жога, В.В. О программных движениях манипулятора-трипода / В.В. Жога, В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьёва, В. В. Дяшкин-Титов // Материалы Шестой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2013). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2013. Т.2. – с.146-150.

41. Герасун, В.М. Силовой анализ манипулятора с l -координатным исполнительным механизмом / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов // Прогресс транспортных средств и систем - 2013: материалы

Международной научно-практической конференции, 24-26 сентября 2013 г./ ВолГТУ. – Волгоград, 2013 – с.316.

42. Герасун, В.М. Исследование устойчивости манипулятора с пространственным исполнительным механизмом / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 3-й Международной научно-практической конференции / под. Ред. М.М. Радкевича и А.Н. Евграфова. – СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2013. – С.680-690.

43. Жога, В.В. Система управления манипулятора трипода на подвижном основании. / В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» (ЭР-2014). // Сборник докладов Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. - С.339-403.

44. Zoga, V. THE CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR-TRIPOD THE ROTARY BASE. / Victor Zoga, **Ivan Nesmiyanov**, Victor Dyashkin-Titov, Nataliya Vorobyeva // «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» (ЭР-2014). // Сборник докладов Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. - С.404-408.

45. **Несмиянов, И.А.** Манипулятор-трипод мобильного погрузочного робота. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции. - Мичуринск-Наукоград: Издательство Мичуринского госагроуниверситета, 2014. - С.230-238.

46. **Несмиянов, И.А.** Системы прямого и позиционного управления погрузочным манипулятором с пространственным исполнительным механизмом. / И.А. Несмиянов, Е.Н. Захаров, В.И. Токарев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции. - Мичуринск-Наукоград: Издательство Мичуринского госагроуниверситета, 2014. - С.239-245.

47. **Несмиянов, И.А.** Синтез законов перемещения захватного устройства манипулятора-трипода погрузочного робота. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции. - Мичуринск-Наукоград: Издательство Мичуринского госагроуниверситета, 2014. - С.246-256.

48. **Несмиянов, И.А.** Система мониторинга эксплуатационно-технологических параметров работы погрузочного агрегата / И.А. Несмиянов, В.И. Токарев, Е.Н. Захаров // Приборостроение-2014: материалы 7-й Международной научно-технической конференции (19–21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь) / ред. колл.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 104 - 106.

49. Герасун, В.М. Силовой анализ статических режимов работы манипулятора-трипода. / В.М. Герасун, В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов / 4-я Международная научно-практическая конференция. Современное машиностроение: наука и образование. Санкт-Петербург, Сб-П ГПУ. 19-20 июня 2014 г. Изд-во Политехн.ун-та, 2014 г. С. 154-162.

50. **Несмиянов, И.А.** Расширение технологических возможностей погрузочного манипулятора с расширенной зоной действия. [Электронный ресурс] / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.П. Хавронин, В.И. Токарев // Современная техника и технологии. - 2014. - №5, - Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3484>.

51. **Несмиянов, И.А.** Геометрический синтез механизма поворота стрелы манипулятора [Электронный ресурс] / И.А. Несмиянов, Н.В. Карева // Современные научные исследования и инновации. - 2014. - № 12 – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/12/39830>.

52. **Несмиянов, И.А.** Тенденции, перспективы и особенности применения роботов в сельском хозяйстве. / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева // Международная научно-практическая конференция: Научные основы стратегии развития АПК и сельских территорий в условиях ВТО. Волгоград, Волгоградский ГАУ, 28-30 января 2014 г. ИПК «Нива», Волгоградский ГАУ. с. 16-18.

53. Жога, В.В. Система управления манипулятора-трипода. / В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Робототехника и техническая кибернетика. - №4 (5) – 2014. – С.58-62.

54. **Несмиянов, И.А.** Динамический синтез программных движений манипулятора погрузочного робота. / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов, В.В. Жога // Материалы международной научно-практической конференции "Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях". – Волгоград: Изд-во ИПК ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ «Нива», 2015. – С.11-16.

55. Жога, В.В. Система управления манипулятора-трипода с самотормозящейся передачей. / В.В. Жога, **И.А. Несмиянов**, В.Н. Скакунов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, сборник докладов. Издательство: Академии наук Республики Татарстан. Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань). - 2015. – С. 1389-1391.

56. **Несмиянов, И.А.** Синтез программных движений манипулятора - трипода на поворотном основании. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.Н. Скакунов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов. // Материалы 8-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Издательство Южного федерального университета. -2015 – С. 130-132.

57. Дяшкин-Титов, В.В. О программных движениях манипулятора-трипода на поворотном основании. / В.В. Дяшкин-Титов, **И.А. Несмиянов**, Н.С. Воробьева // Управление большими системами (УБС'2015): Материалы XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Издательство: Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, 2015 – С. 630-635.

58. Токарев, В.И. Бортовая информационная система мобильного погрузочного агрегата. / В.И. Токарев, **И.А. Несмиянов**, А.П. Евдокимов, Е.Н. Захаров // Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях. Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Великой Отечественной войне

1941-1945 гг. – Волгоград: Изд-во ИПК ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ «Нива», 2015. С. 94-98.

59. Карева, Н.В. Возможности и примеры использования микрокомпьютеров в мобильных роботах и мехатронных приводах. / Н.В. Карева, **И.А. Несмиянов**. // Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях. Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. – Волгоград: Изд-во ИПК ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ «Нива», 2015. С. 418-422.

60. **Несмиянов, И.А.** Синтез программных движений манипулятора-трипода на поворотном основании. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога. // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч.2. Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. - С.219-229.

61. **Несмиянов, И.А.** Особенности структурного исследования манипуляторов параллельно-последовательной структуры / Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. // Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. –С.715-722.

62. Захаров, Е.Н. Системы управления параллельно-последовательными погрузочными манипуляторами / Е.Н. Захаров, **И.А. Несмиянов** // Современная техника и технологии. 2016. № 9 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2016/09/10352>

63. Дяшкин-Титов, В.В. Кинематическое исследование захватного устройства манипулятора параллельно-последовательной структуры / В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева, **И.А. Несмиянов**, А.В. Дяшкин // В сборнике: Стратегические ориентиры инновационного развития АПК в современных экономических условиях материалы международной научно-практической конференции: в 5 частях. 2016. С. 203-209.

Статьи и доклады в зарубежных изданиях

64. **Несмиянов, И.А.** Совершенствование навесных гидрофицированных погрузчиков циклического действия / И.А. Несмиянов // Simpozion stiintific international "70 ani ai Universitatii Agrare de Stat din Moldova". - Chisinau, - 2003. - С. 67-68.

65. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod. V.Zoga, A.Gavrilov, V.Gerasun, **I.Nesmianov**, V.Pavlovsky, V.Skakunov, V.Bogatyrev, D. Golubev, V.Dyashkin-Titov, N.Vorobieva. Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Springer, pp. 463-471.

66. Processing of Data from the Camera of Structured Light for Algorithms of Image Analysis in Control Systems of Mobile Robots. Vladimir Skakunov, Victor Belikov, Victor Zhoga and **Ivan Nesmiyanov**. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference «Modern Engineering: Science and Education», June 2014. Springer, pp. 149-158.

67. Dynamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod. V.V. Zhoga, V.M.Gerasun, **I.A. Nesmiyanov**, N.S. Vorob'eva, and V.V. Dyashkin-Titov. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2015. Vol.44, No.2, pp 181-186.

68. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod. **Ivan Nesmiyanov** Victor Zhoga, Vladimir Skakunov, Stanislav Terekhov, Natalia Vorob'eva, Victor Dyashkin-Titov, Farea Ali Hussein Al-hadsha. Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. First Conference, CIT&DS 2015. Volgograd, Russia. Springer, pp 392-404.

69. Dynamics of tripod drive with elastic self-sustaining transmission. **I. A. Nesmiyanov**, V. V. Zhoga, N. S. Vorobieva, V. V. Dyashkin-Titov. Vibroengineering PROCEDIA Volume 8 contains papers presented at the 22-nd International Conference on VIBROENGINEERING. The main theme of this Conference is "Dynamics of Strongly Nonlinear Systems". Kaunas, Lithuania, 2016. Pp.512-516.

Патенты РФ и свидетельства о регистрации программ

70. Патент №2323154 РФ, МПК В66С23/86. Гидропривод поворотной колонны погрузчика. / **И.А. Несмиянов**, Н.С. Рыпакова, А.Ф. Рогачёв. – Оpubл. 27.04.2008.

71. Патент №2351819 РФ, МПК F16H47/04. Привод плавного включения/ **И.А. Несмиянов**, В.П. Хавронин, В.Н. Хавронина. – Оpubл. 10.04.2009.

72. Патент №2455222 РФ, МПК В66С23/86. Гидропривод погрузчика с поворотной колонной. / **И.А. Несмиянов**, В.М. Герасун, Н.С. Воробьёва, В.И. Токарев, П.В. Турыгин. – Оpubл. 10.07.2012.

73. Патент №2456227 РФ, МПК В66С23/84. Механизм для поворота стрелы манипулятора./ В.М. Герасун, П.В. Турыгин, А.Ф. Рогачёв, **И.А. Несмиянов**. – Оpubл. 20.07.2012.

74. Патент №2457172 РФ, МПК В66F9/06, G01С9/12, В66 F17/00. Система контроля положения контейнера на вилочном захвате/ **И.А. Несмиянов**, В.И. Токарев. – Оpubл. 27.07.2012.

75. Патент №2476372 РФ, МПК В66С23/36, В60Р3/00. Аварийно-спасательная машина. / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Ерёменко, П.В. Федченков, В.М. Герасун, **И.А. Несмиянов**, В.В. Дяшкин-Титов. – Оpubл. 27.02.2013.

76. Патент РФ на изобретение №2517465. Стенд для испытания гидроподъемников / **И.А. Несмиянов**, В.П. Хавронин, В.Н. Хавронина, Н.С. Воробьева - Оpubл. 27.03.2013.

77. Патент №2501648 РФ, МПК В25J13/02. Устройство ручного управления манипулятором-триподом. / **И.А. Несмиянов**, В.М. Герасун, В.В. Дяшкин-Титов, В.В. Жога, В.Н. Скакунов. – Оpubл. 20.12.2013.

78. Патент на полезную модель № 140869 РФ, МПК В66F9/06, G01С9/12, В66 F17/00. Бортовая информационная система контроля положения погрузочного агрегата. / **И.А. Несмиянов**, В.И. Токарев, Е.Н. Захаров – Оpubл. 20.05.2014 г.

79. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016615410 от 23 мая 2016 г. РФ. Кинематика манипулятора-трипода / **И.А. Несмиянов**, В.В. Жога, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов; ВолГАУ. – 2016.

Подписано в печать 2017 г. Формат 60x84 1/16

Усл.печ. л. 2,0 Тираж 50. Заказ № _____

Издательско-полиграфический комплекс ВолГАУ «Нива»

400002, Волгоград, Университетский пр-т, 26