ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Юго-Западный государственный университет»

На правах рукописи

Афонин Дмитрий Вячеславович

Методы, модели и алгоритмы управления роботизированной системой аэродромной буксировки воздушных судов

Специальность 2.3.1.
«Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки Российской Федерации
доктор технических наук, профессор
ЯЦУН Сергей Фёдорович

Курск - 2025

Оглавление

Стр.

Введение ..... ….4

Глава 1 Состояние вопроса. Задачи исследования ..... …….13

1.1 Анализ существующих беспилотных систем буксировки 14

1.2 Структурная схема беспилотных авиационных систем 15

1.3 Средства для буксировки воздушных судов 16

1.4 Беспилотные системы буксировки воздушных судов 18

1.5 Применение моторизированных колес для перемещения самолетов 22

1.6 Математические методы моделирования движения систем буксировки . 23

1.7 Анализ методов управления движением вдоль заданной траектории 24

1.8 Выводы 27

1.9 Формальная постановка задачи исследования……..28

Глава 2 Математическая модель беспилотной авиационной системы 30

2.1 Структура беспилотной авиационной системы 31

2.2 Анализ кинематических связей беспилотного тягача в сцепке с самолетом 30

2.3 Кинематическая модель подсистемы беспилотного тягача 32

2.4 Кинематическая модель воздушного судна 34

2.5 Кинематическая модель беспилотной авиационной системы 35

2.6 Модель взаимодействия подсистем тягача и воздушного судна 38

2.7 Динамическая модель подсистемы беспилотного тягача 40

2.8 Математические модели возмущающих воздействий 47

2.9 Выводы 56

Глава 3 Разработка управления движением беспилотной авиационной системой буксировки воздушных судов…….....57

3.1 Описание задач навигации беспилотной авиационной системы 58

3.2 Расчётная математическая модель беспилотной авиационной системы. . 59

3.3 Метод планирования кусочно-линейной траектории движения 61

3.4 Моделирование работы оптоэлектронной интегральной микросхемы 73

3.5 Разработка системы управления в режиме поиска передней стойки 75

3.6 Результаты моделирования и их обсуждение 79

3.6.1 Моделирование прямолинейного движения беспилотной системы при расчётном управлении 80

3.6.2 Моделирование управляемого движения беспилотной системы по прямолинейной траектории при корректирующем управлении 82

3.6.3 Моделирование движения беспилотной системы по кусочно-линейной траектории 88

3.7 Анализ показателей качества управления беспилотной системы для различных стратегий управления 89

3.8 Выводы 91

Глава 4 Экспериментальные исследоваания управляемого движения беспилотной системы в различных режимах 93

4.1 Описание прототипа беспилотной авиационной системы 94

4.2 Метод определения кинематических и силовых параметров беспилотной авиационной системы 99

4.3 Метод позиционирования беспилотного тягача 104

4.4 Результаты экспериментальных исследований управляемого движения беспилотной авиационной системы 107

4.5 Стыковка беспилотного тягача и воздушного судна 109

4.6 Выводы 113

Заключение 114

Сисок используемых сокращений 116

Список литературы 117

Приложение А. Список публикаций соискателя 134

Приложение Б. Патент на промышленный образец и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 137

Введение

Актуальность темы исследования. Постоянный рост авиаперевозок и увеличение количества типов самолетов представляют проблему для логистики современных аэропортов. Автоматизация обеспечивающих процессов логистики воздушных судов (ВС) на площадях аэродрома является важной задачей для эффективного использования пространства. В связи с этим интенсивно используются беспилотные авиационные системы (БАС), выполняющие функцию перемещения ВС по территории аэродрома. Применение БАС обеспечивает перемещение ВС без затрат ресурсов самих авиационных двигателей, что экономит дорогостоящее авиационное топливо, а также позволяет осуществлять их перемещение, когда имеется неисправность или отказ двигателя [1].

Буксировка ВС в пределах аэропорта — это сложный и неоднородный процесс, который должен учитывать инфраструктуру аэропорта, количество задействованного персонала, тип ВС и т. д. Таким образом, при буксировке ВС необходимо заранее составлять схему перемещения, в которой следует учитывать схемы движения средств наземного обслуживания ВС, а также маршруты движения других транспортируемых самолетов. Приоритетной задачей обеспечения безопасности буксировки при большой плотности движения является предотвращение столкновений воздушных судов друг с другом и инфраструктурой аэропорта, для этого необходимо задействовать дополнительный обслуживающий персонал.

При этом оценка эффективности БАС будет определяться временем, затраченным на буксировку ВС и слаженностью действий экипажа, оператора буксировщика и обслуживающего персонала. Все это требует постоянного отслеживания современных технологий в этой области и своевременного их внедрения в инфраструктуре аэропорта. Развитие современных технологий связано с использованием беспилотных тягачей (БТ) для ВС. Целесообразность использования БАС заключается в том, что возможно значительно сократить количество обслуживающего персонала, а также использовать беспилотные

комплексы, осуществляющие буксировку ВС в автономном режиме для повышения безопасности функционирования аэропорта. Однако основным недостатком таких беспилотных комплексов является отсутствие новых программируемых законов движения и, как следствие, низкая точность и быстродействие процесса буксировки. При этом актуальными становятся задачи, связанные с разработкой новых методов, моделей алгоритмов управления для БАС, требующих дальнейшего решения [2].

Научная задача заключается в разработке структуры, аналитической модели БАС, методов и алгоритмов управления движением, обеспечивающих требуемые динамические качества системы в заданной среде функционирования, решения задачи оптимального управления на основе метода линейно-квадратичной оптимизации и математическое моделирование движения системы по заданной траектории для различных стратегий управления, позволяющее на основе оценки МНК сравнить качество управления БАС, согласно разработанному интегральному показателю.

Важность и значимость решаемой задачи заключается в том, что на основе экспериментальных исследований возможно обосновать наилучший алгоритм управления движением БАС с изменяемыми параметрами регулятора в интервальном диапазоне на основе расчётной модели и корректирующих воздействий, обеспечивающий реализацию суперпозиций параметров управления на заданной траектории по аддитивному сигналу, а также определить структуру БАС, позволяющую реализовывать автономную буксировку ВС с заданной точностью и быстродействием, на основе которого в дальнейшем могут вырабатываться технические решения при проектировании и конструировании БАС.

Степень разработанности темы. В различных странах мира разрабатываются и внедряются БАС, а также различные роботизированные системы. Так, например, TowFLEXX® (Германия), TNA Aviation Technologies (США) разработали БАС для буксировки ВС с помощью буксировщика-робота Tugmaxxe, особенностью которого является его способность развернуть ВС практически на месте, а также возможность дистанционного управления. В работах А. Ф. Батанова [13],

Д.Е. Дьякова [1] и других (ВУНЦ ВВС «ВВА» г. Воронеж) предложены технические решения, обеспечивающие движение тягача без проскальзывания колес, что позволяет двигаться БАС с высокой точностью. При разработке таких систем применяются методы расчета и проектирования колесных мобильных роботов. Вопросом движения роботов занимались отечественные ученые В. В. Александров [2, 3], Д. Н. Баранов [5], В. В. Бартенев [6 11], В.М. Буданов [53, 57], С.Ф. Бурдаков [58],Д. М. Гусев [42, 43], Е.А. Девянин [44], В. В. Евграфов [46, 47], С.Л. Зенкевич [52], Ю.Г. Мартыненко [73 86], Д.Е. Охоцимский [91, 92], В.Е. Павловский[93 97], Ю.В. Чернухин [111 113], а также иностранные ученые G. Bastin [121], A.M. Bloch [123 126] , C. CanudasdeWit [30, 31], W. Dixon [32, 33], A.Isidori [37], J.M. Holland [36] и многие другие. Особое внимание уделяется синтезу законов управления, гарантирующих робастность робототехнических систем. Последние годы все более широкое распространение получают адаптивные системы управления, которые изменяют параметры или структуру регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления при внешних возмущающих воздействиях. Адаптивными системами управления занимались следующие ученые А. А. Жданов [48 50], А. И. Кобрин [61], Ю. И. Неймарк [90], А. И. Самарин [101], А.В. Тимофеев [104 108] и другие. Таким образом, существующие теоретические разработки и практический опыт позволяют сформулировать цель и задачи исследования.

Целью диссертационного исследования является повышение управляемости беспилотных авиационных систем посредством снижения погрешности движения системы буксировки за счет разработки методов, моделей, алгоритмов управления и исследования функционирования рассматриваемой системы, которые обеспечат заданную точность и быстродействие процесса буксировки воздушных судов.

Цель диссертационной работы достигается решением совокупности **задач**:

1. Разработать аналитическую модель беспилотной системы буксировки, адекватно описывающей реальные физические процессы с учетом особенностей среды функционирования.

2. Разработать метод синтеза планируемой кусочно-линейной траектории движения беспилотного тягача для реализации суперпозиций параметров траектории, определяемых из граничных условий.

3. Разработать алгоритм управления движением беспилотного тягача, обеспечивающий требуемые динамические показатели системы буксировки в условиях параметрической неопределенности с учетом внешних факторов.

4. Разработать алгоритм позиционирования беспилотного тягача для повышения управляемости системы контроля относительно контрастной линии на основе аддитивного сигнала для предложенных стратегий управления буксировкой воздушных судов.

Объектом исследования являются связи взаимодействия подсистем БАС, состоящей из беспилотного тягача, узла сопряжения и воздушного судна.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы управления БАС, обеспечивающие заданную точность и быстродействие управляемого движения при буксировке воздушных судов (ВС).

Научная новизна исследования и полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработана аналитическая модель беспилотной авиационной системы буксировки воздушных судов, отличающаяся конфигурируемой структурой функционально взаимодействующих подсистем буксируемого судна, сцепного устройства, беспилотного тягача и учетом влияния внешних нестационарных возмущающих воздействий в автономном режиме, обеспечивающая анализ свойств и состояний системы буксировки в многофакторных условиях реальной эксплуатации.

2. Разработан метод синтеза планируемой кусочно-линейной траектории движения беспилотного тягача, реализуемый суперпозициями параметров траектории системой буксировки, отличающийся учетом рассчитываемых параметров индивидуально для каждого этапа буксировки в соответствии с граничными условиями, обеспечивающий безопасное и точное движение буксировочной системы из начального положения в конечное.

3. Разработан алгоритм управления движением беспилотного тягача на основе синтеза множества параметров, определяющих работу адаптивного регулятора, отличающийся использованием интегральных параметров движения для формирования корректирующих воздействий с учетом возникающих внешних факторов и обеспечивающий минимизацию отклонения реальной траектории от заданной оператором.

4. Разработан алгоритм позиционирования беспилотного тягача, отличающийся использованием аддитивного сигнала системы визуального контроля для определения фактического отклонения системы буксировки относительно контрастной линии, обеспечивающий повышение надежности контроля управления буксировкой воздушных судов во внештатных ситуациях.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные аналитическая модель, адаптивный алгоритм управления и контроля положения системы буксировки на заданной траектории движения по аддитивному сигналу представляют собой новую научно-методологическую основу, практическая реализация которой позволяет описать закономерности функционирования БАС, которые учитывают динамику системы и внешние факторы, основываясь на принципах суперпозиции расчётных и корректирующих управляющих воздействиях с применением метода динамической оптимизации. Это является основой в математическом моделировании движения системы по заданной траектории для различных стратегий управления и позволяет провести сравнительную оценку качества управления согласно разработанному интегральному показателю по среднеквадратичной ошибке (рассогласование по координатам) и среднеквадратичному отклонению (управление по отклонению). При этом обеспечивается автономный процесс буксировки ВС с заданной точностью и быстродействием, что позволяет на практике эффективно применять разработанный подход в беспилотных авиационных системах.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы динамической оптимизации, проектирования

беспилотных систем, теория и практика систем автоматического управления, теоретической механики, упругости, методы математического моделирования динамических систем, методы оптимального планирования и проектирования, основанные на использовании технологий искусственного интеллекта и вычислительного моделирования. При создании программных продуктов использованы математические пакеты MathCAD, Matlab, SolidWorks.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель беспилотной системы буксировки описывает физические процессы и влияние внешних нестационарных возмущающих воздействий в многофакторных условиях реальной эксплуатации.

2. Метод синтеза планируемой кусочно-линейной траектории движения беспилотного тягача, реализующий суперпозиции параметров траектории, обеспечивает безопасное и точное движение системы буксировки из начального положения в конечное.

3. Алгоритм управления движением беспилотного тягача обеспечивает заданные динамические показатели системы буксировки в условиях параметрической неопределенности с учетом возникающих внешних возмущающих факторов.

4. Алгоритм позиционирования беспилотного тягача повышает управляемость системы контроля управления буксировкой воздушных судов относительно контрастной линии на основе аддитивного сигнала в различных нештатных ситуациях.

Результаты диссертационного исследования соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта,

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта,

6. Методы идентификации систем управления на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации,

14. Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов систем управления с целью улучшения их технических характеристик.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается результатами вычислительных экспериментов, их сравнением, практической апробацией разработанных моделей, алгоритмов и методов. Результаты были представлены на научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, а также согласуются с результатами других исследований в данной области.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 10 научно-технических и научно-практических конференциях с 2019 по 2024 гг., к основным из них относятся: Межвузовская научная конференция «Актуальные проблемы механики, мехатроники и робототехники» (Курск, с 2019 по 2022 гг.); Пятнадцатая и семнадцатая международные научно-технические конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Санкт-Петербург, с 2020 по 2023 гг.); Международная научно-техническая конференция RusAutoCon «Автоматизация» (Сириус, в 2022 и 2023 гг.); Третья, пятая и седьмая всероссийские научно-практические конференции «Современное состояние и перспективы развития специальных видов материально-технического обеспечения авиации» (Воронеж, в 2021, 2022 и 2024 гг.).

Исследование выполнено при поддержке Стратегического проекта «Приоритет-2030. Создание робототехнических средств для расширения функциональности человека» и нашло практическое применение в разработках, в которых автор принимал личное участие.

О реализации основных результатов проведенного исследования имеются: 1

акт внедрения в учебный процесс на кафедре аэродромно-технических средств в ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» и 1 акт внедрения в рамках летно-тактического учения авиационной эскадрильи и батальона аэродромно-технического обеспечения (аэродром Бельбек).

Публикации. По теме диссертации соискателем было опубликованы 20 научных работ. В это число входят: 7 статей в изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» [1–7], 4 публикации [8–11] в изданиях, индексируемых Scopus/WoS; 5 публикации в трудах международных и всероссийских конференций [12–16] (одна единоличная [13]); 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (три единоличных [17–19]); 1 патент РФ на промышленный образец (1 единоличный [20]). Полный список публикаций по теме исследования представлен в приложении А диссертации.

Личный вклад. В опубликованных работах личный вклад соискателя отражают содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту. Публикация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем С. Ф. Яцун и профессорско-преподавательским составом кафедры механики, мехатроники и робототехники ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет». Представленные к защите результаты получены лично автором.

Работы [7, 14] посвящены описанию конструкции мобильного робота, с двумя независимыми ведущими колесами, предназначенного для транспортировки самолетов на аэродромах. Автором определены критерии конструктивных параметров робота. при этом использованы формы уравнений Маджи для электромеханических систем с неголономными связями. В работе [13] автором рассмотрен способ буксировки ВС по аэродрому, обеспечивающий заданную точность и быстродействие этого процесса, а также предложен один из путей

повышения эффективности БАС. В работе [2] автором разработана математическая модель БАС и алгоритм планирования траектории по отклонению от заданной траектории. Результаты моделирования показали, что предложенный автором алгоритм построения траектории позволяют с заданной точностью обеспечить буксировку ВС по заданной траектории. Работа [4] посвящена решению проблемы транспортировки ВС, в которой автор использует методы перемещения ВС и в качестве задающего воздействия, определяющего положение платформы в пространстве выбран уровень горизонтального отклонения платформы от контрастной линии, который измеряется путем анализа изображений, поступающих с установленной на беспилотном тягаче СТЗ. В работах [1, 6] автором изучена динамика многозвенных механических подвижных систем, выявлены проблемы еще на этапе проектирования и оптимизирована работа уже существующих систем. Автор применил разнообразные методы моделирования: численное, имитационное и симуляционное. В работах [3, 12] автором рассмотрен подход к построению комбинированной системы управления позиционированием БАС, который основывается на суперпозиции расчетных и корректирующих управляющих воздействий. Произведено математическое моделирование движения системы по заданной траектории для различных стратегий управления, что позволило сравнить качество управления буксировкой согласно разработанному интегральному показателю. В работе [5] предложенный автором подход совместного движения беспилотного тягача и самолета, обеспечивает хорошие результаты буксировки ВС и подтверждает эффективность комбинированного управления.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и 4 приложений. Полный объем диссертации составляет 135 страниц, включая 62 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 143 наименования.

Краткое содержание работы.

В первой главе проанализированы различные типы средств, применяемых для буксировки воздушных судов. Показано, что применение беспилотной авиационной системы (БАС), позволяет значительно снизить шум и загрязнение

воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива при перемещении воздушного судна (ВС) по аэродрому на тяге собственных двигателей. Приведены классификация и структура оборудования, применяемого для этих задач. Выявлены проблемы, сдерживающие дальнейшее развитие беспилотных систем, состоящие в том, что из-за постоянного роста авиаперевозок, а также увеличения количества самолетов необходимо совершенствовать процесс логистики аэропортов за счет перехода к современным роботизированным технологиям буксировки. В последние годы появляются беспилотные тягачи, позволяющие осуществлять автономное движение ВС по заданной траектории, стыковку и расстыковку ВС в автоматическом режиме. Дальнейшее развитие таких систем основывается на исследовании связей подсистем и закономерностей функционирования БАС. Для этого необходимо разработать математические модели, которые адекватны реальным физическим процессам с учетом особенностей среды функционирования, а также создать алгоритмы управления, обеспечивающие требуемые динамические показатели качества системы в условиях возможной параметрической неопределенности. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе разработана классификация четырех основных режимов движения БАС, а также структура БАС для осуществления наземных маневров с воздушными судами (ВС) в автономном режиме, которая включает оператора, подсистемы РМБ, ВС, модуль сопряжения - сцепное устройство (СУ), управляемые электроприводы (ЭП), систему глобальной навигации (СГН), систему локальной навигации (СЛН), и систему противодействия столкновениям (СПС). Оператор на основании анализа информации о состоянии окружающей среды формирует задание для движения беспилотного тягача (БТ) и ВС в соответствии с выбранной стратегией. Также оператор обрабатывает информацию, поступающую с приборов, установленных на борту БТ и ВС, обеспечивает контроль за реальным положением объекта и имеет возможность в экстренных ситуациях изменять параметры движения БАС. Система управления

включает блок планирования, который состоит из четырех блоков: построение карты аэродрома; построение маршрута; построение карты ближней зоны; построение карты обхода препятствий и определяет параметры траектории и закон движения по ней. Блок управления (БУ) обрабатывает информацию, поступающую с датчиков, определяющих реальное положение ВС и БТ, а также силы взаимодействия СУ и формирует управляющие воздействия по соответствующему алгоритму. Электроприводы беспилотного тягача под действием управляющих напряжений осуществляют вращение ведущих колес, а электропривод тормозной системы ВС, обеспечивает эффективное торможение БАС. В структуре БАС предусмотрена возможность управления электроприводами тормоза ВС со стороны блока управления и оператора. Бортовая система управления предоставляет всю необходимую информацию о характере движения. Таким образом, БАС можно рассматривать как комплекс, решающий задачи доставки воздушного судна из начального положения в конечное в автономном режиме, приведена конструкция беспилотного тягача, которая представляет собой колёсную платформу, построенную по схеме робота с дифференциальным приводом, управление движением, которого основано на двух независимых ведущих колесах. С помощью датчиков, установленных на БТ, определяется реальное положение тягача, а оптоэлектронная микросхема (ОМ) определяет отклонение реального положения от заданного и формирует управляющие напряжения, поступающие на электроприводы БТ. На основе математических моделей, представленных в виде системы дифференциальных уравнений, спрогнозировано поведение системы и изучено управляемое движение беспилотной авиационной системы буксировки по заданной траектории с учетом взаимодействия подсистем и влияния внешних возмущающих воздействий.

В третьей главе разработан закон движения БАС на основе теории терминального управления. Синтез кусочно-линейной траектории движения осуществляется таким образом, что параметры на каждом этапе рассчитываются индивидуально в соответствии с граничными условиями, что обеспечивает буксировку ВС из начального положения в конечное с заданной точностью и за

определенное время. Планирование перемещения при переводе БАС из начального положения в конечное выполнено методом сплайн-интерполяции, представлена структурная схема предлагаемой беспоисковой адаптивной самонастраивающейся системы (БАСНС) управления движением БАС. Расчётный закон движения БАС в составе БАСНС используется для задания движения, выбранного оператором на основе априорной информации о граничных условиях. Стратегия системы управления включает контур адаптации и принцип суперпозиции управляющих напряжений. Для обеспечения заданного движения беспилотной авиационной системы решена задача оптимального управления на основе метода линейно - квадратичной оптимизации. Также разработана система управления БТ на основе решения обратной задачи динамики БАС по дифференциальным уравнениям.

В четвертой главе выполнено исследование управляемого движения БАС в различных режимах с учетом собственных координат БАС, формирования предварительной схемы буксировки ВС и движения других ВС. Основными задачами, решаемыми системой управления, являются: определение собственных координат БАС, обработка данных о маршруте, построение траекторий движения, позиционирование относительно ВС (два режима движения), обеспечение совместного движения по заданной траектории. Выделено три основных стратегий управления. Для контроля положения БАС относительно контрастной линии (КЛ), применяется ОМ. Разработан алгоритм определения величины отклонений с помощью аддитивного сигнала. Для оценки точности определения отклонения с помощью оптоэлектронной микросхемы (ОМ) выполнено сравнительное исследование отклонения реального положения БТ от заданного с помощью оптоэлектронной микросхемы (ОМ), камеры системы технического зрения (СТЗ), а также значений аддитивного сигнала. Проведено экспериментальное исследование и измерение динамических характеристик БАС, оценка и сопоставление полученных результатов с теоретическими модельными расчетами для выявления существенных свойств и закономерностей процесса управления.

Глава 1 Состояние вопроса. Задачи исследования

1.1 Анализ существующих беспилотных систем буксировки

Параллельно с развитием авиационной техники происходит развитие средств наземного обслуживания воздушных судов (ВС), которые обеспечивают полеты. При этом самой ответственной технологической операцией является буксировка ВС [9].

Рисунок 1.1−Буксировка ВС с помощью специального тягача [79]

Под буксировкой понимают процесс перемещения ВС под действием внешнего источника (специального тягача) (Рисунок 1.1). Применение специального тягача выполняющего функции перемещения ВС по территории аэродрома приводит к снижению шума и количества токсичных выбросов от их двигателей, что повышает экологическую обстановки вблизи аэропорта. Использование БАС также позволяет исключить отказ авиационных двигателей, связанный с попаданием в них частичек песка, камней и др., которые могут попасть на лопасти компрессоров при перемещении ВС по рулёжным дорожкам аэродрома. В качестве средства буксировки применяются, как водильные, так и безводильные буксировочные системы. На сегодняшний момент из-за постоянного увеличения объёма авиаперевозок, а также разнородного и растущего парка ВС актуальной становится БАС [9].

1.2 Структурная схема беспилотных авиационных систем

Буксировка ВС в пределах аэропорта это сложный и неоднородный процесс, который должен учитывать инфраструктуру аэропорта, количество задействованного персонала, тип ВС и т. д. Прежде чем выполнить буксировку ВС обслуживающему персоналу необходимо осуществить следующие операции: оценка состояния типа покрытия полотна на наличие снега, льда и т. д.; осмотр ВС на закрытие люков, панелей и др.; осмотр вспомогательного оборудования на предмет отключения от ВС (электрических кабелей, патрубков, трапов и др.), а также убедиться, что против откаточные колодки убраны; проверка состояния шин ВС и штоков амортизаторов стоек шасси [7].

При выполнении описанных операций обслуживающему персоналу необходимо располагаться вне опасных зон вокруг ВС особенно находиться ближе 3 м в радиусе от переднего колеса, водила и тягача. На Рисунке 1.2. показано: 1 – ВС; 2 – водитель; 3 – тягач; 4 – водило; 5 – руководитель бригады; 6 – техник; 7, 8, 9 – наблюдатели; 10 – траектория движения

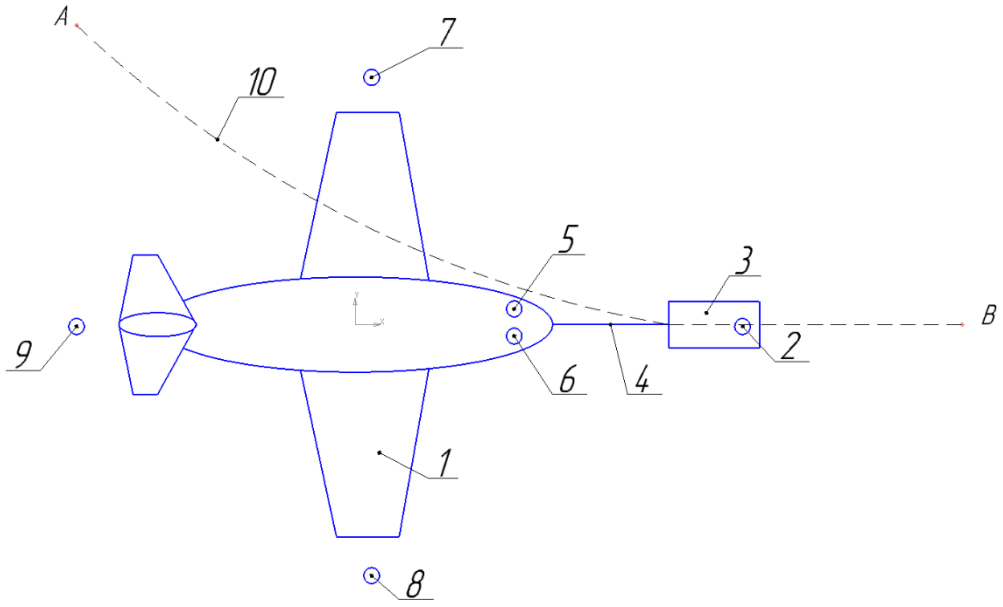

Рисунок 1.2–Схема расположения специалистов при движении ВС во время транспортировки [7]

Рисунок 1.3–Общий вид водила [79]

В настоящее время сценка ВС и буксировщика осуществляется с помощью водила, представленного на Рисунке 1.3. Водитель тягача (2) осуществляет управление буксировкой ВС, ориентируясь на контрастную линию. При выполнении поворота ВС существенно отклоняется от контрастной линии. Так как ВС является крупногабаритным объектом, то руководитель бригады (5) полностью управляет процессом, находясь в кабине ВС. Рядом с ним находится техник (6) на случай поломки или других непредвиденных обстоятельств. Помимо этого, со стороны крыльев и хвоста находятся наблюдатели (7, 8, 9), так как условия, в которых буксируется ВС, могут предполагать узкие пространства, а любое столкновение приводит к серьезным финансовым убыткам. Таким образом, для безопасной буксировки требуется 6 человек.

Структура БАС представлена на Рисунке 1.4 и включает: руководителя; ВС; тягач; водителя тягача; контролеров – наблюдателей; техника. При выполнении буксировки всеми операциями руководит руководитель, у которого имеется связь со всеми членами бригады и самое главное с водителем аэродромного тягача [9].

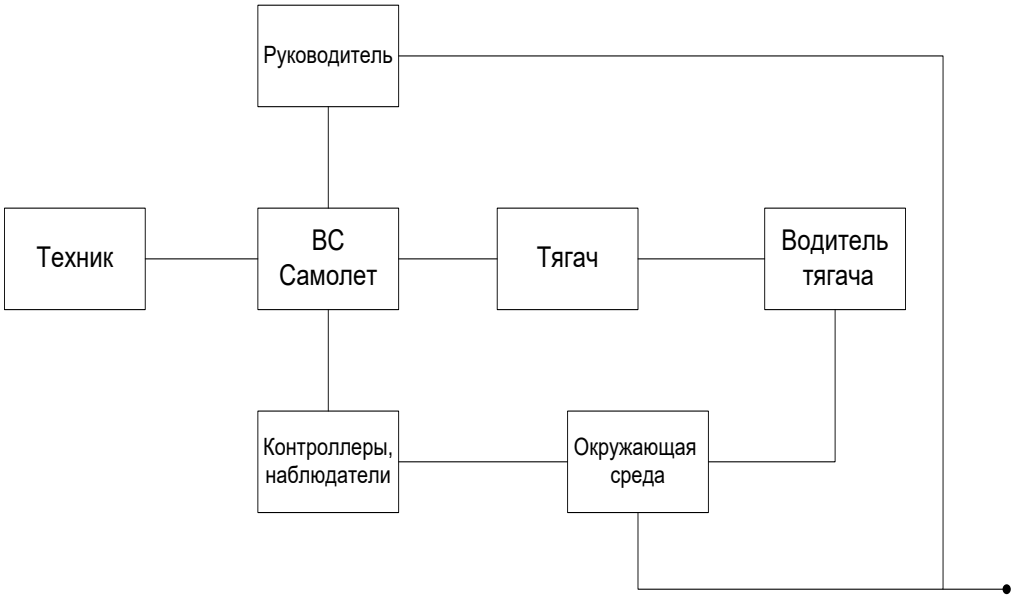

Рисунок 1.4 - Структурная схема БАС [9]

Связь осуществляется с помощью радиостанций или визуально. Также в наиболее опасных зонах имеются наблюдатели. Данные наблюдатели в случае возникновения какой-либо опасности, возникающей при буксировке ВС (например, опасности столкновения ВС с элементами инфраструктуры аэропорта) и своевременно предупреждают водителя аэродромного тягача об опасности [9].

1.3 Средства для буксировки воздушных судов

Приведенный анализ, показал, что существует пять категорий буксировщиков, которые подразделяются по максимальной буксируемой массе ВС. Первая категория – относятся буксировщики, позволяющие перемещать ВС максимальной массой до 50 тонн. Вторая категория – относятся буксировщики, позволяющие перемещать ВС до 150 тонн. Третья категория – относятся буксировщики, позволяющие перемещать ВС до 260 тонн. Четвертая категория – относятся буксировщики, позволяющие перемещать ВС до 400 тонн. Пятая категория – относятся буксировщики, позволяющие перемещать ВС массой более

400 тонн.

Аэродромный буксировщик обычно состоит из автомобильного четырех колесного базового шасси, приводимого в движение двигателем внутреннего сгорания, включающего все стандартные элементы (трансмиссию, рулевое управление, тормозную систему, кабину и др.). Следует отметить, что существуют ограничения по максимальной высоте аэродромных тягачей, так максимальная высота тягачей третьей, четвертой и пятой категории рассчитана на работу под широкофюзеляжным ВС, поэтому не должна превышать 1,6 м. При этом в передней и задней части аэродромного тягача предусмотрены буксировочные сцепки для буксировки ВС. Максимальная скорость движения аэродромного тягача в основном составляет не более 25 км/ч, а при выполнении буксировки не более 12 км/ч в целях обеспечения безопасности. Конструктивно максимальный радиус поворота аэродромного тягача не должен превышать 7,6 м [79].

Изучение зарубежных аналогов позволяет выделить основные фирмы производители буксировочного оборудования: «Douglas Equipment» (Великобритания), «Clark-Cemas» (Италия), «TECHKING» (КНР), «SCHOPF» (Германия). Все тягачи подразделяются на безводильные и с водилом. Безводильные тягачи осуществляют догрузку за счет нагружения ведущих колес передней стойкой ВС. Особенностью данных тягачей, является U-образная рама. Способ буксировки воздушных судов без водила требует от водителя высокой квалификации, так как при стыковке необходимо, чтобы тягач вплотную подъезжал к передней стойке воздушного судна. Анализ источников [1-10] позволяет сделать вывод, что систематизация характеристик беспилотных тягачей осуществлялась по 4-м основным признакам и учитывает десятки разработанных перспективных способов транспортирования, в том числе, с использованием робототехнических систем с дистанционным управлением. Основными направлениями повышения управляемости тягачей–буксировщиков ВС следует считать: заданная точность; применение новых технологических решений, обеспечивающих быстродействие процесса

буксировки; автоматизацию процессов буксировки; унификацию буксировочных систем и конструкций рабочих органов.

Анализ данных позволяет установить, что существует большой ассортимент специализированных беспилотных тягачей, применяемых в аэропортах для различных типов воздушных судов. В тоже время, системы буксировки, обеспечивающие перемещение ВС по аэродрому, не всегда обеспечивают безопасное и эффективное транспортирование ВС. Поэтому, с целью избегания данных проблем целесообразно осуществить переход к системам, обеспечивающим беспилотный режим буксировки ВС. Дальнейшее развитие таких систем связано с необходимостью повышения быстродействия и максимальной точности движения за счет разработки моделей и алгоритмов функционирования БАС [11–13].

1.4 Беспилотные системы буксировки воздушных судов

Для повышения эффективности выполнения буксировки ВС необходимо создание беспилотных систем буксировки ВС. С развитием технологий робототехники и мехатроники появилась возможность разработать новые образцы беспилотных тягачей, удовлетворяющих современным требованиям буксировки ВС и способных дистанционно управляться оператором. Один из таких буксировщиков (буксировщик− робот **Tugmaxxe)**, разработанный немецкой компанией TowFLEXX® в сотрудничестве с американской компанией **TNA Aviation Technologies** и способный перемещать ВС с массой от 9 до 60 т [14–21]. Следует отметить, что его платформа имеет возможность поворачиваться на 360°, поэтому робот способен развернуть воздушное судно практически на одном месте без необходимости поворота передней стойки шасси. Кроме дистанционного управления, буксировщиком можно управлять в полуавтоматическом режиме.

Достаточно широкое распространение получают разработки компании Mototok International GmbH. На Рисунке 1.5 представлен радиоуправляемый автономный тягач Mototok.

Рисунок 1.5–Радиоуправляемый автономный тягач Mototok[1]

В данной модели проработана система сцепки буксировщика и ВС. Управление буксировщиком Mototok позволяет двигать с открытым гидравлическим фиксатором и опущенной платформой по направлению к колесу самолета, пока переднее колесо не коснется платформы.

После захвата колеса по команде оператора, гидравлическая дверца закрывается. При необходимости подвижный стол можно отрегулировать для установки колес меньшего размера. После захвата колеса осуществляется буксировка ВС при этом может быть реализовано дистанционное управление оператором или автономное управление [22–29].

1.5 Применение моторизированных колес для перемещения воздушного судна

Американская компания **WheelTug** разработало штатное колесо передней стойки шасси ВС (Рисунок 1.6). Колесо со встроенным электромотором позволяет

[1] Mototok Aircraft Tugs: Electric, Towbarless, Remote-Controlled https://www.mototok.com / (доступ 09.04.2009)

ВС полностью самостоятельно перемещаться по территории аэропорта. Руление (управление) данным колесом осуществляется экипажем ВС с помощью дополнительных органов управления, установленных в кабине самолета.

Рисунок 1.6–Разработанное штатное колесо WheelTug [2]

Такое техническое решение приводит к некоторому увеличению веса ВС, но при этом позволяет пилотам производить перемещение ВС по аэродрому без привлечения аэродромной буксировочной бригады [30–39].

1.6 Математические методы моделирования движения систем буксировки

Разработка и создание беспилотных авиационных систем буксировки, основывается с одной стороны на структурном синтезе, а с другой на синтезе параметров, которые определяются на основе аналитических моделей и алгоритмов управления в среде функционирования БАС [40-52], исследованы вопросы управляемости и наблюдаемости мобильных роботов колесного типа.

[2] WheelTug Airports International http://www.airportsinternational.com/2010/06/wheeltug/5420 / (доступ 09.04.2009)

Описание механизма движения буксировщика с двумя управляемыми колесами посвящены работы [44, 53]. В работах [25, 48, 61, 62] описаны различные способы организации управления беспилотного тягача на основе двух ведущих колес [23, 26].

В работах [66–80] рассматривается движение цепочки твердых тел, связанных между собой шарнирно, также введено понятие «робопоезд». Такой подход позволяет моделировать БАС как систему, состоящую из двух тел, одно из которых оснащено дифференциальным приводом.

В работах [80, 32, 33], а также в работах [2, 3, 20] содержатся методы управления движением аэродромного тягача. Проведенный анализ этих работ показал, что наиболее близкой является модель робопоезда, на основе которой можно рассмотреть БАС с учетом динамики управляемого движения.

1.7 Анализ методов управления движением вдоль заданной траектории

Для эффективного функционирования беспилотных тягачей (БТ) необходима система навигации для безопасного осуществления буксировки по территории аэродрома.

Верхние уровни данной системы [71] планирует траекторию движения БТ. Программные методы проектирования движения БТ рассмотрены в источниках [49, 71, 72]. Но более эффективным является траекторное управление БТ, при котором отсутствуют недостатки, имеющиеся в программном управлении и описанные в источниках [20, 23, 28, 44, 49, 56]. При этом процесс управления движением БТ происходит в режиме реального времени и реализует принцип управления тягача по отклонению от заданной траектории. При таком подходе к решению задачи оптимизации процесса управления движением БТ учитывается величина отклонения реальной траектории от заданной, после чего происходит стабилизация положения БТ относительно заранее определенной траектории буксировки.

Также анализ следующих работ [5, 15, 38, 41, 49, 61, 71, 72, 82–90, 95–99, 100–113] в которых исследовались методы управления движением БТ на колесных базовых шасси показал, что в них приведена классификация по типу регуляторов, применяемых при реализации той или иной стратегии управления.

Как показал проведенный анализ при движении БТ [6, 28, 114–121] в реальных условиях он подвержен воздействию различных возмущающих воздействий. При этом сохранение заданной траектории движения БТ в определенном диапазоне действующих на рассматриваемую систему возмущений, определяет уровень ее робастности [61, 115–126].

1.8 Выводы

В главе проанализированы различные типы средств, применяемых для буксировки воздушных судов. Показано, что применение беспилотной авиационной системы (БАС), позволяет значительно снизить шум и загрязнение воздуха вблизи аэропорта, а также уменьшить неэффективный расход ресурса авиационных двигателей и обеспечить значительную экономию авиационного топлива при перемещении воздушного судна (ВС) по аэродрому на тяге собственных двигателей. Приведены классификация и структура оборудования, применяемого для этих задач. Выявлены проблемы, сдерживающие дальнейшее развитие беспилотных систем, состоящие в том, что из-за постоянного роста авиаперевозок, а также увеличения количества самолетов необходимо совершенствовать процесс логистики аэропортов за счет перехода к современным роботизированным технологиям буксировки. В последние годы появляются беспилотные тягачи, позволяющие осуществлять автономное движение ВС по заданной траектории, стыковку и расстыковку ВС в автоматическом режиме. Дальнейшее развитие таких систем основывается на исследовании связей подсистем и закономерностей функционирования беспилотной авиационной системы. В диссертационном исследовании предлагаются математические модели, которые адекватны реальным физическим процессам с учетом особенностей среды функционирования, а также алгоритмы управления, обеспечивающие

требуемые динамические показатели качества системы в условиях возможной параметрической неопределенности.

1.9 Формальная постановка задачи исследования

Автоматизация обеспечивающих процессов логистики воздушных судов (ВС) на площадях аэродрома является важной задачей для эффективного использования пространства. В связи с этим интенсивно используются буксировочные тягачи, выполняющие функцию перемещения ВС по территории аэродрома. Применение тягачей обеспечивает перемещение ВС без затрат ресурсов самих авиационных двигателей. Приоритетной задачей обеспечения безопасности буксировки при большой плотности движения является предотвращение столкновений воздушных судов друг с другом и инфраструктурой аэропорта, для чего необходимо задействовать дополнительный обслуживающий персонал. Все это требует постоянного отслеживания современных технологий в этой области и своевременного их внедрения в инфраструктуру аэропорта. Развитие современных технологий связано с использованием роботизированных беспилотных тягачей для буксировки ВС. Целесообразность использования беспилотных авиационных систем (БАС) заключается в том, что возможно значительно сократить количество обслуживающего персонала, а также осуществлять буксировку ВС в автономном режиме для повышения безопасности функционирования аэропорта. Однако основным недостатком таких беспилотных систем является отсутствие новых программируемых законов движения и, как следствие, низкая точность и быстродействие процесса буксировки ВС. При этом актуальными становятся задачи, связанные с разработкой новых методов, моделей и алгоритмов управления для БАС, требующих дальнейшего решения.

Научная задача заключается в разработке структуры, аналитической модели БАС, методов и алгоритмов управления движением, обеспечивающих требуемые динамические качества системы в заданной среде функционирования, решения

задачи оптимального управления на основе метода линейно-квадратичной оптимизации и математическое моделирование движения системы по заданной траектории для различных стратегий управления, позволяющее на основе оценки МНК сравнить качество управления БАС, согласно разработанному интегральному показателю. Соответственно **целью** диссертационного исследования является повышение управляемости беспилотных авиационных систем посредством снижения погрешности движения системы буксировки за счет разработки методов, моделей, алгоритмов управления и исследования функционирования рассматриваемой системы, которые обеспечат заданную точность и быстродействие процесса буксировки воздушных судов.

Диссертационное исследование посвящено исключительно технической стороне задачи беспилотной буксировки ВС. Ключевой областью применения предложенных методов и алгоритмов является использование в беспилотных авиационных системах буксировки воздушных судов. Предлагаемые в диссертационном исследовании методы и алгоритмы являются оптимальными, что является предпочтительным в тех сферах знаний, где предполагается их использовать.

Глава 2 Математическая модель беспилотной авиационной системы

2.1 Структура беспилотной авиационной системы (БАС)

Перспективным направлением повышения управляемости БАС является применение мобильных, беспилотных тягачей, использующих систему кругового видеообзора и систему наблюдения. Если ВС не оснащено системой дистанционного управления тормозами, то за процессом наблюдают всего 2 человека, находящиеся в кабине самолета – руководитель и техник. Если же ВС оснащено системой автоматического дистанционного управления тормозами, то управлять процессом буксировки может один оператор. При доработке системы управления возможна реализация режима движения БАС в беспилотном формате. Это позволяет значительно снизить число специалистов, обслуживающих БАС. Создана структура БАС (Рисунок 2.1), которая функционирует через подсистему глобальной навигации (СГН), подсистему локальной навигации (СЛН), подсистему предотвращения столкновений (СПС).

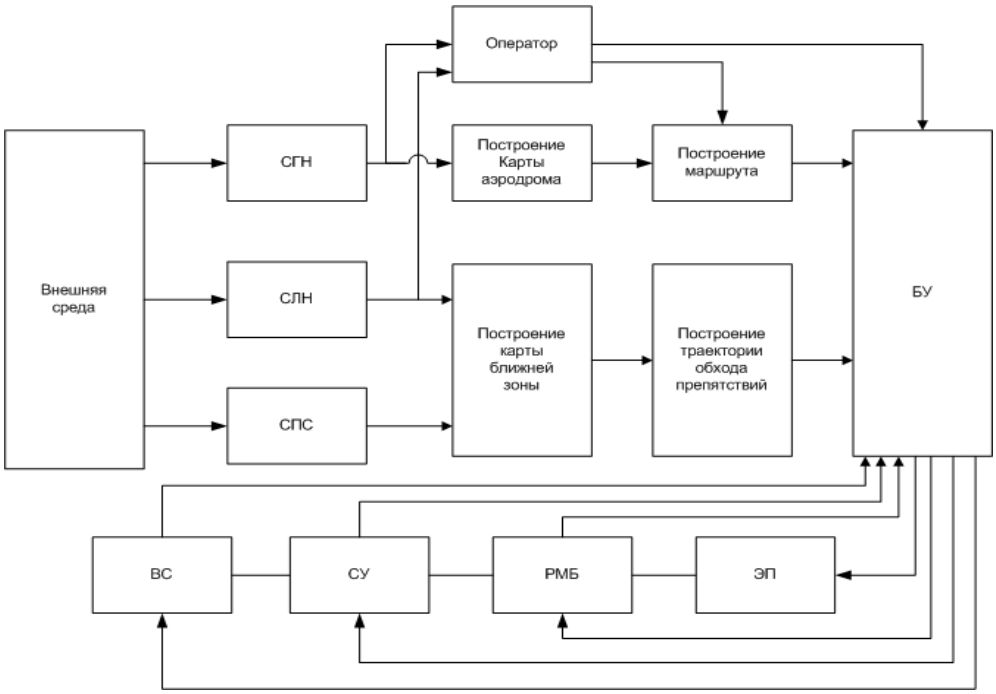

Рисунок 2.1 - Структурная схема БАС [9, 17]

В режиме реального времени оператором выполняется визуальный контроль за положением буксировщика и ВС, если при выполнении движения возникает опасная ситуация, то он имеет возможность изменить параметры движения БАС.

В систему управления БАС входят блок планирования. Блок управления (БУ) капелирует информацию, которая собирается датчиками, управляющий сигнал по определенному алгоритму. Движение БТ осуществляется подачей управляющего сигнала на электроприводы, которые начинают вращать ведущие колеса. Торможение БТ осуществляется также с помощью электроприводов, воздействующих на тормозную систему ВС, что позволяет своевременно и безопасно выполнить торможение БАС. В конструкцию БТ введена подсистема сопряжения – сцепное устройство (СУ). Описанный ранее БУ осуществляет управление СУ в результате чего происходит захват колеса передней стойки ВС. Для безопасной работы данной подсистемы используются датчики (отклонения (ОМ), одометр, дальномеры, СТЗ1, СТЗ2, GPS, лидар), которые предназначены для определения реального положение БТ при буксировке ВС [127].

В случае отклонения от заданной траектории буксировки оптоэлектронная микросхема (ОМ), входящая в состав визуальной системы контроля положения, определяет реальное положение БТ и отклонение от заданного маршрута после чего выдает управляющий сигнал, подающийся на электроприводы, которые изменяя частоту вращения ведущих колес БТ формируют требуемый маршрут движения.

Для буксировки ВС оптимальными являются беспилотные мобильные платформы (БМП), принцип функционирования которых происходит автономно путем вращения ведущих колес с помощью электроприводов и без непосредственного участия обслуживающего персонала, что позволяет повысить безопасность в процессе буксировки ВС. Таким образом, для создания перспективного и безопасного беспилотного тягача необходимо использовать беспилотную мобильную платформу, работающую автономно без непосредственного участия человека, которая позволит буксировать ВС по

установленному, безопасному маршруту с автоматическим процессом стыковки и расстыковки тягача с колесом передней стойки ВС.

На Рисунке 2.2 представлена конструкция разработанного БТ, представляющую собой мобильную (колесную) платформу имеющую: 1 корпус БТ; 2, 3 – левое, правое колесо БТ; 4 рояльное колесо; 5 матрица опорная; 6, 7 электроприводы; 8 дальномеры; 9 – одометр; 10 вычислитель бортовой; 11 GPS-блок; 12 блок захвата переднего колеса ВС; 13 СТЗ.

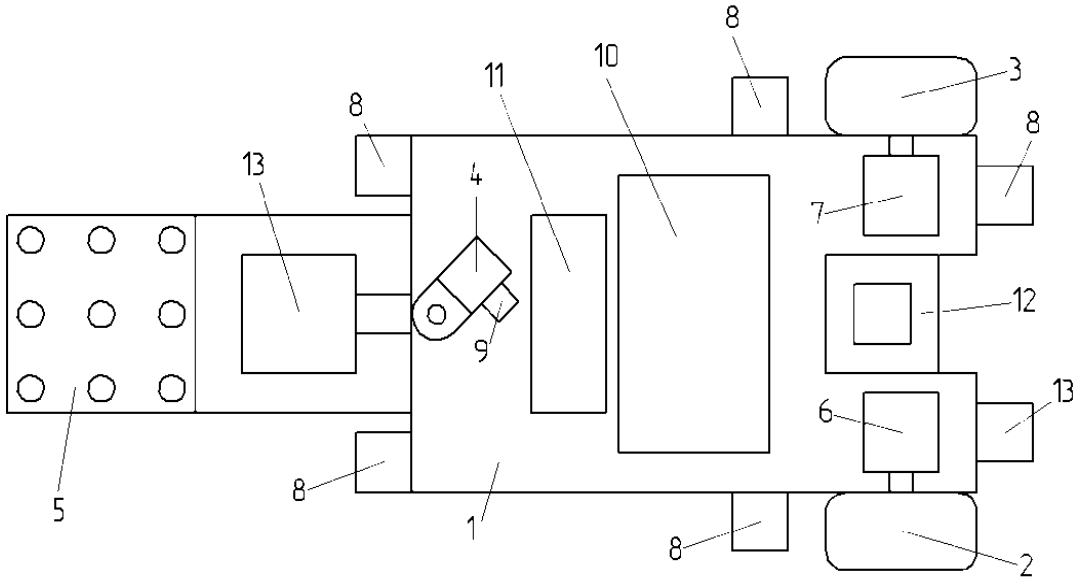

Рисунок 2.2 - Конструкция беспилотного тягача [9]

В разработанной конструкции БТ привод блока захвата переднего колеса (СУ) (12) совмещён с электроприводом ведущих колес, а СТЗ (13) и установленные по краям платформы дальномеры (8) оценивают реальное положение и непосредственно ориентацию БТ относительно переднего колеса ВС. При этом максимальную эффективность функционирования разработанной интегрированной человеко-машинной системы (ЧМС), возможно достичь за счет того, что оператор БТ, СУ и ВС образуют согласованную и эффективную работу [128].

2.2 Анализ кинематических связей системы беспилотного тягача в сцепке с самолетом

Рассматриваемая БАС, представляет собой систему, состоящую из основных подсистем: подсистема БТ, подсистемы ВС и подсистемы модуля сопряжения (СУ). Движение происходит в горизонтальной плоскости по шероховатой поверхности. Рассмотрим следующие режимы автономного движения БАС по заданным управляющим программам:

1) движение БТ к ВС по заданной траектории из начального положения;

2) движение БТ при определении положения переднего колеса ВС;

3) стыковка БТ с ВС с помощью модуля сопряжения стыковочного устройства (СУ);

4) совместное движение БТ и ВС по заданной траектории в конечное положение. Переход системы из одного положения в другое выполняется в автоматическом или ручном режимах. Схема рассматриваемой системы приведена на Рисунке 2.3. Подсистема БТ (1) (обозначенная $A_1B_1C_1$) и ВС (2), обозначенная $A_2B_2C_2$) образуют мобильную платформу, маневренность которых осуществляется за счет того, что в передней части установлены два ведущих колеса, а в задней части рояльное колесо. Такая трехколесная компоновка сопряженные с ВС через модуль сопряжения (СУ), осуществляет буксировку ВС по горизонтальной поверхности.

Для определения пространственного положение БТ введена точка $C_1 = (x_1, y_1)^T$ определяемая координаты центра масс, а также углом поворота φ_1 . Пространственное положение ВС на плоскости определяется координатами центра обозначенной точкой $C_2 = (x_2, y_2)^T$ и углом поворота φ_2 . Тогда для формирования алгоритма управления движения буксировщика необходимо определить зависимость скорости точки $C_2 = (x_2, y_2)^T$ от угловых скоростей колес БТ ω_{11}, ω_{12}

На схеме (Рисунок 2.3) приняты следующие основные геометрические и конструктивные параметры:

- L_1 – расстояние между центрами бортовых колес (колея) секции БТ;
- b_1 – расстояние между осью вращения бортовых колес и осью поворота рояльного колеса (база) секции БТ;
- m_1 – суммарная масса БТ;
- J_1 – момент инерции платформы БТ;
- L_2 – расстояние между центрами бортовых колес (колея) секции ВС;
- b_2– расстояние между осью вращения бортовых колес и осью поворота рояльного колеса (база) секции ВС;
- m_2 – суммарная масса ВС;
- J_2 – момент инерции платформы ВС.

Ведущая подсистема БТ и ведомая подсистема ВС соединены между собой сцепным устройством (СУ), включающим в себя шарнир, ось которого проходит через точку C_1 перпендикулярно плоскости движения [129].

Для создания математической модели изучаемого процесса необходимо ввести следующие ограничения для обеспечения достоверной буксировки ВС: БТ и ВС рассматриваются как система абсолютно твердых тел, связанных шарнирно, движение колес осуществляется без проскальзывания, массы вилки (2), рояльного колеса (9), шестерней редукторов считаются равными нулю, подсистема ВС допускает вращение БТ в точке C_1 на 360^0, при этом ВС и БТ движется ведомым колесом как вперед, так и назад, ω_{11}, ω_{12}– угловые скорости ведущих колес БТ;– ω_{21}, ω_{22} угловые скорости колес ВС; φ_1 - угол поворота платформы БТ, определяемый от оси Ox; φ_2 - угол поворота ВС, определяемый от оси Ox; $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ – угол поворота ВС относительно БТ; P_1– полюс РМБ; P_2 полюс ВС.

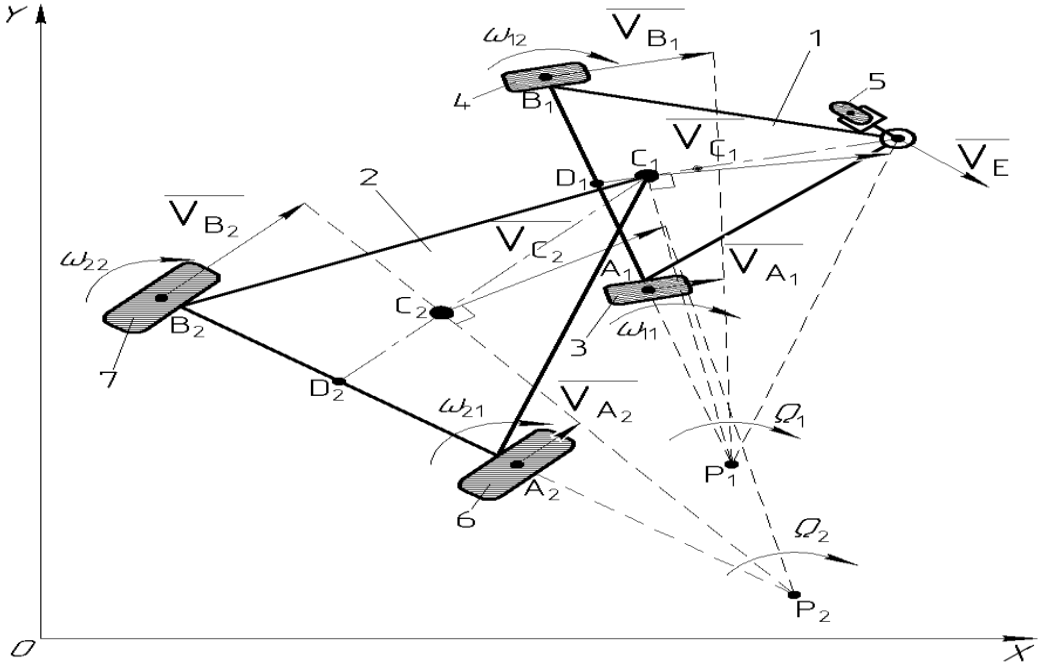

Рисунок 2.3 – Кинематическая схема совместного движения подсистем БТ и ВС [9]

2.3 Кинематическая модель подсистемы беспилотного тягача

Беспилотный тягач состоит: модульная платформа; вилка переднего колеса; правое и левое ведущие колеса; переднее колесо; правое и левое колеса ВС. Для определения угловых скоростей ведущих колес БТ введем соотношение:

$$\omega_{11} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_{11} \\ \dot{\varphi}_1 \end{pmatrix}, \omega_{12} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_{12} \\ \dot{\varphi}_1 \end{pmatrix}, \qquad (2.1)$$

где ω_{21}, ω_{22} определяются проекциями на оси системы координат $D_1x_1y_1z_1$.

Скорости точек контакта ведущих колес с опорной поверхностью будет определяться по выражению:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{P_3} = \mathbf{V}_1 + (\mathbf{\Omega}_1, D_1\overline{A}_1) + (\omega_{11}, A_1\overline{P}_3), \\ \mathbf{V}_{P_4} = \mathbf{V}_1 + (\mathbf{\Omega}_1, D_1\overline{B}_1) + (\omega_{12}, B_1\overline{P}_4), \end{cases} \qquad (2.2)$$

где $\mathbf{V}_1 = (\dot{x}_1, \dot{y}_1, 0)^T$ – скорость точки D_1; $D_1A_1 = L_1$; P_3, P_4 – точки контактов ведущих колес с опорной поверхностью; $A_1\overline{P}_3 = R_1$ $B_1\overline{P}_4 = R_1$ – радиус ведущих колес. Приравняв нулю скорости точек контакта, получим необходимые для решения выражения:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\varphi}_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\varphi_1 & 0 \\ \sin\varphi_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \end{vmatrix} \tag{2.3}$$

Связь между обобщенными скоростями и псевдоскоростями будет определяться по формуле:

$$\underset{3\times1}{\dot{\mathbf{q}}_1} = \underset{3\times2}{\mathbf{H}_1} \underset{2\times1}{\dot{\boldsymbol{\pi}}_1}, \tag{2.4}$$

где $\underset{3\times1}{\dot{\mathbf{q}}_1} = (\dot{x}_1, \dot{y}, \dot{\varphi}_1)^T$ 3-мерный вектор скоростей; $\mathbf{H}_1$ прямоугольная (3×2) матрица; $\underset{2\times1}{\dot{\boldsymbol{\pi}}_1} = (V_1, \Omega_1)^T$ 2-мерный вектор псевдоскоростей рассматриваемой системы [130].

2.4 Кинематическая модель воздушного судна

Конструктивная схема подсистемы ВС, состоит из следующих основных элементов: фюзеляж ВС; управляемое переднее колесо; два боковых колеса; переднее колесо; тормозные механизмы; дальномеры крыла; дальномеры рулей высоты [131].

Для построения математической модели подсистемы ВС примем следующие обозначения: ω_{21}, ω_{22}– угловая скорость двух колес ВС; φ_2 - угол поворота ВС, определяемый от оси Ox; $\dot{\varphi}_2 = \Omega_2$ угловая скорость ВС. Скорость точки D_2 представим в виде вектора $\mathbf{V}_2 = (\dot{x}_2, \dot{y}_2, 0)^T$. Соотношения между обобщенными и псевдоскоростями ВС вытекают из условия отсутствия проскальзывания и описываются кинематической моделью вида:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{\varphi}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\varphi_2 & 0 \\ \sin\varphi_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_2 \\ \Omega_2 \end{vmatrix} \tag{2.5}$$

2.5 Кинематическая модель беспилотной авиационной системы

Разработанную кинематическую модель БАС рассмотрим в виде схемы, представленной на Рисунке 2.3. С учетом полученных ранее моделей подсистем БТ и ВС положение подсистем БАС в неподвижной системе координат *Oxyz* представлено выражением:

$$\mathbf{q} = (x_1 y_1 \varphi_1 \; x_2 y_2 \varphi_2)^T ,$$

где x_1, y_1 координаты точки D_1 определяемую середину отрезка, соединяющего центры A_1 и B_1 ведущих колёс секции РМБ; x_2, y_2 координаты точки D_2 определяемую середину отрезка, соединяющего центры A_2 и B_2 колёс ВС.

Пространственное положение точки D_1 (рассматриваемой системы координат *Oxyz*) будет определяются радиус-вектором $\vec{r}_1$, а пространственное положение точки D_2 соответственно вектором $\vec{r}_2$, согласно выражению:

$$\vec{r}_1 = (x_1 y_1 0)^{\mathrm{T}} ; \; \vec{r}_2 = (x_2 y_2 0)^{\mathrm{T}} .$$

Вектор обобщенных скоростей системы определяется выражением:

$$\dot{\mathbf{q}} = (\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{\varphi}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{\varphi}_2)^{\mathrm{T}} , \qquad (2.7)$$

где $\dot{x}_1, \dot{y}_1$ проекции скорости V_1 точки D_1 на оси Ox_1 и Oy_1, и $\dot{\varphi}_1 = \Omega_1$, Ω_1 проекция угловой скорости платформы РМБ на ось *Oz* и аналогичные параметры для платформы самолета: $\dot{x}_2, \dot{y}_2$, $\dot{\varphi}_2 = \Omega_2$. Угловые скорости платформ БТ и ВС определяются следующим образом:

$$\boldsymbol{\Omega}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_1 \end{pmatrix}, \; \boldsymbol{\Omega}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix} .$$

Таким образом, вектор псевдоскоростей имеет вид:

$$\dot{\boldsymbol{\pi}} = (V_1 \;\; , \Omega_1 \;\; , V_2 \;\; , \Omega_2)^T , \qquad (2.8)$$

и включает четыре элемента: скорость точки D_1: $V_1 = \dot{x}_1 \cos\varphi_1 + \dot{y}_1 \sin\varphi_1$,

угловую скорость платформы БТ: $\Omega_1 = \dot{\varphi}_1$; скорость точки D_2: $V_2 = \dot{x}_2 \cos\varphi_2 + \dot{y}_2 \sin\varphi_2$, угловую скорость платформы ВС: $\Omega_2 = \dot{\varphi}_2$. Кинематическую модель БАС представим в виде:

$$\underset{6\times1}{\dot{\mathbf{q}}} = \underset{6\times4}{\mathbf{H}}\ \underset{4\times1}{\dot{\boldsymbol{\pi}}} \tag{2.9}$$

В матричной форме (2.9) перепишем в виде:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{\varphi}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\varphi_1 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos\varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \\ V_2 \\ \Omega_2 \end{vmatrix} \tag{2.10}$$

Установим связь между параметрами Ω_1 V_1 и угловыми скоростями ведущих колес $\dot{\varphi}_{11}$ $\dot{\varphi}_{12}$.

$$V_1 = \frac{(\dot{\varphi}_{11} + \dot{\varphi}_{12})R_1}{2} \tag{2.11}$$

$$\Omega_1 = \frac{(\dot{\varphi}_{11} - \dot{\varphi}_{12})R_1}{2L_1} \tag{2.12}.$$

Формулы (2.11) и (2.12) позволяют определить скорость точки C_1, связывающей БТ и ВС.

В соответствии со схемой, приведенной на Рисунке 2.4 модуль скорости центра масс БТ равен:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{C}_1} = \Omega_1 \left|\mathrm{C}_1\mathrm{P}_1\right|,$$

(P_1 - мгновенный центр скоростей) или с учетом (2.12), так как

$$\Omega_1 = \frac{\mathrm{R}_1(\omega_{11} - \omega_{12})}{A_1B_1}, \tag{2.13}$$

То:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{C}_1} = \frac{\mathrm{R}_1(\omega_{11} - \omega_{12})}{A_1B_1}\left|\mathrm{C}_1\mathrm{P}_1\right|, \tag{2.14}$$

Где:

$$|C_1P_1| = \sqrt{\left(\frac{A_1B_1(\omega_{11}+\omega_{12})}{2(\omega_{11}-\omega_{12})}\right)^2 + |C_1O_1|^2} \quad . \tag{2.15}$$

После соответствующих преобразований получим:

$$V_{C_1} = \frac{r_1}{2}\sqrt{(\omega_{11}+\omega_{12})^2 + \frac{4|C_1O_1|^2}{|A_1B_1|^2}(\omega_{11}-\omega_{12})^2}, \tag{2.16}$$

$$S_{C_1} = \frac{r_1}{2}\int\left(\sqrt{(\omega_{11}+\omega_{12})^2 + \frac{4|C_1O_1|^2}{|A_1B_1|^2}(\omega_{11}-\omega_{12})^2}\right)dt .$$

В дискретной форме получим: $V_{C_1} = \dfrac{S_{C_1}^{K} - S_{C_1}^{K-1}}{\Delta t}$.

$$S_{C_1}^{K} = S_{C_1}^{K-1} + \frac{r_1}{2}\left(\sqrt{(\omega_{11}+\omega_{12})^2 + \frac{4|C_1O_1|^2}{|A_1B_1|^2}(\omega_{11}-\omega_{12})^2}\right)\Delta t, \tag{2.17}$$

где κ номер шага по времени; $S_{C_1}^{K}$ дуговая координата в κ-й момент времени.

По формуле (2.17) по заданным управляющим угловым скоростям колес БТ можно определить расстояние, проходимое центром масс БТ по известным значениям угловых скоростей колес. Определив V_{C1} ,можно найти кинематические параметры, определяющие характер движения подсистем БТ ВС [132].

2.6 Модель взаимодействия подсистем тягача и воздушного судна

В работе принято, что БТ и ВС связаны между с помощью подсистемы сопряжения. Модуль сопряжения (СУ) состоит: из несущего корпуса с отсеком для передней стойки шасси ВС, приводных колёс, свободно вращающихся опорных колес. Для задней подвески колёсной платформы применяется независимая схема, в которую входят ступицы, соединённые с корпусом с помощью рычагов через пневмогидравлические цилиндры подвески. Перемещение переднего колеса ВС по трапу осуществляется с помощью движения БТ, положение которого изменяется с помощью приводов ведущих колес, надёжное удержание колёса в отеке обеспечивается с помощью магнитного

замка, личинка которого фиксируется между петлями захватного устройства. В носовом отсеке аппарата расположены также и электронные элементы системы управления: оптоэлектронная микросхема, фиксирующая контрастную линию; ультразвуковые дальномеры, предупреждающие о наличии препятствия; камера заднего вида для визуального позиционирования; модуль GPS, инерциальный измерительный модуль и бортовой вычислитель расположены в отсеке БТ. Далее в предлагаемой математической модели изучаемого процесса рассмотрим следующее. Сила $\overline{P}_{21}$, определяет взаимодействии БТ и ВС, которая действует со стороны ВС на БТ. Сила $\overline{P}_{12}$ соответственно обозначена со стороны БТ на ВС. При этом модули сил будут равны $P_{21} = P_{12}$.

Таким образом, при взаимодействии подсистем БТ и ВС будет возникать сила, определяемая по выражению:

$$P_{21} = C\sqrt{(x_{C1} - x_{C1}^*)^2 + (y_{C1} - y_{C1}^*)^2} \quad , \tag{2.18}$$

Где x_{C1}, yC_1 координаты точки C_1; x_{C1}, yC_1 координаты точки C_1.

После преобразований получим выражение:

$$tg\alpha = \frac{y_{C1} - y_{C1}^*}{x_{C1} - x_{C1}^*} \, . \tag{2.19}$$

Таким образом получена модель взаимодействия подсистем БТ и ВС. При этом значения C будут учитывать физико-механические свойства переднего колеса самолета [133].

2.7 Динамическая модель подсистемы беспилотного тягача

Если рассматривать подсистему БТ как электромеханическую систему, то беспилотный тягач примет четыре степени свободы, а вектор псевдоскоростей будет определяться выражением:

$$X_1 = \left(V_1 \; \Omega_1 \; i_1 \; i_2\right)^{\mathrm{T}} \quad , \tag{2.20}$$

где V_1 Ω_1 соответственно скорость и угловая скорость платформы, токи $i_1 = \dot{e}_1$, $i_2 = \dot{e}_2$ во внешних цепях электроприводов. Уравнения Лагранжа в матричной форме примет вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}}\right)^T = \mathbf{Q} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda}, \qquad (2.21)$$

где $\dot{\mathbf{q}}_{\text{S}}$ мерный вектор; T - кинетическая энергия системы; $\mathbf{Q}_{\text{s}}$ мерный вектор обобщенных сил; $\boldsymbol{\lambda}_{\text{n}}$ мерный вектор неопределенных множителей; $\mathbf{B}$ прямоугольная ($n \times s$)-матрица функций обобщенных координат определяемая $\underset{n\times s}{\mathbf{B}}\ \underset{s\times 1}{\dot{\mathbf{q}}} = \underset{n\times 1}{0}$.

Затем необходимо исключить неопределенные множителей из уравнения (2.21). Данный алгоритм действий подробно изложен в источниках [34, 37, 39, 49, 51, 59, 60, 64, 83].

В соответствии с работой [49] представим уравнение Маджи в виде выражения:

$$\mathbf{H}^{\text{T}}\left(\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right)^{\text{Ò}} - \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}}\right)^{\text{T}} - \mathbf{Q}\right) = 0. \qquad (2.22)$$

После исключения неопределенных множителей уравнения получим выражение:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{x}}}\right)^T - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}}\right)^T + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \dot{\mathbf{x}}}\right)^T = \mathbf{X} + \mathbf{C}^T \delta, \qquad (2.23)$$

где $L = T - \Pi + W_m - W_e$ лагранжиан системы; T , Π кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно; W_m, W_e энергии магнитного и электрического полей соответственно; $\Psi = \Psi_m + \Psi_e$ диссипативная функция системы; Ψ_m , Ψ_e механическая и электрическая диссипативные функции системы. При этом выражение (2.21), примет вид:

$$\mathbf{Z}^{\text{T}}\left(\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{x}}}\right)^{\text{T}} - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{x}}\right)^{\text{T}} + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \dot{\mathbf{x}}}\right)^{\text{T}} - \mathbf{X}\right) = 0 \ , \qquad 2.24)$$

где $\mathbf{Z}$ — прямоугольная ($d \times p$)-матрица ($p = d - l$). При этом обобщенные и псевдоскорости связаны формулой:

$$\underset{d\times 1}{\dot{\mathbf{x}}} = \underset{d\times p}{\mathbf{Z}}\ \underset{p\times 1}{\dot{\boldsymbol{\rho}}}, \tag{2.25}$$

где $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ мерный вектор псевдоскоростей системы. Рассмотренные математические модели описания движения БАС позволили установить основные подходы к решению поставленных задач [134]. Затем в предлагаемой математической модели будет рассмотрена схема БТ с оптоэлектронной микросхемой, представленной на Рисунке 2.4. Для этих целей представим рассматриваемою систему в виде неподвижной системы координат $Oxyz$, плоскость которой Oxy проходит через плоскость, на которой располагаются ведущие колеса БТ и подвижной системы $D_1x_1y_1z_1$ с началом в точке D_1, расположенной на мобильном шасси. Для определения положения БТ относительно контрастной линии (КЛ) предлагается использовать оптоэлектронную интегральную микросхему (ОМ) размером $n \times m$, где n число строк ОМ, а m число столбцов ОМ. В дальнейшем при проведении исследований применялась микросхема размером 3×3. ОМ представляет собой сенсорное поле, позволяющее с заданной точностью оценивать положение БТ на контрастной линии.

Введем следующие ограничения: беспилотный тягач рассматривается как система абсолютно твердых тел; движение осуществляется без проскальзывания; массы вилки (2), рояльного колеса (9), шестерней редукторов считаются равными нулю; в точке C_1 устанавливается переднее колесо ВС; БТ движется ведомым колесом как вперед, так и назад. Потенциальная и электрическая энергии будут равны нулю, в связи с этим получим выражение:

$$L = T + W_m. \tag{2.26}$$

Далее необходимо определить кинетическую энергию системы по выражению:

$$2T = (m_1 + 2m_k)(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - 2m_1 a(\dot{x}\sin\varphi_1 - \dot{y}\cos\varphi_1)\dot{\varphi}_1 + \\ + (J_1 + m_1 a^2 + 2m_k a^2)\dot{\varphi}_1^{\,2} + J_y(\dot{\varphi}_{11}^2 + \dot{\varphi}_{12}^2), \quad (2.27)$$

где m_1 суммарная масса платформы; m_k - суммарная масса ведущего колеса и ротора электродвигателя; J_1 момент инерции БТ, проходящей через его центр масс C_1; $J_y = J_{ky} + n^2 J_{ry}$ «приведенный» момент инерции колеса; J_{ky} момент инерции колеса относительно горизонтальной оси; J_{ry} момент инерции ротора электропривода; n передаточное число редуктора; $a = D_1C_1$ расстояние от точки D_1 до центра масс C_1.

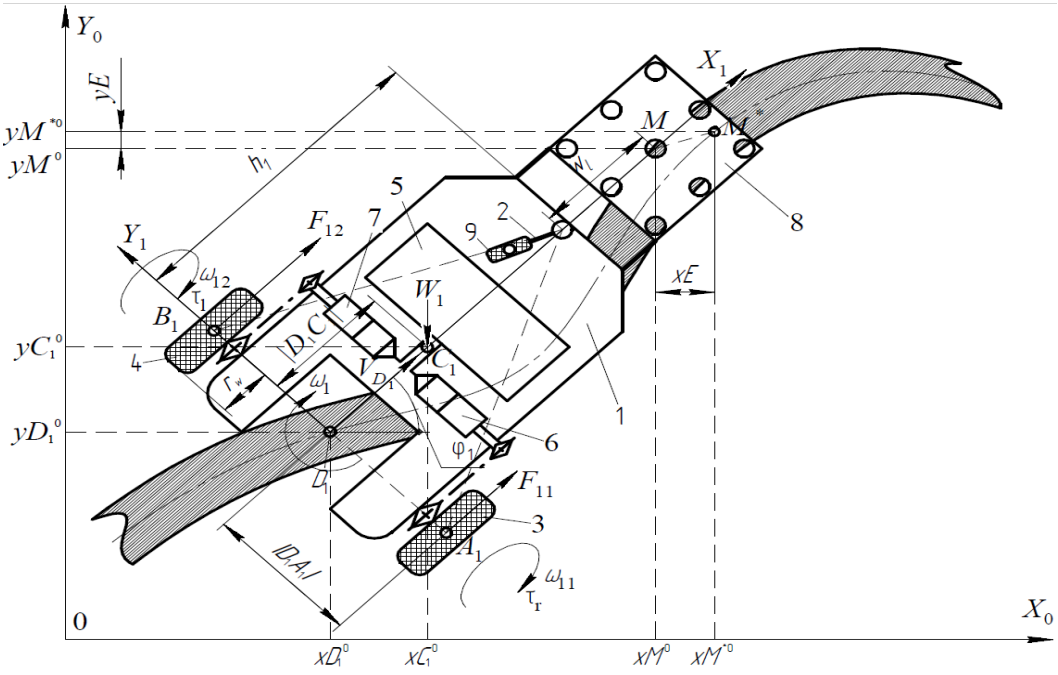

Рисунок 2.4 – Кинематическая схема беспилотного тягача [9].

Магнитную энергию получим по выражению [54]:

$$2W_m = L_i(\dot{e}_1^2 + \dot{e}_2^2) + 2cn(\varphi_{11}\dot{e}_1 + \varphi_{12}\dot{e}_2), \quad (2.28)$$

где L_i обобщенная индуктивность цепи электропривода; c коэффициент электромеханического взаимодействия. Коэффициент электромеханического взаимодействия определяется по формуле согласно [49]:

$$c = \frac{(M_1 - M_2)U_i}{\dot{\gamma}_i M_1}, \quad (2.29)$$

где M_1, M_2 соответственно пусковой и номинальный моменты электропривода; $\dot{\gamma}_í, U_í$ угловая скорость и номинальное напряжение электропривода. После всех преобразований получим математическую модель БТ, которая описывается выражением:

$$\begin{cases} m\dot{V}_1 = \dfrac{nc}{r}(i_1 + i_2) - \mu_1 V + \dfrac{1}{r}(M_{fr_1} + M_{fr_2}) + m_1 a\Omega_1^2 + W, \\ J\dot{\Omega}_1 = \dfrac{ncl}{r}(i_1 - i_2) - \mu_2\Omega_1 + \dfrac{l}{r}(M_{fr_1} - M_{fr_2}) - m_1 a V_1\Omega_1 + M_C(W) \\ L_1\dfrac{di_1}{dt} + Ri_1 + \dfrac{nc}{r}(V_1 + l\Omega_1) = U_1, \\ L_2\dfrac{di_2}{dt} + Ri_2 + \dfrac{nc}{r}(V_1 - l\Omega_1) = U_2, \end{cases} \qquad (2.30)$$

где $m = m_1 + 2m_k + 2\dfrac{J_y}{r^2},\ J = J_1 + (m_1 + 2m_k)a^2 + 2\dfrac{J_y}{r^2}l^2,$

U_1, U_2 – управляющие напряжения на обмотках электропривода. Для оценки и учета всех воздействий целесообразно ввести функцию:

$$\overline{W} = \overline{P}_{21} + \overline{W}_B.$$

Преобразуем (2.30) к виду:

$$\begin{vmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{\Omega}_1 \\ \dfrac{di_1}{dt} \\ \dfrac{di_2}{dt} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\mu_1 & m_1 a\Omega_1 & \dfrac{nc}{r} & \dfrac{nc}{r} \\ \dfrac{1}{J}m_1 a\Omega_1 & -\dfrac{1}{J}\mu_2 & \dfrac{1}{J}\dfrac{ncl}{r} & -\dfrac{1}{J}\dfrac{ncl}{r} \\ -\dfrac{nc}{rL_1} & \dfrac{ncl}{rL_1} & -\dfrac{1}{L_1}R & 0 \\ -\dfrac{nc}{rL_2} & \dfrac{ncl}{rL_2} & 0 & -\dfrac{1}{L_2}R \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ \Omega_1 \\ i_1 \\ i_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dfrac{M_{fr_1} + M_{fr_2}}{rm} \\ \dfrac{M_{fr_1} - M_{fr_2}}{rJ} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \overline{W} \\ M_{C_1}(\overline{W}) \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Введем следующие обозначения:

$$X_1 = (V_1, \Omega_1, i_1, i_2)^T,$$

$$\Phi_1(X_1)=\begin{vmatrix} -\mu_1 & m_1 a\Omega_1 & \frac{nc}{r} & \frac{nc}{r} \\ \frac{1}{J}m_1 a\Omega_1 & -\frac{1}{J}\mu_2 & \frac{1}{J}\frac{ncl}{r} & -\frac{1}{J}\frac{ncl}{r} \\ -\frac{nc}{rL_1} & \frac{ncl}{rL_1} & -\frac{1}{L_1}R & 0 \\ -\frac{nc}{rL_2} & \frac{ncl}{rL_2} & 0 & -\frac{1}{L_2}R \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{M_{fr_1}+M_{fr_2}}{rm} \\ \frac{M_{fr_1}-M_{fr_2}}{rJ} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Вектор управляющих воздействий:

$$B_1\overline{U}_1=\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \end{vmatrix}.$$

Вектор внешний возмущений:

$$\overline{W}_1=\begin{vmatrix} W \\ M_{C_1}(W) \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Тогда систему уравнений (2.30) представим в виде:

$$\dot{X}_1=\Phi_1(X_1)+B_1\overline{U}_1+\overline{W}_1 \tag{2.31}$$

Аналогичным образом построим математическую модель подсистемы ВС в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_2\dot{V}_2=\frac{nc}{R_2}(i_3+i_4)-\mu_2 V+\frac{1}{R_2}(M_{fr_3}+M_{fr_4})+m_2 a_2\Omega_2^2+W_2, \\ J_2\dot{\Omega}_2=\frac{ncl}{R_2}(i_3-i_4)-\mu_2\Omega_1+\frac{l}{R_2}(M_{fr_3}-M_{fr_4})-m_2 a_2 V_2\Omega_2+M_2(W) \\ L_3\frac{di_1}{dt}+Ri_3+\frac{nc}{r}(V_2+l\Omega_2)=U_3, \\ L_4\frac{di_2}{dt}+Ri_4+\frac{nc}{r}(V_2-l\Omega_2)=U_4, \end{cases}$$

Или

$$\dot{X}_2=\Phi_2(X_2)+B_2\overline{U}_2+\overline{W}_2 \tag{2.32}$$

$$X_2=(\overline{V}_2,\Omega_2,i_3,i_4)^T.$$

Здесь обозначено: m_2 масса ВС; $\frac{nc}{R_2}$ параметры электроприводов ВС системы ВС; μ_2 приведенный коэффициент вязкого сопротивления; $M_{fr_3}+M_{fr_4}$ моменты трения на колесах; a_2 геометрический параметр ВС; $\overline{V_2}$ - скорость ВС; - Ω_2 угловая скорость вращения ВС; $\overline{W_2}$ вектор внешних возмущений с учетом силы воздействия на ВС со стороны БАС; L_4, R_4, c_Ω индуктивность, активное сопротивление коэффициент индукции обмоток электроприводов; $\overline{U}_2 = (U_3 U_4)^T$ управляющие напряжения, поступающие на тормозную систему ВС; i_3, i_4 токи, в электроприводах тормозной системы ВС. Значения M_{fr_K} ($K = 1,2,3,4$) в соответствии с источником [4] определяются по выражению:

$$M_{frK} = \begin{cases} -\delta N_K sign(\dot{\varphi}_K),\ \dot{\varphi}_K \neq 0, \\ -nci_K,\ \dot{\varphi}_K = 0, |nci_K| \leq \delta N_K, \\ -\delta N_K sign(i_K),\ \dot{\varphi}_K = 0, |nci_k| > \delta N_K, \end{cases} \quad (2.33)$$

где δ коэффициент трения качения; N_K сила нормальной реакции горизонтальной опорной плоскости, действующей на *K*-ое ведущее колесо.

Математические модели подсистем БТ и ВС в виде систем уравнений (2.30) и (2.32) определяют движение БАС по желаемой траектории. Связь между подсистемами определена уравнениями (2.18), (2.19) [130–133].

2.8 Математические модели возмущающих воздействий

Определим возмущающие воздействия, моделирующие функцией:

$$\overline{W} = \overline{W}(t),$$

тогда получим:

$$\overline{W} = (\overline{W}_e, W_\varphi)^T, \quad \overline{W}_e = (W_x, W_z)^T, \quad (2.34)$$

где $\overline{W} = (W_x, W_z, W_\varphi)^T$ вектор-функция. В качестве модели случайного процесса рассмотрим сигнал вида:

$$W = W_0 \sin(\omega_0 t + \gamma). \quad (2.35)$$

В общем случае сигнал внешнего возмущения (2.35) имеет случайную амплитуду $W_0 = \breve{W}_0 + \delta W_0$, случайную частоту $\omega_0 = \breve{\omega}_0 + \delta\omega_0$ и случайный фазовый угол $\gamma = \breve{\gamma} + \delta\gamma$. $\breve{W}_0$, $\breve{\omega}_0$, $\breve{\gamma}$ математическое ожидание; δW_0, $\delta\omega_0$, $\delta\gamma$ дисперсия. Функция $W_0(t)$ определена на интервале $W_{01} < W_0 < W_{02}$. W_{01} минимальное значение W_0; W_{02} максимальное значение W_0.

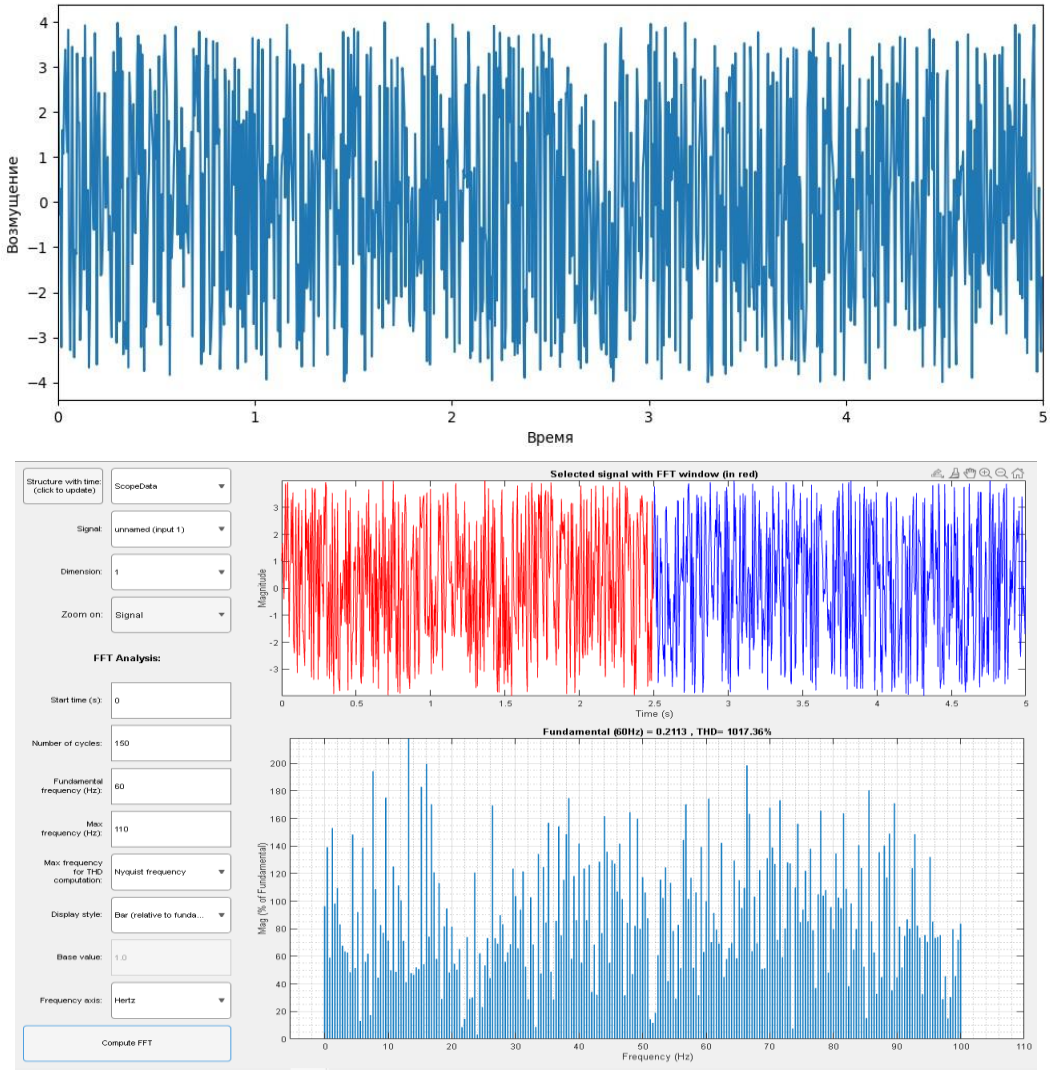

Рисунок 2.5 График случайных возмущающих воздействий и спектр возмущения, полученный с применением встроенной функции rand 1000 точек [9].

Моделирование сигнала осуществляется:

1. Генерация случайной функции с нормальным распределением при помощи, встроенной в Matlab функции rand (Рисунок 2.5); 1000 точек.

2. Генерация случайной функции с нормальным распределением 5000 точек (Рисунок 2.8):

Рассмотрим влияние внешних возмущений случайного типа на характер движения БТ вдоль оси по оси OX. На Рисунке 2.6 приведена расчётная траектория движения.

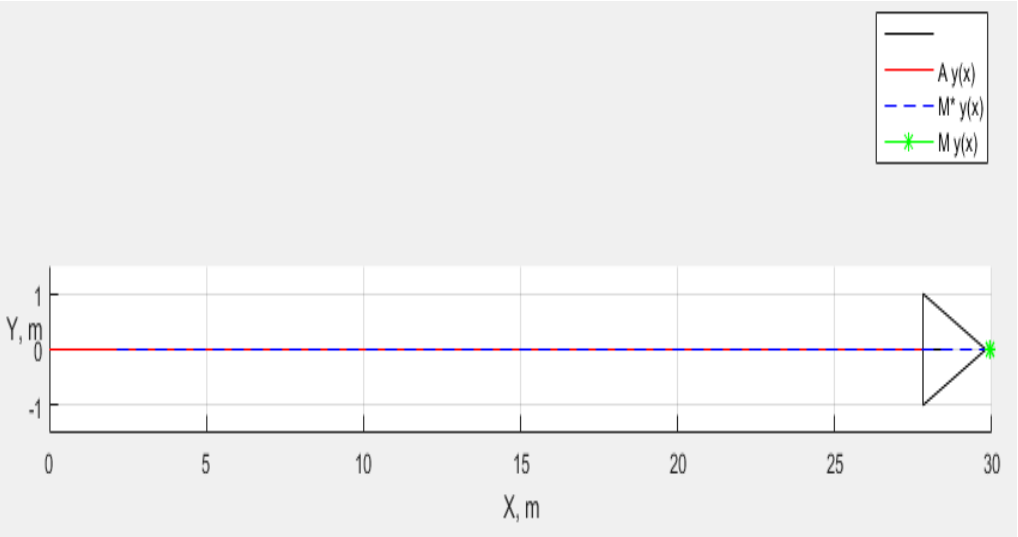

Рисунок 2.6 Расчётная траектория движения беспилотного тягача

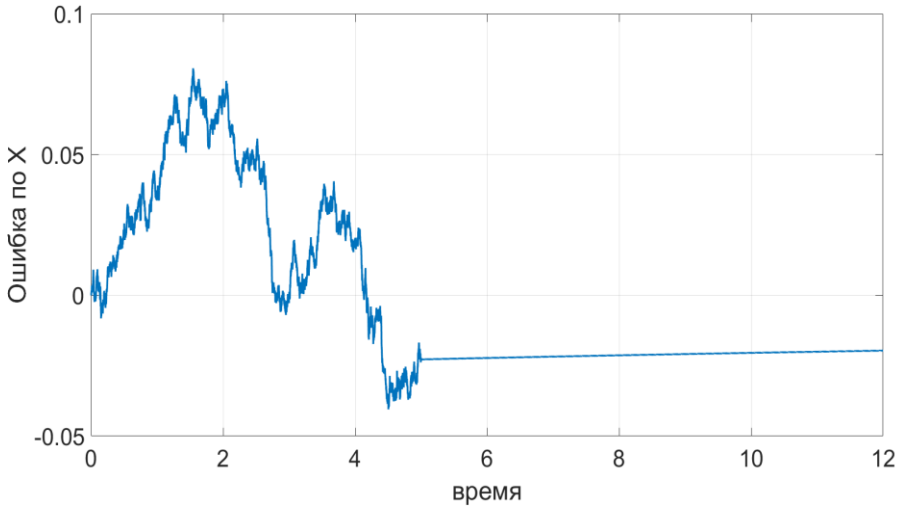

Рисунок 2.7 Ошибка управления по оси X, при воздействии на объект внешним возмущением для функции rand

На Рисунке 2.8 представлен график случайных возмущающих воздействий и спектр возмущения, полученный с применением встроенной функции randn 5000 точек.

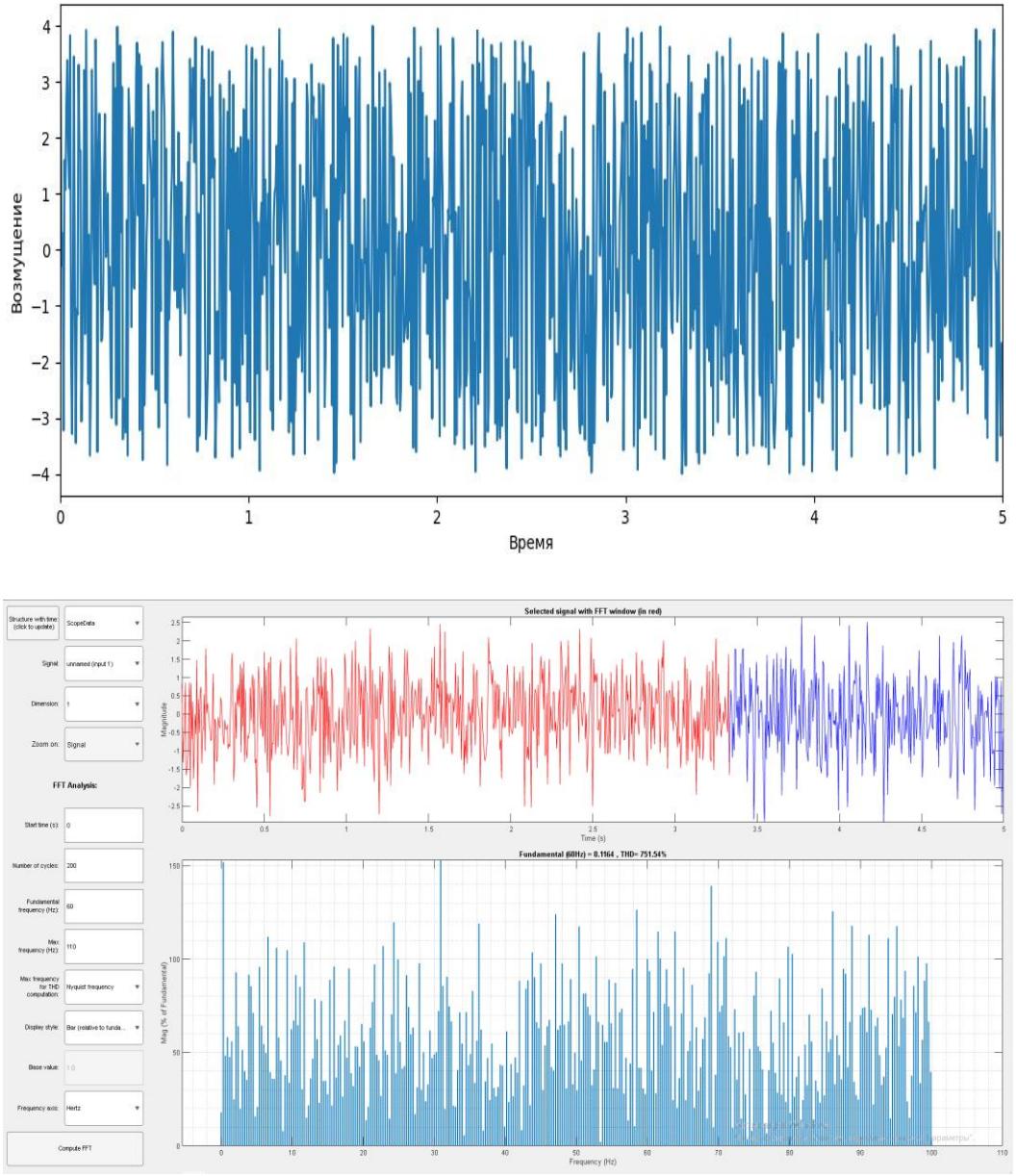

Рисунок 2.8 График случайных возмущающих воздействий и спектр возмущения

Полученные результаты показывают, что система управления БТ при действии заданных внешних возмущений обеспечивает устойчивое положение объекта на траектории движения тягача.

.

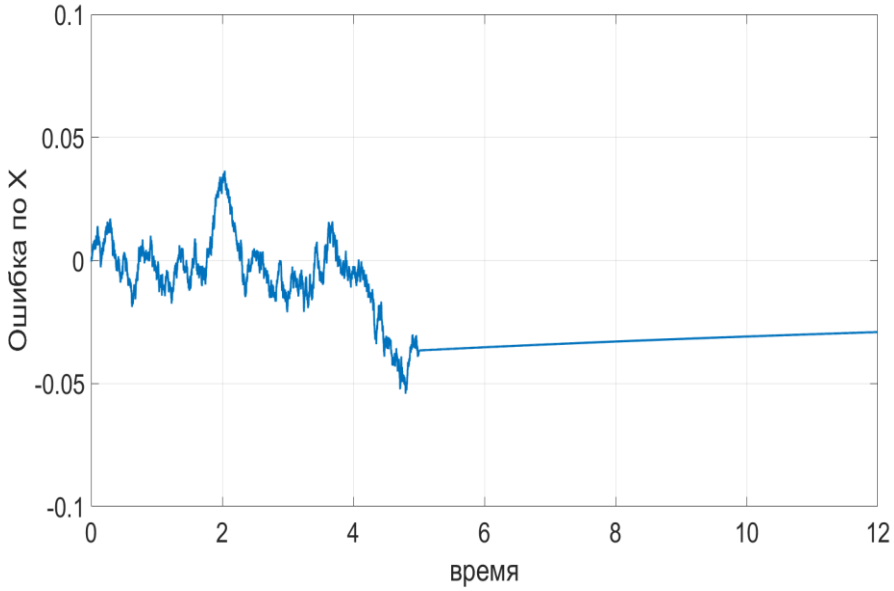

Рисунок 2.8.а – Осциллограмма ошибок управления по оси X

Также внешнее возмущение может моделироваться импульсом. Основными параметрами которого, являются амплитуда и продолжительность действия. Рассмотрим пример применения разработанного алгоритма управления, для движения БАС из начальной точки О, с начальной скоростью и ускорением. Расчеты выполнены в среде MATLAB. График, иллюстрирующий возмущающее воздействие показан на Рисунке 2.9. Возмущающий импульс имеет вид:

$$\overline{W} = \begin{vmatrix} W_x \\ W_y \end{vmatrix}, \tag{2.36}$$

Возмущающий импульс действующей вдоль оси OX:

$$\overline{W} = \begin{vmatrix} W_x \\ 0 \end{vmatrix},$$

или вдоль оси OY:

$$\overline{W} = \begin{vmatrix} 0 \\ W_y \end{vmatrix}.$$

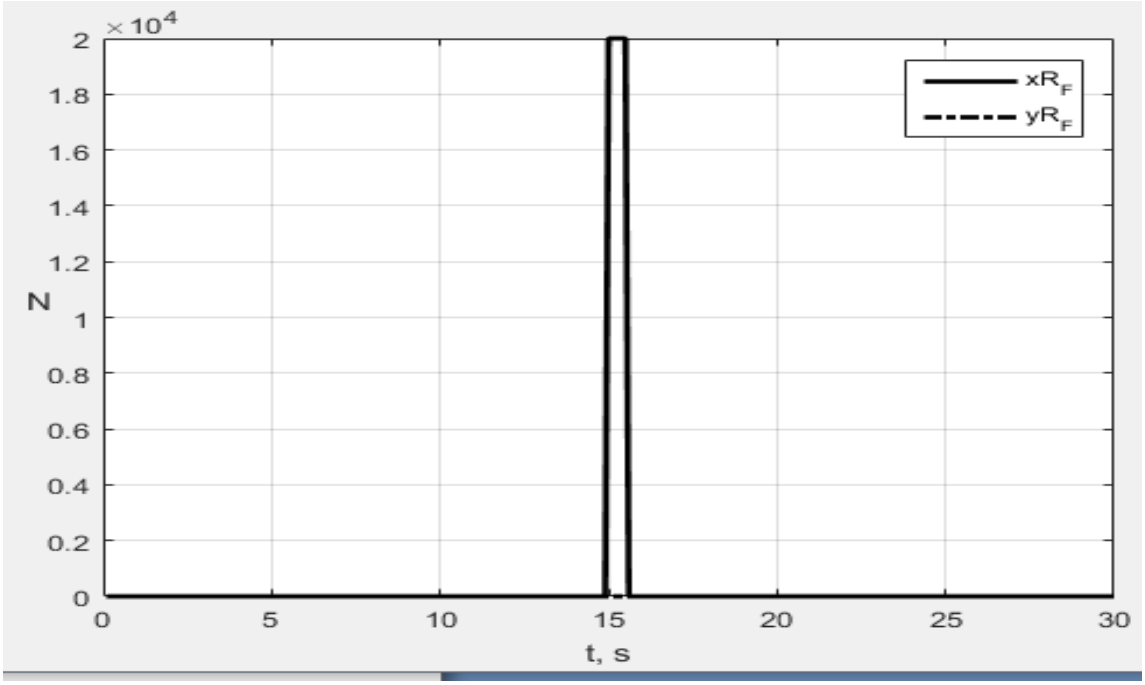

Рисунок 2.9 Диаграмма внешнего импульсного воздействия

Результаты моделирования движения БТ по расчётной траектории, приведенной на Рисунке 2.6, представлены на Рисунках 2.10. На Рисунке 2.11 приведены графики иллюстрирующие расчётные законы изменения координат OX и OY и соответствующих скоростей и ускорений. На Рисунке 2.12 показаны расчётный закон движения по осям OX и OY представлен выражением:

$$e_x = xM^* - xM, e_y = yM^* - yM$$

При этом действие возмущающего импульса начинается при $t = 15c$ а, время завершения действия импульса 15,5 с.

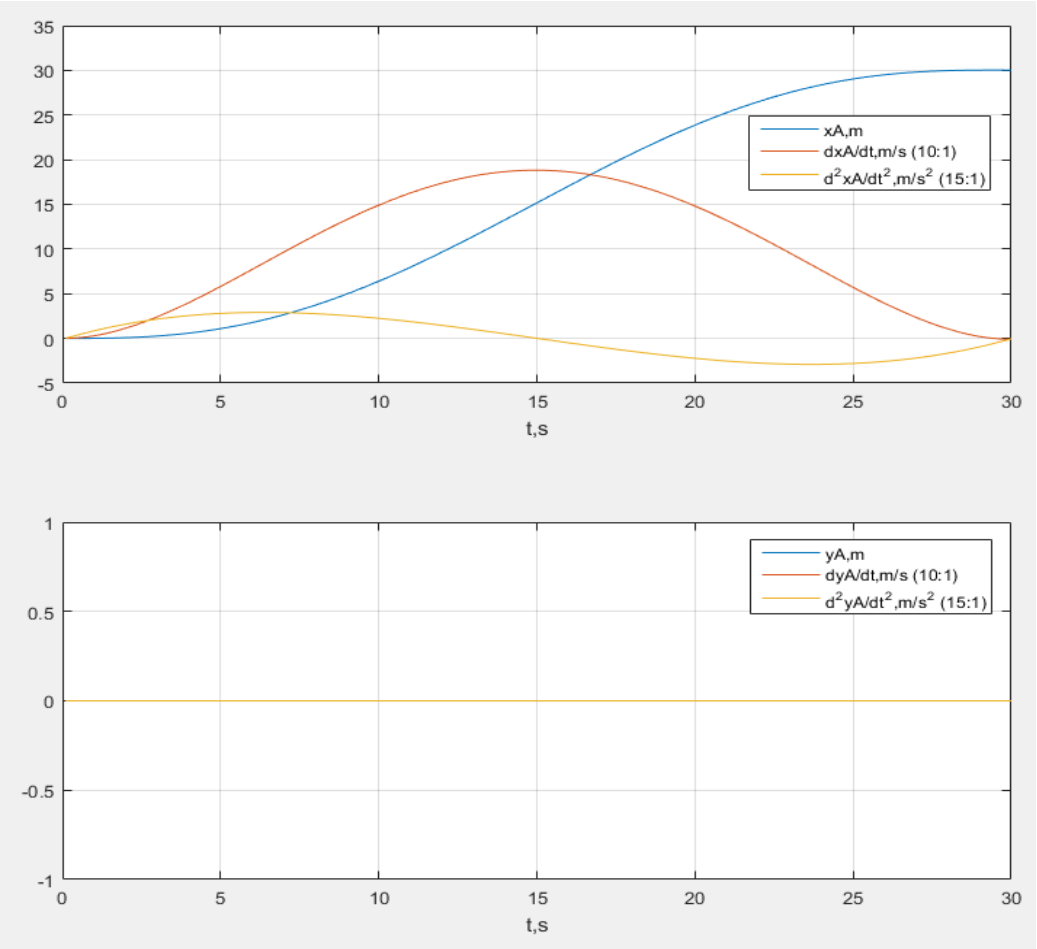

Рисунок 2.10 Расчётный закон изменения координаты, скорости и ускорения БТ

Максимальные значения ошибок e_x, e_y, приведенных на Рисунках 2.13 и 2.14 составляют до 4,1 м по OX и по OY до 2 м, а при использовании комбинированного управления возможно уменьшить максимальные отклонения e_x, e_y по оси OX до 2,4 м и OY до 2 м. Полученный результат позволяет сделать вывод, что произошло значительное повышение точности движения БАС по заданной траектории.

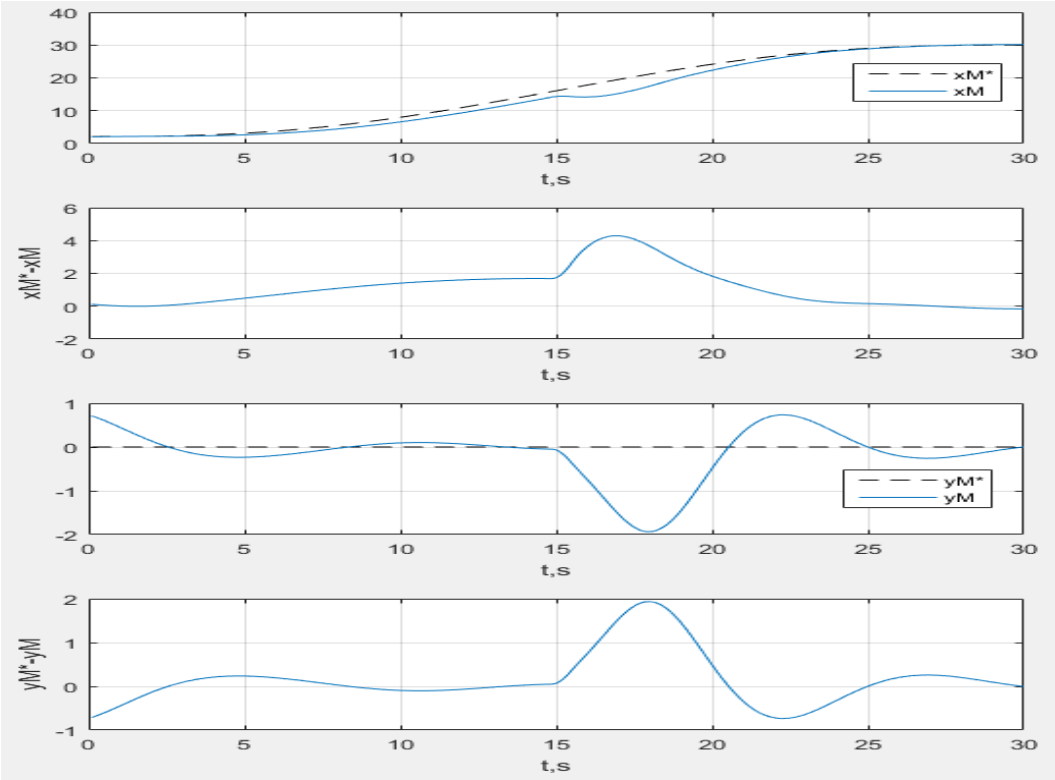

Рисунок 2.11 Адаптивный закон движения и отклонение реальных координат при корректирующем управлении

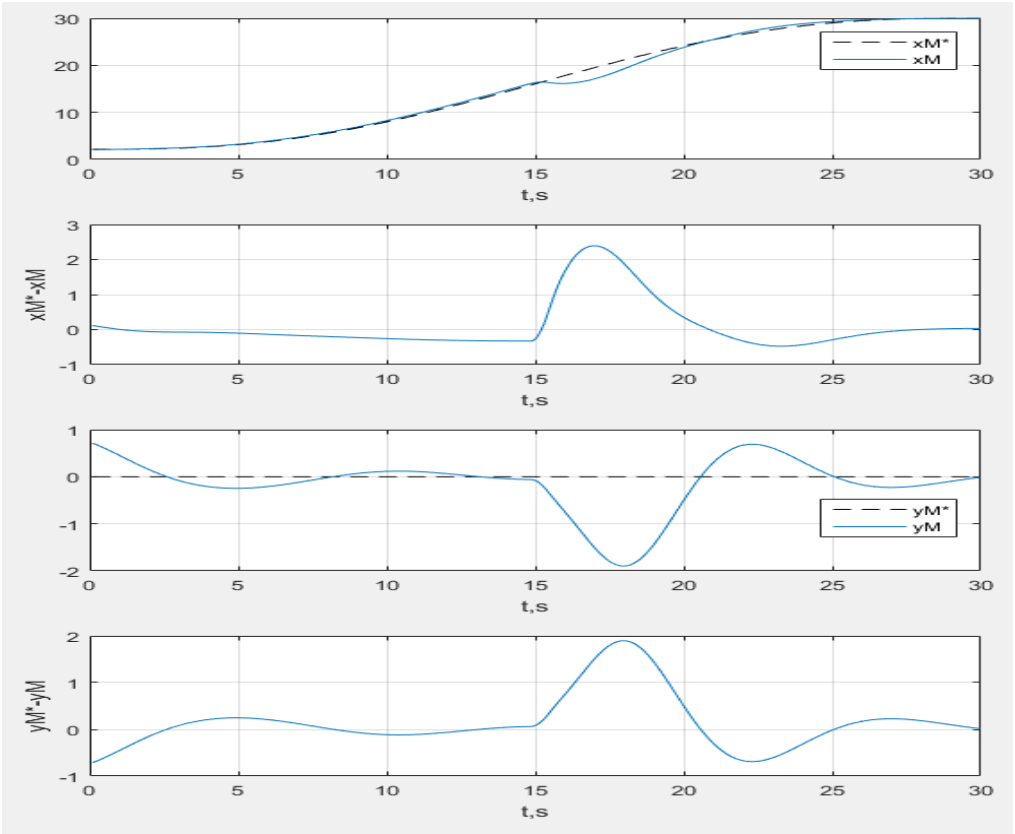

Рисунок 2.12 Адаптивный закон движения и отклонение реальных координат от заданных при комбинированном управлении

На Рисунке 2.14 показаны законы движения БТ при действии поперечного импульсного воздействия. На рис. 2.15 показаны расчётные законы изменения координаты, скорости и ускорения при импульсном силовом воздействии на БТ вдоль оси Y 10000 Н, 15-15.5 с.

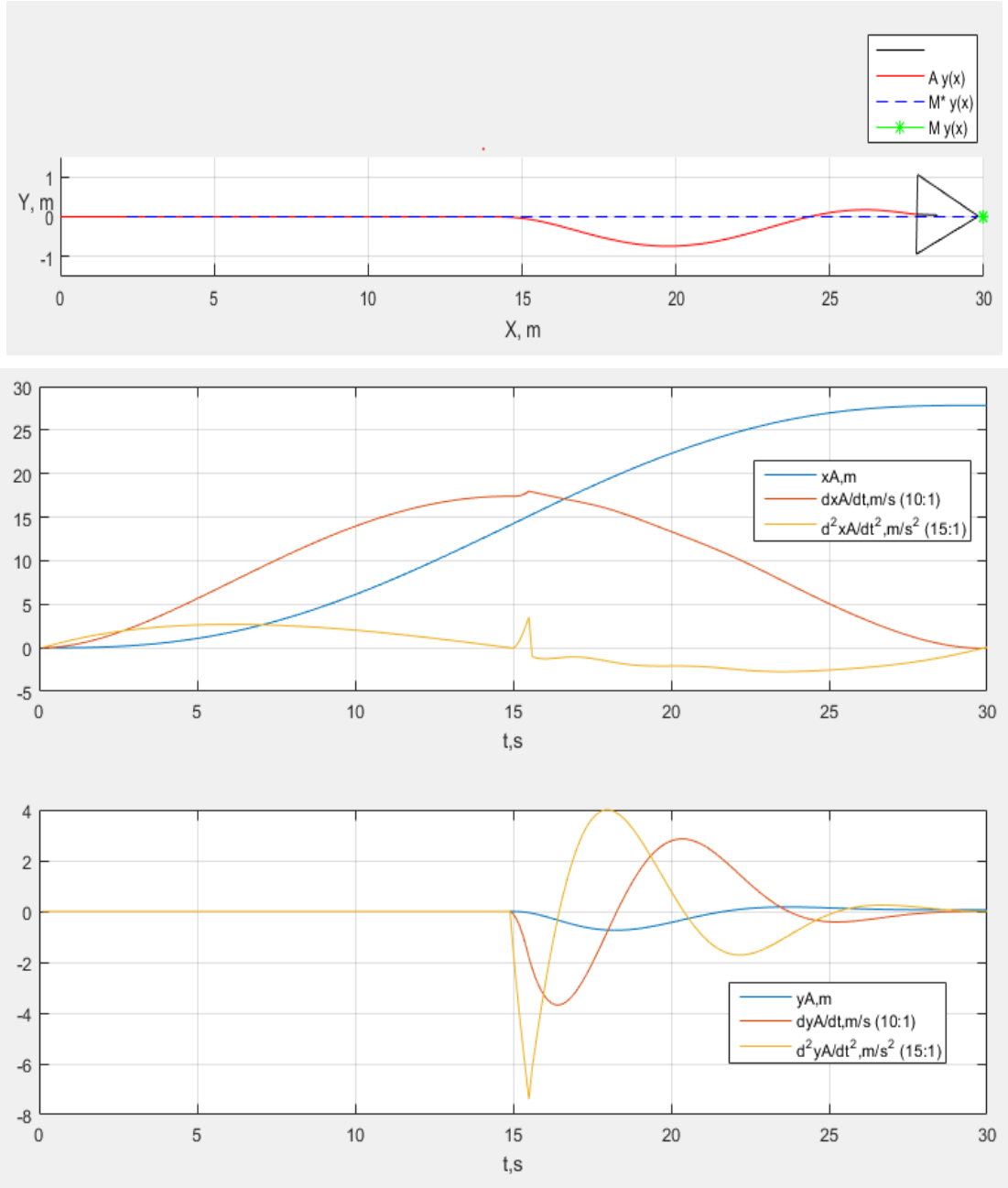

Рисунок 2.13 Расчётные законы движения БТ при действии поперечного импульсного воздействия

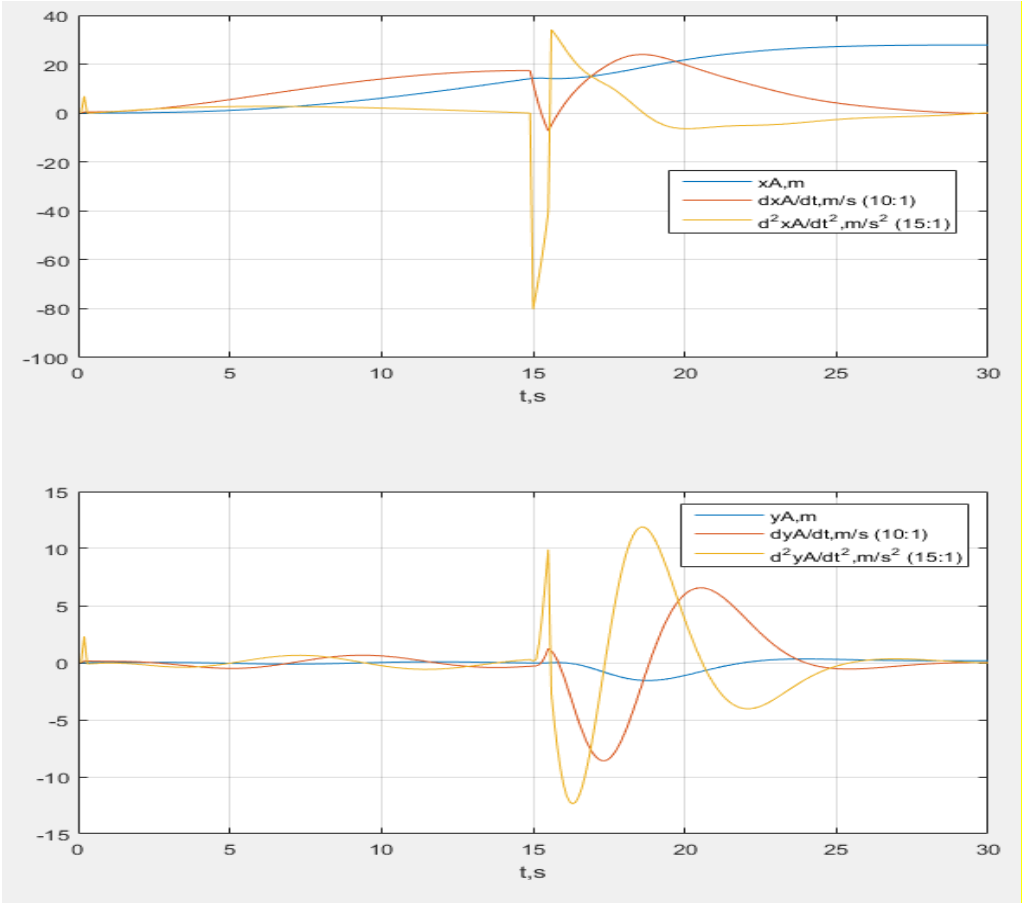

Рисунок 2.14 Расчетные законы изменения координаты, скорости и ускорения при импульсном силовом воздействии на БТ, вдоль оси Y 10000 Н, 15-15.5 с

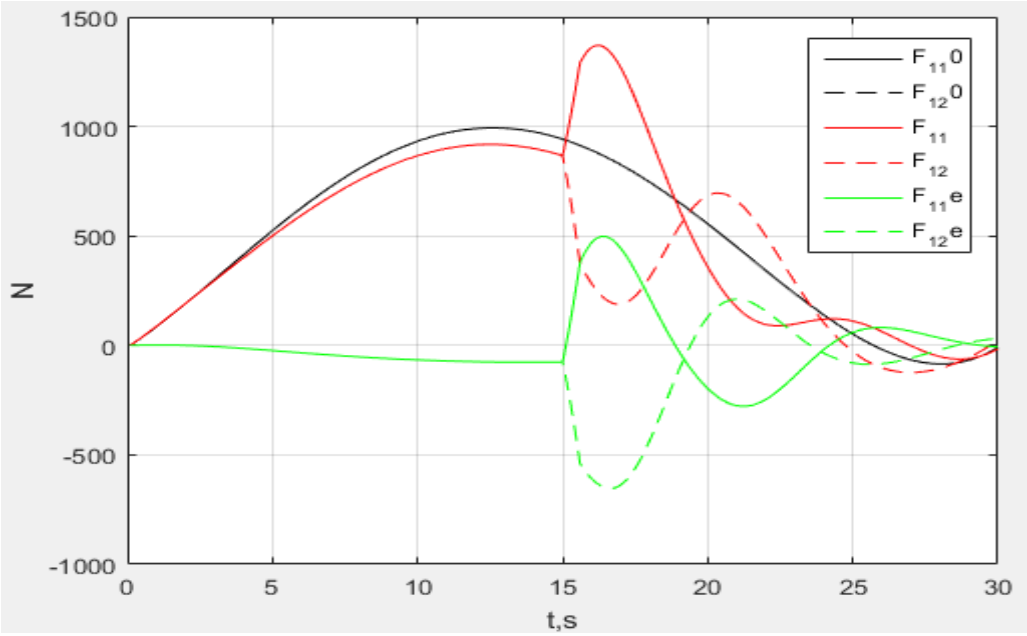

Рисунок 2.15 Графики изменения управляющих силовых воздействий при импульсном воздействии на БТ вдоль оси Y 10000 Н, 15-15.5 с

Сравнение различных стратегий управления движением БТ по прямой показывает, что управление с распараллеливанием управляющих факторов на основе расчетного и корректирующего воздействий оказывается наиболее эффективным по показателю минимизации отклонения реальной траектории движения беспилотного тягача от заданной оператором[130–134].

2.9 Выводы

Во второй главе диссертации разработана классификация четырех основных режимов движения БАС, а также структура БАС для осуществления наземных маневров с воздушными судами (ВС) в автономном режиме. Разработана структура БАС, состоящей из подсистемы БТ, сцепного устройства, ВС. Выполнен кинематический анализ беспилотного тягача в сцепке с самолетом и установлены связи между обобщенными скоростями и псевдоскоростями БТ и ВС. Разработана динамическая модель БАС, раскрывающая системные связи и взаимодействие подсистем с учетом свойств модуля сопряжения и обратных связей. Разработана математическая модель случайных и импульсных факторов, действующих на БТ, показан диапазон частот, в котором действует случайное возмущающее воздействие. Выполнено математическое моделирование тестового движения БТ.

Глава 3 Разработка управления движением беспилотной авиационной системой буксировки воздушных судов

3.1 Описание задач навигации беспилотной авиационной системы

В задаче терминального управления БАС необходимо перевести объект из начального положения в конечное [89]. Таким образом, должны быть определены значения функции задающей координаты в некоторых точках области определения на отрезке [a, b]. Задача планирования сводится к тому, чтобы наиболее точно определить вид этой функции по заданным в некоторых точках значениям. Один из наиболее распространенных подходов, основан на применении интерполяции сплайнами. Как известно [36] сплайн – функция, которая вместе с несколькими производными непрерывна на всем заданном отрезке и на каждом отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ в отдельности является некоторым многочленом [30, 49]. Определение коэффициентов полинома осуществляется с помощью сформулированных граничных условий. На практике используются кубические сплайны $S_3(x)$ третьей степени с непрерывной, первой производной. При необходимости обеспечения непрерывности второй производной применяются сплайны пятого порядка $S_5(x)$. Синтез допустимых траектории движения должен учитывать возможности аппаратных средств управляемой системы в части предельных значений управляющих напряжений и токов.

Проведённый анализ позволил выявить задачи системы управления БАС. При этом самым оптимальным способом планирования траектории движения беспилотного тягача является движение по заранее нанесенной полосе на поверхность разметки, по которой должно происходить движение БТ. Основными задачами, решаемыми системой управления БАС, являются (Рисунок 3.1):

1. Определение собственных координат БАС.
2. Обработка данных о маршруте.
3. Построение траекторий движения.
4. Позиционирование относительно ВС.

5. Обеспечение совместного движения по заданной траектории.

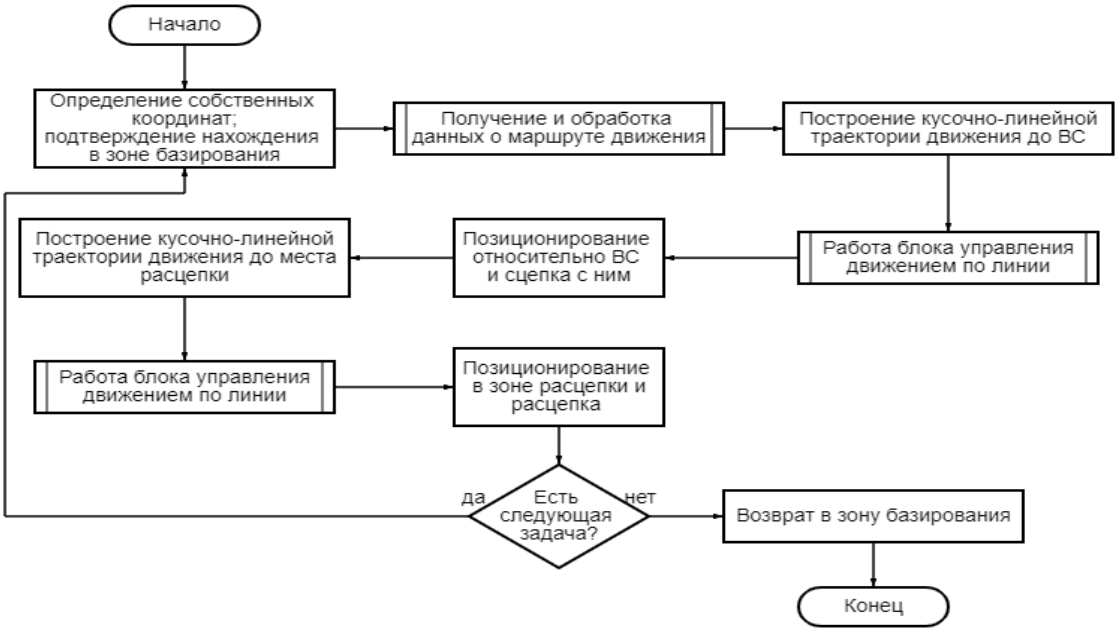

Рисунок 3.1 Алгоритм работы беспилотного тягача

В начале происходит определение собственных координат и подтверждение нахождения БТ в зоне базирования относительно контрастной линии. Далее оператор передает информацию о маршруте движения на бортовой вычислитель. Построение кусочно-линейной траектории движения в сторону ВС осуществляется встроенной программой блока планирования. Движение по контрастной линии осуществляется блоком управления. Приблизившись в ближнюю зону ВС происходит позиционирование относительно ВС и сцепка с ним. Блок планирования осуществляет построение траектории движения БАС в конечную точку маршрута. Далее, происходит движение по маршруту, которое реализуется блоком управления. Достигнув конечной точки маршрута, происходит остановка БАС и сцепное устройство БТ осуществляет расстыковку ВС. Далее, бортовой блок планирования проверяет наличие в файле ожидания нового задания, при наличии которого, происходит определение собственных координат, планирование траектории и движение по новому маршруту. При отсутствии новой задачи БТ автоматически возвращается в зону базирования.

3.2 Расчётная математическая модель беспилотной авиационной системы

Для построения расчётной модели разработана схема совместного движения подсистем БАС по заданной траектории в виде отрезка прямой, которая приведена на Рисунке 3.2. В основе расчётной модели лежит система дифференциальных уравнений БТ (2.30).

$$\dot{X}_1 = \Phi_1(X_1) + B_1\overline{U}_1 + \overline{W}_1.$$

После соответствующих преобразований, получим линейную математическую модель, приведенную к виду:

$$\dot{X}_1 = A_1X_1 + B_1\overline{U}_1 + C_1\overline{W}_1,$$

где

$$A_1 = \begin{vmatrix} -\mu_1 & m_1a\Omega_{10} & \frac{nc}{r} & \frac{nc}{r} \\ \frac{1}{J}m_1a\Omega_{10} & -\frac{1}{J}\mu_2 & \frac{1}{J}\frac{ncl}{r} & -\frac{1}{J}\frac{ncl}{r} \\ -\frac{nc}{rL_1} & \frac{ncl}{rL_1} & -\frac{1}{L_1}R & 0 \\ -\frac{nc}{rL_2} & \frac{ncl}{rL_2} & 0 & -\frac{1}{L_2}R \end{vmatrix};$$

$$B_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; C_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Примем, что расчётное движение БТ происходит под действием сил обеспечивающих управляемое движение беспилотного тягача:

$$F_{11} = \frac{nc_M}{r}i_1 \text{ и } F_{12} = \frac{nc_M}{r}i_2, \qquad (3.1)$$

где n, c_M -передаточное отношение привода и постоянная момента.

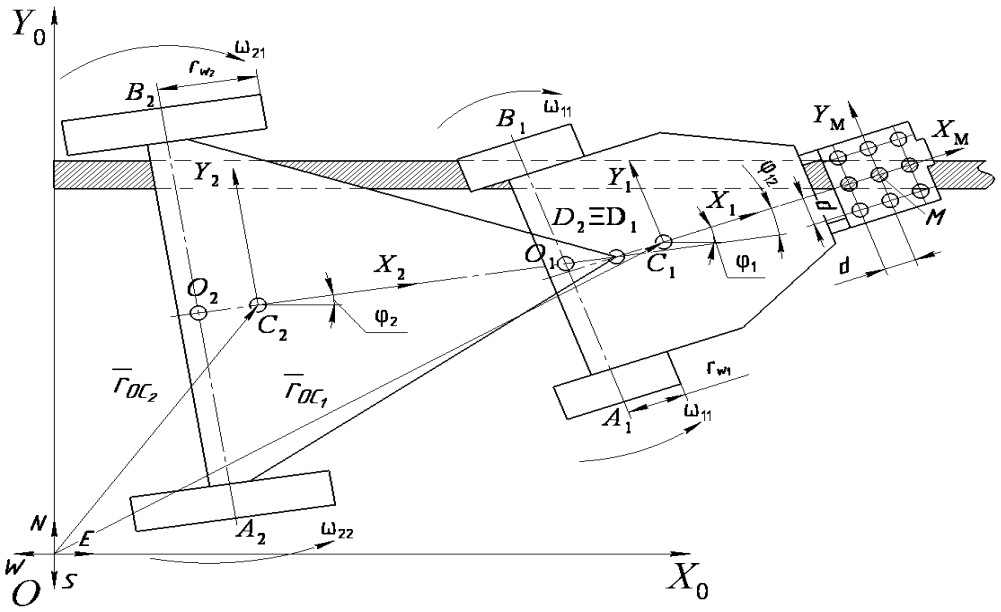

Рисунок 3.2 – Кинематическая схема совместного движения беспилотного тягача и воздушного судна вдоль контрастной линии [9].

Эти силы можно рассчитать по уравнениям (3.2) если известен расчётный закон изменения $V_1(t), \dot{\varphi} = \Omega_1(t)$.

$$\begin{cases} F_{11} + F_{12} = m\dot{V}_1 - m_1 \left| D_1 C_1 \right| \dot{\varphi}_1^{\,2} + \mu_1 V_1 \\ F_{11} - F_{12} = \dfrac{J\ddot{\varphi}_1 + m_1 \left| D_1 C_1 \right| \dot{\varphi}_1 V_1^{(1)} + \mu_2 \dot{\varphi}_1}{\left| A_1 B_1 \right|} \end{cases} \tag{3.2}$$

Силы F_{11}, F_{12} определяются величиной моментов, со стороны электроприводов и моментов трения качения. Соответственно, моменты электропривода БТ представим в виде:

$$M_{11} = F_{11} r = n c_M i_1 \,. \qquad M_{12} = F_{12} r = n c_M i_2 \,. \tag{3.3}$$

После чего возможно определить закон изменения токов двух ведущих колес по выражению:

$$i_1 = \frac{M_{11}}{nc_M}, \; i_2 = \frac{M_{12}}{nc_M}.$$

Далее определяются расчётные управляющие напряжения, согласно выражению: $U_i^* = (U_1, U_2)^T$

$$U_1 = L\frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{nc_\Omega}{r}(V_{O_1}^{(1)} + l\Omega_1). \quad (3.4)$$

$$U_2 = L\frac{di_2}{dt} + Ri_2 + \frac{nc_\Omega}{r}(V_{O_1}^{(1)} - l\Omega_1). \quad (3.5)$$

где L, R , c_Ω – индуктивность, активное сопротивление и коэффициент индукции обмоток электропривода.

3.3 Метод планирования кусочно-линейной траектории движения

Особое внимание необходимо уделить решению задачи по организации движения БАС по аэродрому. При движении БАС предлагается применять различные методы управления.

Траекторный метод управления, основанный на движении БАС по заданной траектории, к которым относятся: кусочно линейные траектории; кусочно криволинейные траектории; криволинейные траектории. В этом случае оператор определяет реперные точки посещения БАС и задает траекторию, по которой БАС движется от одной точки к другой. Построение кусочно – линейной траектории для буксировки ВС по аэродрому построено на декомпозиции сложной траектории движения на некоторое количество отрезков прямых. Упрощённые законы движения позволяют оптимизировать быстродействие главного вычислительного модуля и уменьшить риск критического смещения от расчётной траектории. Как только БТ получает команду переместить ВС из ангара *B* в зону взлёта V_1, для выполнения поставленной задачи бортовой вычислитель выстраивает траекторию движения, обозначенную сплошной линией затем, разделяет её на отрезки прямых (указаны стрелками). Примем, что необходимое

положение, будет определяться точкой P_D и происходить в плоскости X_0OY_0 по законам [126, 127] и описывается с помощью уравнений (3.4):

$$P_D = \left[X_{P_D}, Y_{P_D}\right]^T = \left[\sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j, \quad constant\right]^T; \tag{3.4}$$

$$P_D = \left[X_{P_D}, Y_{P_D}\right]^T = \left[constant, \quad \sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j\right]^T. \tag{3.5}$$

С целью получения постоянных a_j на отрезке AA_1 необходимо записать условие, определяющие положение точки P_D в начальный и конечный моменты времени:

$$t_0 \le t \le t_k,\ \overline{P}_D^0 = \left[X_A \quad Y_A\right]^T;\ \dot{\overline{P}}_D^0 = \left[\dot{X}_{P_D^0} \quad \dot{Y}_{P_D^0}\right]^T = \left[0 \quad 0\right]^T;\ \ddot{\overline{P}}_D^0 = \left[\ddot{X}_{P_D^0} \quad \ddot{Y}_{P_D^0}\right]^T = \left[0 \quad 0\right]^T;$$
$$\overline{P}_D^k = \left[X_{A_1} \quad Y_{A_1}\right]^T;\ \dot{\overline{P}}_D^k = \left[\dot{X}_{P_D^k} \quad \dot{Y}_{P_D^k}\right]^T = \left[0 \quad 0\right]^T;\ \ddot{\overline{P}}_D^k = \left[\ddot{X}_{P_D^k} \quad \ddot{Y}_{P_D^k}\right]^T = \left[0 \quad 0\right]^T.$$

Применив граничные условия, получим систему алгебраических уравнений (3.6), позволяющих найти постоянные a_j:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 \\ 0 & 1 & 2\cdot t_0 & 3\cdot t_0^2 & 4\cdot t_0^3 & 5\cdot t_0^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6\cdot t_0 & 12\cdot t_0^2 & 20\cdot t_0^3 \\ 1 & t_k & t_k^2 & t_k^3 & t_k^4 & t_k^5 \\ 0 & 1 & 2\cdot t_k & 3\cdot t_k^2 & 4\cdot t_k^3 & 5\cdot t_k^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6\cdot t_k & 12\cdot t_k^2 & 20\cdot t_k^3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{P_D^0} \\ \dot{X}_{P_D^0} \\ \ddot{X}_{P_D^0} \\ X_{P_D^k} \\ \dot{X}_{P_D^k} \\ \ddot{X}_{P_D^k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}. \tag{3.6}$$

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является нулевое значение начальных и конечных скоростей, а также ускорений, что позволяет свести к минимуму ударные нагрузки на систему БАС, вызванную резким стартом или остановкой. При этом скорость определяется по выражению:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^{5} a_i i t^{i-1}. \tag{3.7}$$

Ускорение определяется по выражению:

$$\ddot{x}(t) = \sum_{i=0}^{5} a_i i(i-1) t^{i-2}. \tag{3.8}$$

Таким образом, необходимое положение БАС на каждом отрезке траектории движения будет задаваться подвижной точкой M^* по формуле:

$$\overline{M}^* = \left[M_X^*, M_Y^*\right]^T = \left[\sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j, \quad H\right]^T \quad \text{при движении вдоль оси } OX_0 \quad (3.9)$$

$$\overline{M}^* = \left[M_X^*, M_Y^*\right]^T = \left[L, \quad \sum_{j=0}^{n=5} a_j \cdot t^j\right]^T \quad \text{при движении вдоль оси } OY_0 \quad (3.10)$$

H, L параметры траектории; a_j параметры, определяемые из граничных условий.

Алгоритм распознавания расчетного положения БАС основан на том, что положение БТ определяет (ОМ), которая контролирует положение точки M относительно M^*. Расчётное положение БАС при движении вдоль оси X_0O рассчитывается по следующей формуле:

$$M^* = \begin{bmatrix} \sum_{0}^{n=5} a_i \cdot t^i \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Таким образом, формирование управляющих напряжений по расчётной модели (3.2) происходит по соответствующим уравнениям:

$$\begin{cases} F_{11}^s + F_{12}^s = \left(m_1 + \dfrac{2 \cdot J_{W_1}}{r_{W_1}^{\ 2}}\right) \cdot \sum_{i=0}^{5} a_i i(i-1) t^{i-2(1)} - m_{C_1} \cdot \left|O_1C_1\right| \cdot \dot{\varphi}_1^{\ 2} + \mu_{V_{O_1}} \cdot \sum_{i=0}^{5} a_i i t^{i-1(1)} \\ F_{11}^s - F_{12}^s = \dfrac{\left(J_1 + \dfrac{\left|A_1O_1\right|^2}{r_{W_1}^{\ 2}} \cdot J_{W_1}\right) \cdot \ddot{\varphi}_1 + m_{C_1} \cdot \left|O_1C_1\right| \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot V_{O_1}^{\ (1)} + \mu_{\dot{\varphi}_1} \cdot \dot{\varphi}_1}{\left|A_1O_1\right|} \end{cases} \quad (3.12)$$

Нахождение расчётных сил в абсолютной системе координат осуществляется по уравнению:

$$\overline{F}_0 = \begin{bmatrix} F_{11}^0 \\ F_{12}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}^s + F_{12}^s \\ F_{11}^s - F_{12}^s \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Расчётная модель БАС представлена системой уравнений (3.2), (3.3), (3.4), (3.5) позволяет реализовать программное движение. В тоже время, наличие внешних возмущающих воздействий, а также параметрическая неопределенность системы

приводят к тому, что БАС откланяется от заданной траектории и в конечном счете теряет устойчивость и покидает заданную траекторию. Для оценки отклонения БТ от заданной траектории введем вектор ошибок, определяющий рассогласование по соответствующим координатам:

$$\bar{e} = \overline{M}^{*} - \overline{M} = \begin{bmatrix} e_X \\ e_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_X^{*} - M_X \\ M_Y^{*} - M_Y \end{bmatrix}. \tag{3.12}$$

Отклонение по углу поворота БТ определяется по формуле:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1^{*} - \varphi. \tag{3.13}$$

Для компенсации этих отклонений дополнительно к расчётному управлению в настоящей работе предлагается вести дополнительное корректирующее управление.

В этом случае, тяговые силы, создаваемые ведущими колесами БТ, определяются как сумма расчётных и корректирующих воздействий:

$$\overline{F} = \overline{F}^{0} + \overline{F}^{e},$$

$$\begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^{0} \\ F_{12}^{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{11}^{e} \\ F_{12}^{e} \end{bmatrix}. \tag{3.14}$$

Где $\overline{F}^{0}$ управление по расчётной модели; $\overline{F}^{e}$ - корректирующее управление.

Также, для обеспечения высокой точности движения БАС в работе предлагается использовать контур адаптации, изменяющий параметры регулятора, формирующего корректирующее управление по отклонению. Предлагается ввести интервал параметров, в котором коэффициенты регулятора постоянны:

$$|\bar{e}| \le \bar{e}_0; |\Delta P_{12}| \le \Delta P_{12}^{0}, \tag{3.14}$$

$$\Delta P_{12} = P_{12}^{*} - P_{12}.$$

При выходе из интервала (3.14), осуществляется корректировка коэффициентов регулятора в соответствии с формулой:

$$\bar{k}_i = \bar{k}_{i-1} + \alpha(|\Delta\varphi_1| - \Delta\varphi_{10}) + \beta(|\Delta P_{12}| - \Delta P_{12}^{0}), \tag{3.15}$$

где $\bar{k}_i, \bar{k}_{i-1}$ матрица коэффициентов регулятора на последующем и предыдущем шагах; α, β - матрицы весовых коэффициентов. Для этих целей разработана схема беспоисковой адаптивной самонастраивающейся системы (БАСНС), представленной на Рисунке 3.3. Основными элементами БАСНС являются блок планирования (БП), блок интервала (БИ), расчётная модель (ЭМ), регулятор, блок настройки (БН), адаптивный регулятор (АР), объект управления (ОУ), информационная система РБАС (ИС).

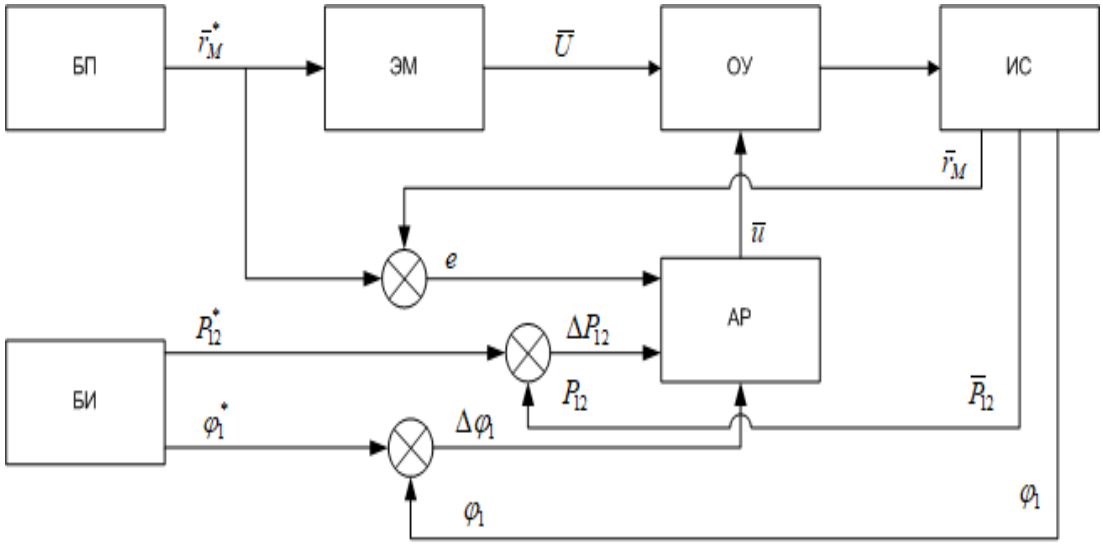

Рисунок 3.3 – Структурная схема адаптивной системы управления БАС [9]

Архитектуру системы управления БАС можно представить в виде выражения:

$$U_i = U_i^* + u_i, \tag{3.16}$$

где U_i^* управляющие воздействия; u_i корректирующее управление, при $i = 1,2$. Для корректировки внешних и параметрических возмущений определяется корректирующие напряжения равное $\bar{u} = (u_1, u_2)^T$, тогда получим:

$$\bar{u} = K\bar{e}, \tag{3.16}$$

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e_x \\ e_y \end{vmatrix}.$$

Для определения компонент матрицы применяется метод линейно-квадратичной оптимизации. Запишем исходную систему дифференциальных уравнений (2.33) в отклонениях. Введем следующие обозначения:

$$\overline{V} = \frac{d\bar{e}}{dt},$$

$$\dot{\overline{V}} = \frac{d\dot{\bar{e}}}{dt},$$

$$\omega = \frac{d\Delta\varphi}{dt},$$

$$\dot{\omega} = \frac{d\Delta\dot{\varphi}}{dt}.$$

Для определения $\overline{V}$, ω воспользуемся уравнениями, полученными из расчётной модели (3.2):

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{\frac{1}{R}\cdot\left(\tau_R+\tau_L\right)+m_c\cdot d\cdot\omega^2}{\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)} = \frac{\left(\tau_R+\tau_L\right)}{R\cdot\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)}+\frac{m_c\cdot d\cdot\omega^2}{\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)} \\
\dot{\omega} &= \frac{\frac{L}{R}\cdot\left(\tau_R-\tau_L\right)-m_c\cdot d\cdot\omega\cdot V}{\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)} = \frac{L\cdot\left(\tau_R-\tau_L\right)}{R\cdot\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)}-\frac{m_c\cdot d\cdot\omega\cdot V}{\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)}
\end{aligned}. \qquad (3.17)$$

Преобразуем эти выражения к виду:

$$\begin{bmatrix}\dot{V}\\ \dot{\omega}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m_c\cdot d\cdot\omega}{\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)} \\ \frac{-m_c\cdot d\cdot\omega}{\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)} & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}V\\ \omega\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \frac{1}{R\cdot\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)} & \frac{1}{R\cdot\left(m+\frac{2\cdot J_w}{R^2}\right)} \\ \frac{L}{R\cdot\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)} & -\frac{L}{R\cdot\left(J+\frac{2\cdot L^2}{R^2}\cdot J_w\right)}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\tau_R\\ \tau_L\end{bmatrix}$$

Введем дополнительные обозначения:

$$Y = \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix}; \dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}.$$

Тогда (3.17) приобретает вид (3.18):

$$\dot{Y} = AY + B\bar{u}, \tag{3.18}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{m_c \cdot d \cdot \omega}{\left(m + \dfrac{2 \cdot J_w}{R^2}\right)} \\ \dfrac{-m_c \cdot d \cdot \omega}{\left(J + \dfrac{2 \cdot L^2}{R^2} \cdot J_w\right)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{R \cdot \left(m + \dfrac{2 \cdot J_w}{R^2}\right)} & \dfrac{1}{R \cdot \left(m + \dfrac{2 \cdot J_w}{R^2}\right)} \\ \dfrac{L}{R \cdot \left(J + \dfrac{2 \cdot L^2}{R^2} \cdot J_w\right)} & -\dfrac{L}{R \cdot \left(J + \dfrac{2 \cdot L^2}{R^2} \cdot J_w\right)} \end{bmatrix}.$$

В соответствии с LQR алгоритмом линейно-квадратичного регулятора закон управления имеет вид:

$$\bar{u} = KY \tag{3.19}$$

$$K = -R^{-1}B^T P. \tag{3.20}$$

Показателем оптимальности является:

$$J = \int_0^\infty (Y^T Q(t) Y + U^T R(t) U) dt \to \min. \tag{3.21}$$

Здесь Q, R положительно определенные матрицы коэффициентов размерностью 2×2. Закон управления по отрицательной обратной связи, найденный по LQR алгоритму, должен минимизировать показатель оптимальности. Где P находится из решения уравнения Риккати (J. Riccati):

$$A^T \cdot P + P \cdot A - P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P + Q = -\dot{P}. \tag{3.22}$$

Параметры матрицы регулятора K в номинальном режиме внутри интервала (3.13). При выходе параметров из интервалов (3.13) предлагается вести процедуру изменения параметров регулятора, которая осуществляется на основе информации о состоянии объекта управления с целью достижения оптимального качества управления при значительно изменяющихся условиях работы. Наиболее существенное влияние на поведение системы оказывают отклонение по углу поворота БТ относительно траектории и отклонение силы межсистемного взаимодействия $\Delta\varphi_1$ и ΔP_{12} . При выходе из интервала (3.13) осуществляется корректировка параметров матрицы K по следующему алгоритму:

$$k_{11} = k_{110} + \frac{\partial k_{11}}{\partial P_{12}}\Delta P_{12} \text{ и } k_{22} = k_{220} + \frac{\partial k_{11}}{\partial \varphi_1}\Delta\varphi_1, \qquad (3.23)$$

где k_{110}, k_{220} параметры регулятора в номинальном режиме; $\frac{\partial k_{11}}{\partial P_{12}}$, $\frac{\partial k_{11}}{\partial \varphi_1}$ коэффициенты, определяющие чувствительность параметров регулятора; ΔP_{12}, $\Delta\varphi_1$ выход идентифицируемых параметров за номинальный интервал.

Рассмотрим пример определения коэффициентов регулятора корректирующих воздействий.

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0{,}0512 \\ -0{,}0225 & 0 \end{vmatrix}; B = \begin{vmatrix} 0{,}9615 & 0{,}9615 \\ 0{,}4226 & -0{,}4226 \end{vmatrix} * 10^3; R = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; Q = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Уравнение Рикатти решается с помощью подпрограммы: [P, L, K] = care (A, B, Q, R); в пакете MATLAB. В результате получаем матрицу *P* в виде:

$$P = \begin{vmatrix} 0{,}7413 & -0{,}0004 \\ -0{,}0004 & 1{,}6425 \end{vmatrix} \times 10^3.$$

Матрица, определяющая коэффициенты регулятора с учетом (3.20), имеет вид:

$$K = \begin{vmatrix} 0{,}7126 & 0{,}6937 \\ 0{,}7129 & -0{,}6944 \end{vmatrix}.$$

Далее, тестируется синтезированный регулятор в различных режимах возникновения ошибок при движении БТ. Задается закон изменения ошибки по

линейной и угловой скоростям и по (3.20) с учетом (3.21) производится расчет корректирующего момента.

1) Постоянная ошибка по угловой скорости Рисунок 3.4.

2) Переменная ошибка по скорости без ошибки по угловой скорости Рисунок 3.5.

3) Переменная ошибка по угловой скорости без ошибки по линейной скорости Рисунок 3.6.

4) Переменная ошибка по угловой и синхронной линейной скорости Рисунок 3.7.

5) Переменная ошибка по угловой и асинхронной линейной скорости Рисунок 3.8.

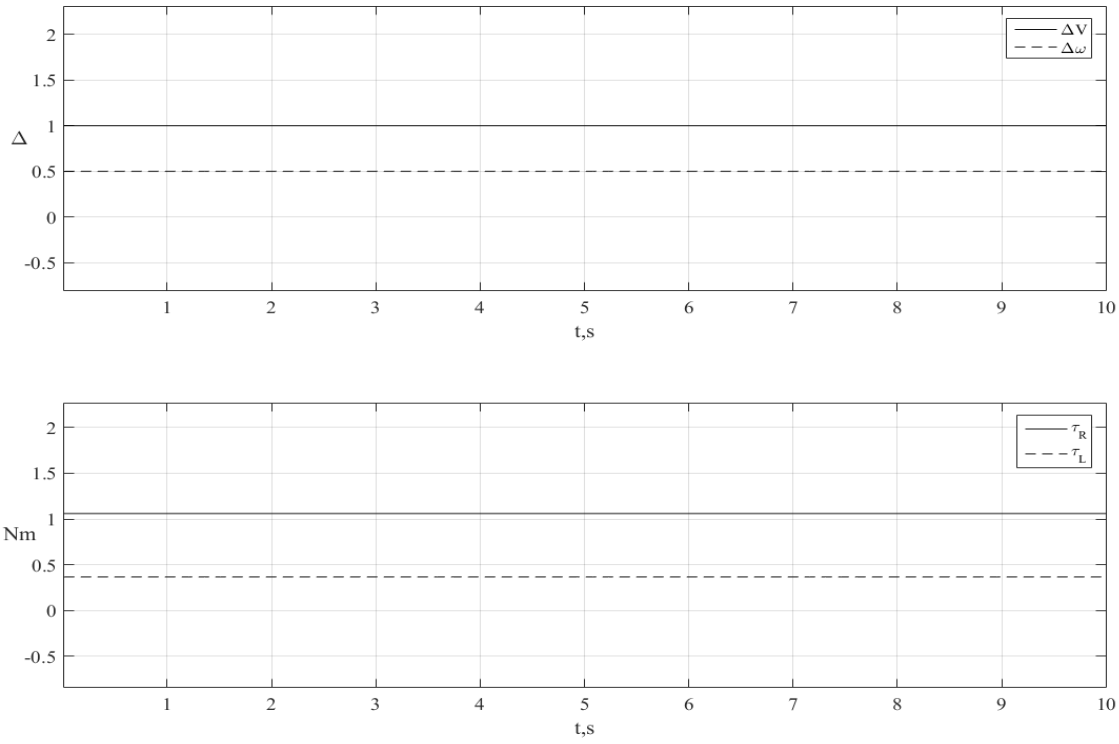

Рисунок 3.4 Диаграмма постоянной ошибки по угловой и линейной скоростям и корректирующие моменты

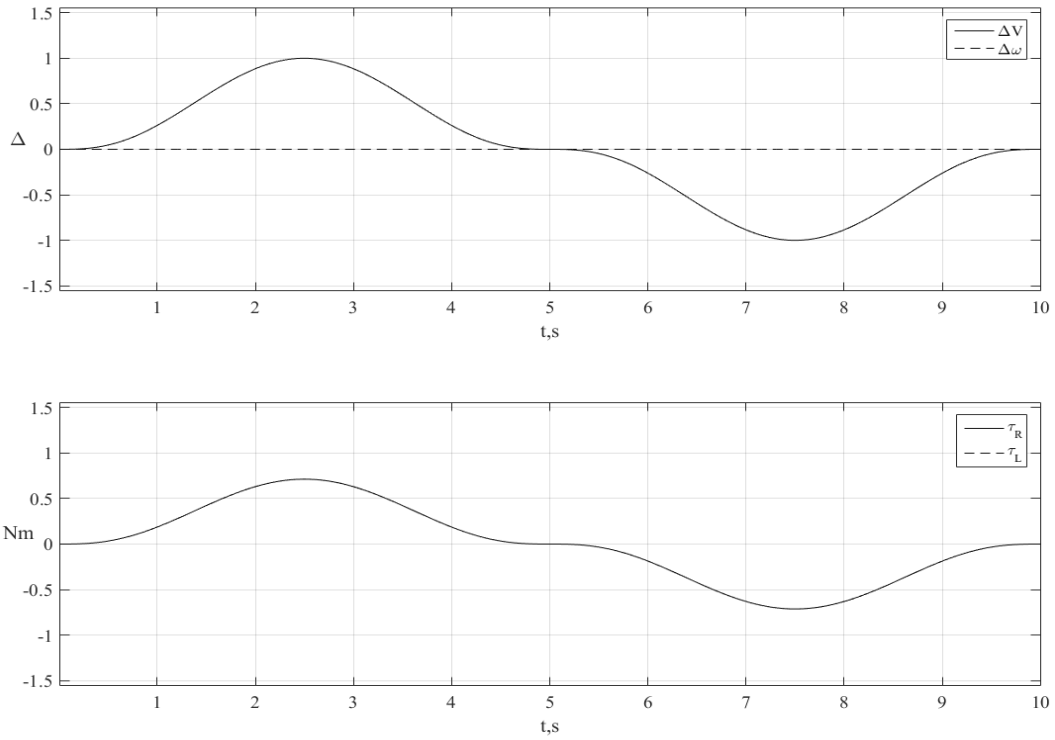

Рисунок 3.5 Диаграммы переменной ошибки по линейным скоростям при отсутствии отклонения по угловой скорости и корректирующих моментов

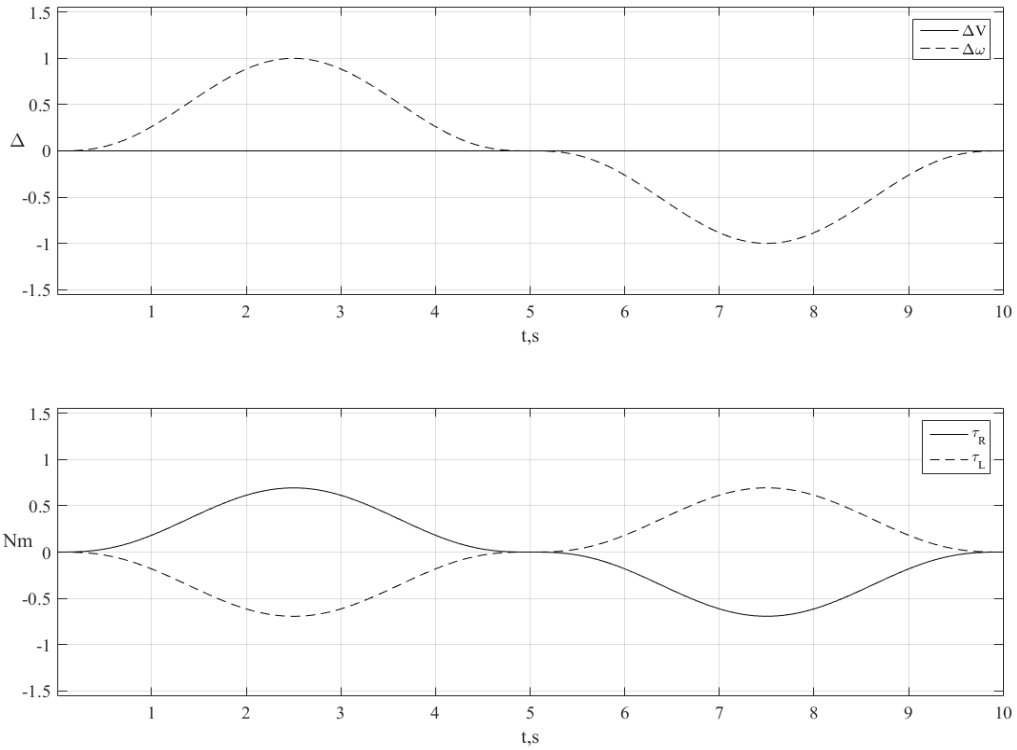

Рисунок 3.6 Диаграммы переменной ошибки по угловой и при отсутствии ошибки по линейной скорости и корректирующих моментов

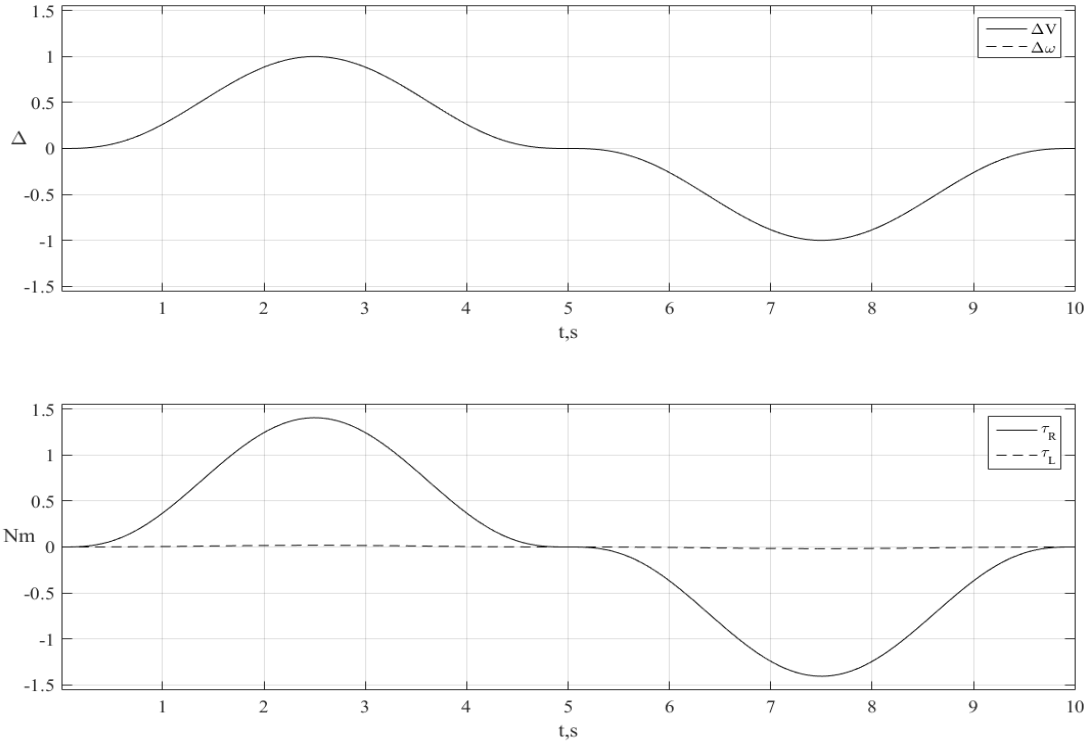

Рисунок 3.7 Диаграммы переменной ошибки
по угловой и синхронно по линейной скоростям и корректирующих моментов

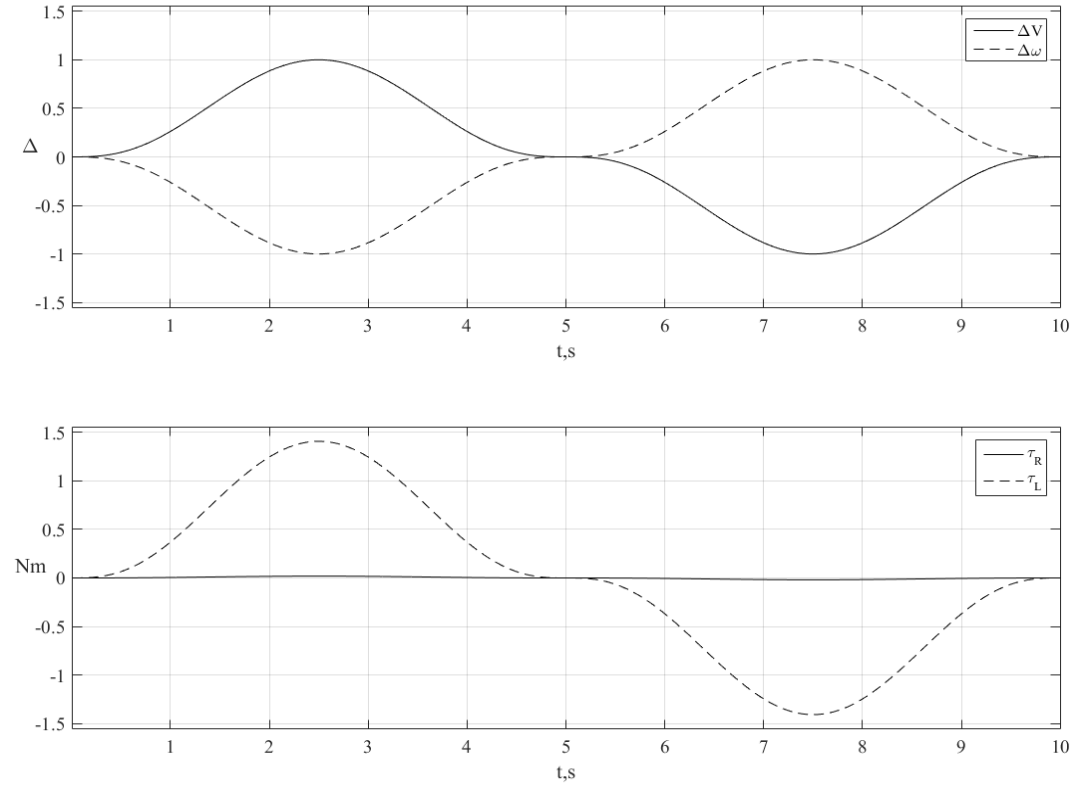

Рисунок 3.8 График переменной ошибки по линейной скоростям и
корректирующих моментов

В результате проведенных вычислительных экспериментов получено подтверждение работоспособности методики синтеза параметров многоканального регулятора, формирующего корректирующие воздействия на основе LQR оптимизации [132, 134].

3.4 Моделирование работы оптоэлектронной интегральной микросхемы

С целью определения положения БАС по контрастной линии (КЛ), применяется метод клеток-ячеек, реализованный на оптоэлектронной микросхеме (ОМ) размером $m \times n$ (Рисунок 3.9.). При определении нужного количества светодиодов возможно выбирать отклонение реального положения БТ от заданного с точностью, определяемой расстоянием между светодиодами d, при этом выходные значения сигналов светодиодов датчиков, будут формировать матрицу 3×3:

$$\mathrm{M} = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{11} & \mathrm{C}_{12} & \mathrm{C}_{13} \\ \mathrm{C}_{21} & \mathrm{C}_{22} & \mathrm{C}_{23} \\ \mathrm{C}_{31} & \mathrm{C}_{32} & \mathrm{C}_{33} \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Отраженному от контрастной линии сигналу, будет присваиваться 0, если нет, то присваивается 1. С оптоэлектронной микросхемой связана система координат X_1OY_1, а подвижная система координат $X_0O_0Y_0$ связана с контрастной линией Точка M^* задает желаемое положение центра ОМ. Поворот $X_1O_1Y_1$ относительно $X_0O_0Y_0$ определяется углом φ_1 . Алгоритм распознавания реального положения БАС приведен ниже. Если выполнено условие, при котором отклонение реального положения от заданного $M^*M < |d|$, то будем считать, что отклонение БТ от заданного положения находится в допустимом диапазоне.

Ориентация БТ относительно контрастной линии определяется углом φ_1 и может также оцениваться с помощью ОМ, а также с помощью специального датчика IMU модуля.

$$M^{*}M < |d|.$$

При этом, матрица выходных сигналов примет вид: $M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.(Рисунок 3.9а) Если сигналы формируют матрицу в виде: $M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, то регистрируется выход ОМ за КЛ и возникает необходимость корректировки положения ОМ, (Рисунок 3.9 б.)

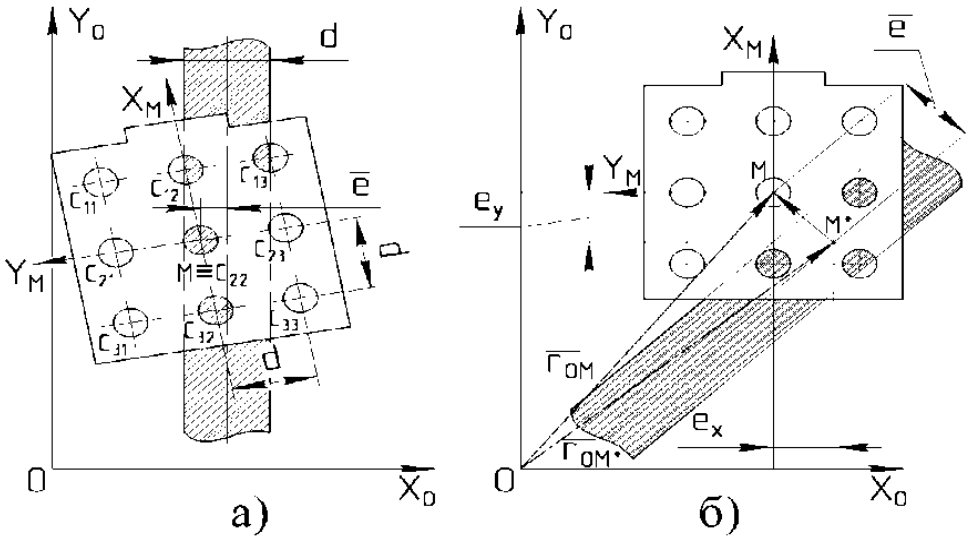

Рисунок 3.9 – Пространственное положения ОМ над КЛ
а) при допустимом отклонении; б) при недопустимом отклонении [9]

Рассмотрим различные случаи поворота ОМ и соответственно БТ относительно контрастной линии, представленные на Рисунке 3.10. При этом матрица выходных значений светодиодов примет вид $M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. Если оптронная матрица имеет вид $M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, то БТ развернут на угол $\varphi_1 \approx +45^{\circ}$ Рисунок 3.10 б, если $M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, то $\varphi_1 \approx +90^{\circ}$ (Рисунок 3.10, в). Если $M =$

$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & 1 & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}$ (Рисунок 3.10 г), то угол поворота ОМ относительно линии составит $\varphi_1 \approx 135^{\circ}$. В случае, если $M = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\0 & 1 & 0\\0 & 1 & 0\end{bmatrix}$ (Рисунок 3.10, д), то угол $\varphi_1 \approx 180^{\circ}$

Анализируя значения компонент матрицы М приходим к выводу, что измерение угла поворота БТ достоверно в диапазоне $-90^0 \le \varphi_1 \le 90^0$. Когда угол поворота равен $90^{\circ} \le \varphi_1 \le 180^{\circ}$, в этом случае потребуется дополнительная информация для формирования управляющих напряжений.

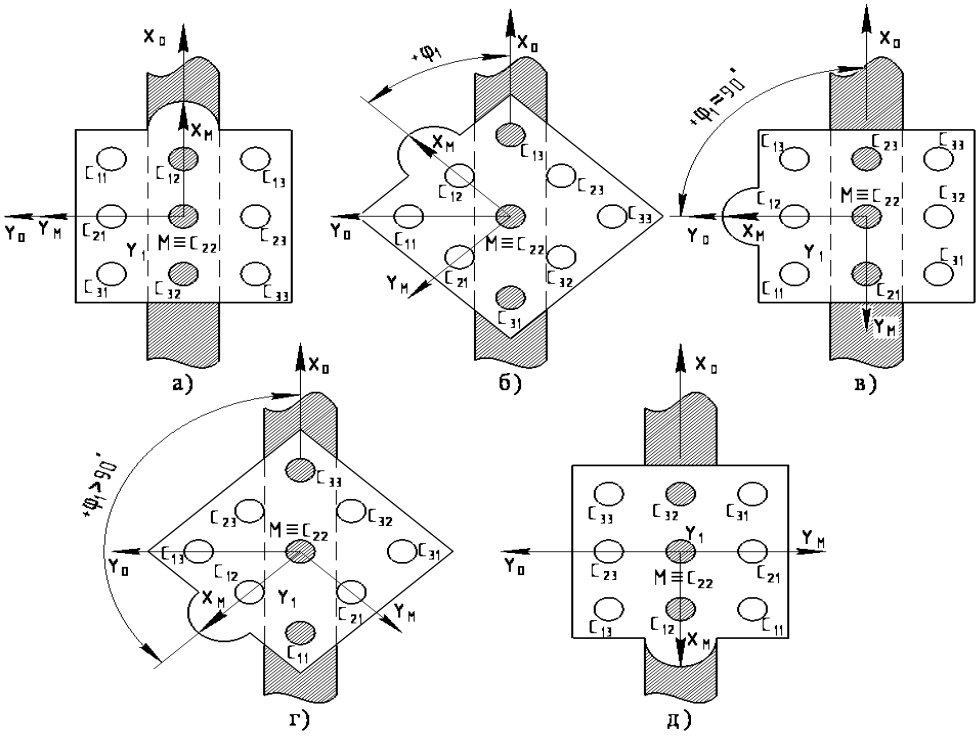

Рисунок 3.10 Варианты положения оптронной матрицы над контрастной линией [9]

3.5 Разработка системы управления тягача в режиме поиска передней стойки

Рассмотрим режим идентификации передней стойки шасси ВС. Этот режим необходим для определения положения передней стойки относительно БТ. В этом

случае реализуется терминальное управление, связанное с переходом БТ из начального положения, связанное с моментом начала идентификации в конечное при котором происходит захват передней стойки ВС.

Характер траектории в этом случае не является существенным. Важно перейти из одной точки в другую за конечное время. Для идентификации передней стойки применяется камера системы технического зрения (СТЗ), установленная на БТ. Информация, поступающая с камеры СТЗ, обрабатывается блоком анализа изображений и поступает в блок принятия решений. Данный блок формирует задающие напряжения, поступающие в БУ приводами ведущих колес БТ. Здесь также формируется управление схватом сцепного устройства (СУ). СТЗ, ИК дальномеры, гироскопы и магнитометр при своей работе позволяют контролировать положение БТ относительно передней стойки ВС [133, 134].

На Рисунке 3.11 представлена структурная схема системы управления БТ.

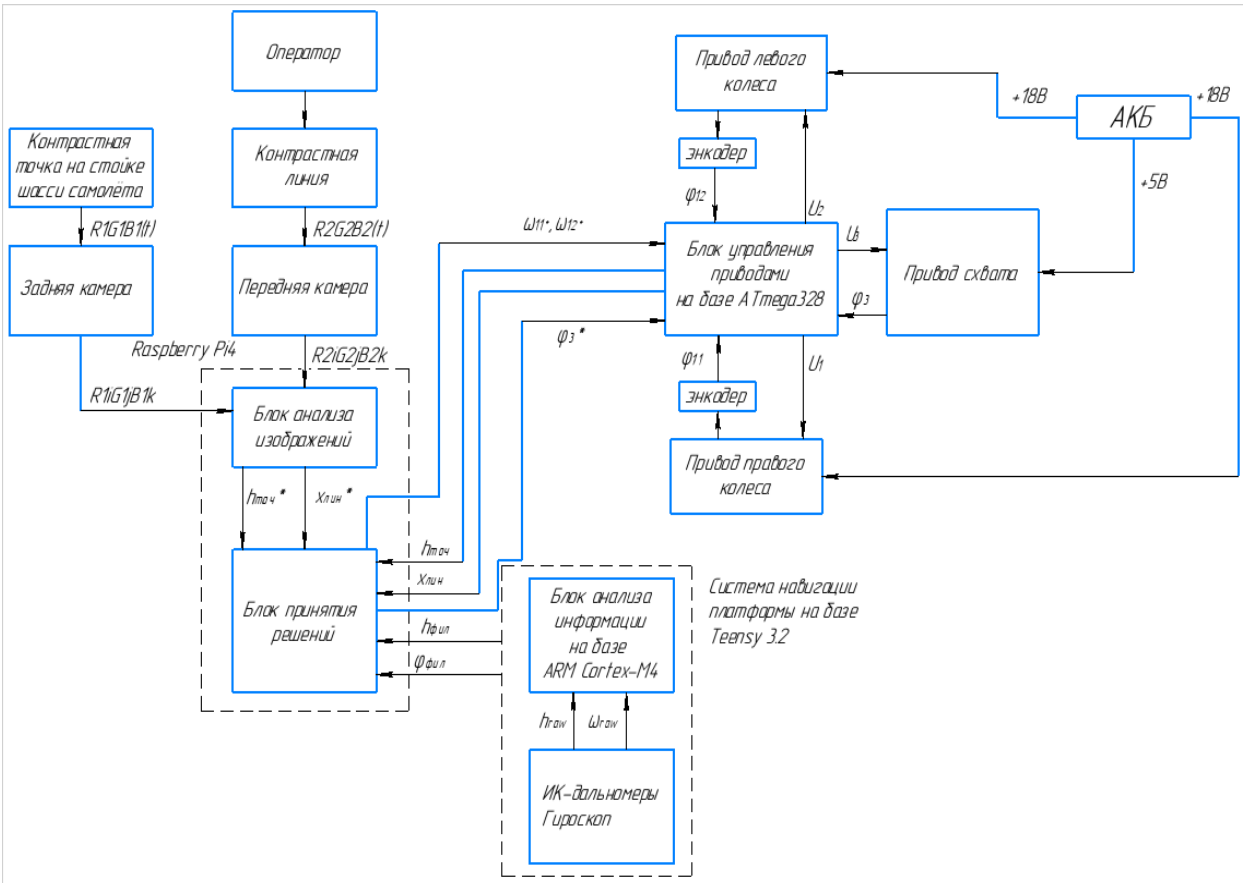

Рисунок 3.11 – Структурная схема системы управления беспилотного тягача [6]

Блок-схема логического регулятора изображена на Рисунке 3.12. Для привода левого колеса схема системы управления аналогична.

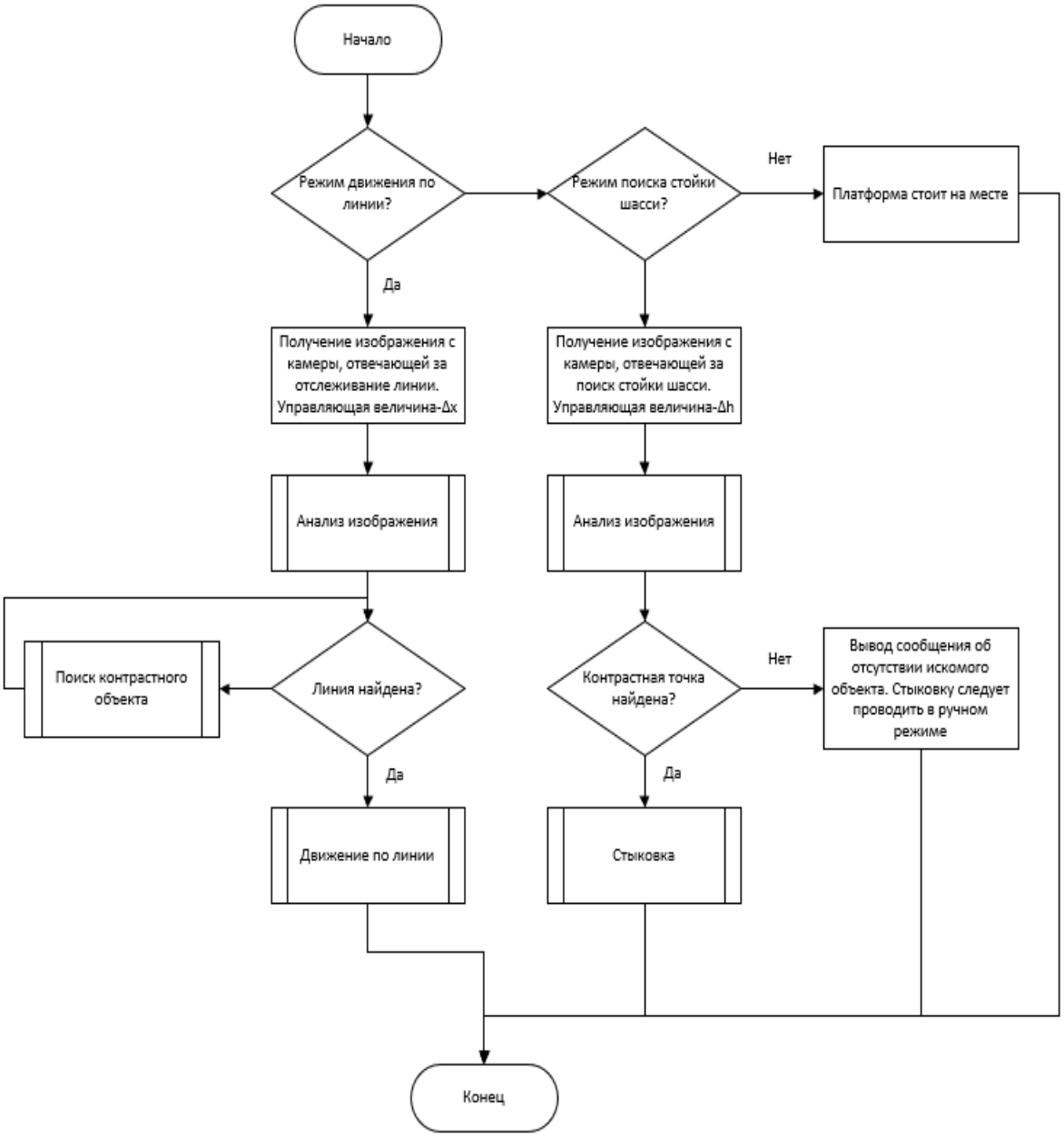

Рисунок 3.12 – Схема логического регулятора системы управления беспилотного тягача [6]

Когда расстояние до передней стойки ВС достигает заданного значения *L*, БУ формирует управляющее напряжение *U3* на сервопривод схвата, происходит закрытие схвата и фиксацию передней стойки шасси самолёта. На первом этапе,

производится оценка состояния БТ. Определяется находится ли он в движении по контрастной линии или переходит в режим поиска стойки шасси. Информация, полученная камерой СТЗ обрабатывается и выясняется находится ли контрастная точка в поле изображения. Если контрастная точка найдена, то происходит стыковка БТ и ВС.

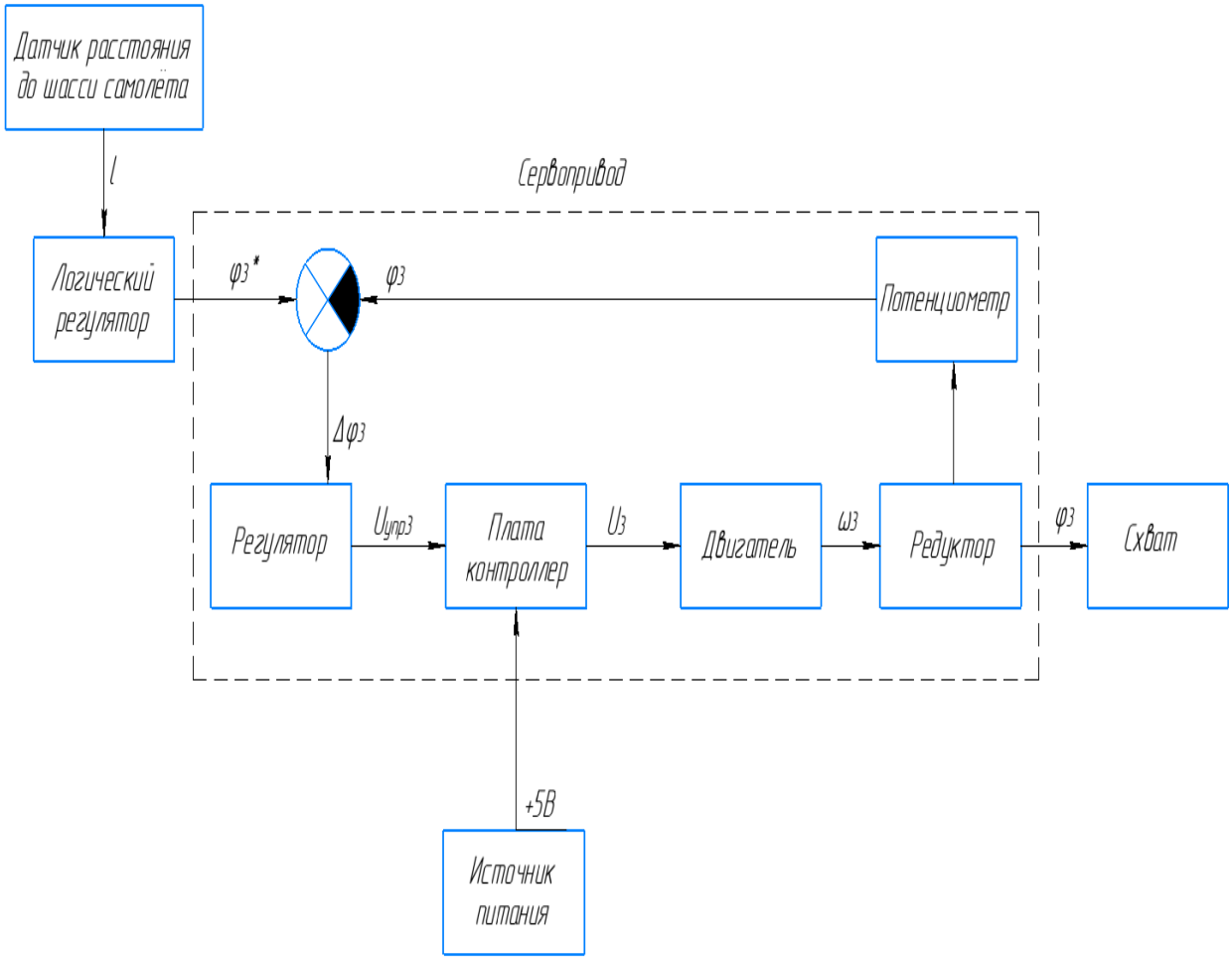

Рисунок 3.13 – Структурная схема схвата модуля сопряжения

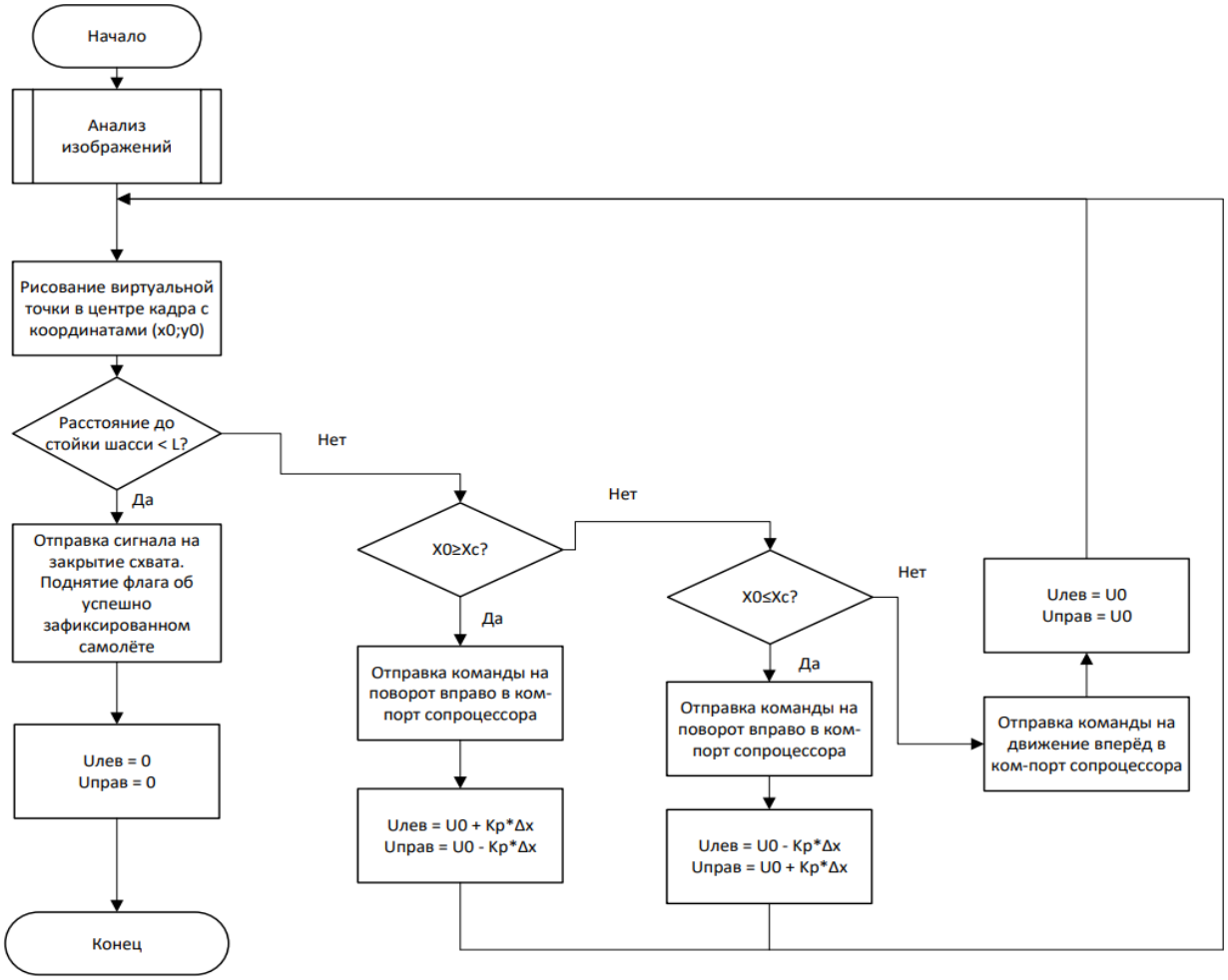

Рисунок 3.14 – Блок-схема алгоритма стыковки БТ и ВС

В противном случае, на монитор оператора поступает сигнал о невозможности определения передней стоки. Стыковка производится в ручном режиме.

На Рисунке 3.13 изображена структурная схема системы управления схвата модуля сопряжения БТ и ВС. В данной системе управления контролируется расстояние, получаемое с установленного на платформу дальномера. Стыковка БТ и ВС происходит в соответствии с алгоритмом, приведенным на Рисунке 3.14. Для оценки положения схвата БТ относительно передней стойки применяется камера СТЗ. Определяется виртуальная точка в центре кадра. Оценивается расстояние до стойки. Если схват приблизился к стойке на расстояние меньше *L*, то поступает сигнал на закрытие схвата об успешно зафиксированной передней стойке самолета.

3.6 Результаты моделирования и их обсуждение

Рассмотрим результаты математического моделирования движения БАС по заданной траектории , в котором используются следующие значения: $m_{C1}=2000$ *кг* масса БТ без колёс, $m_{W1}=200$ *кг* масса колеса БТ, $m_1=2200$ *кг* общая масса БТ, $r_{W1}=0,4$ *м* радиус колеса БТ, $J_{W1}=0,5(m_{W1} r_{W1}^2)$ *кг м*^{2} момент инерции колеса БТ, $J_1=J_{C1}+m_{C1}|O_1C_1|^2+2m_{W1}J_{W1}=920$ *кгм*^{2} общий момент инерции БТ, $m_{C2}=22000$ *кг* – масса ВС без колёс, $m_{W2}500$ *кг* – масса колеса ВС, $m_2=23000$ *кг* – общая масса ВС, $r_{W2}=0,45$ *м* – радиус колеса ВС, $J_{W2}=0,5(m_{W2} r_{W2}^2)$ *кг м*^{2} – момент инерции колеса ВС, $J_2=J_{C2}+m_{C2}|O_2C_2|^2+2m_{W2}J_{W2}=38634$ *кгм*^{2} - общий момент инерции ВС.

3.6.1 Моделирование прямолинейного движения БТ при расчётном управлении

Влияние амплитуды импульса возмущающего воздействия показана на рис. 3.15. С увеличением амплитуды характер движения БТ изменяется, при значении f = 20000. 1 – желаемая траектория; 2 – при f = 1000; 3 – при f = 5000; 4 – при f = 10000; 5 – при f = 20000 происходит откат БТ и далее происходит движение в сторону от расчётной траектории. Программное расчётное управление не обеспечивает положение БТ на заданной траектории, не является робастным и даже малое возмущение приводит к уходу БТ с заданной траектории.

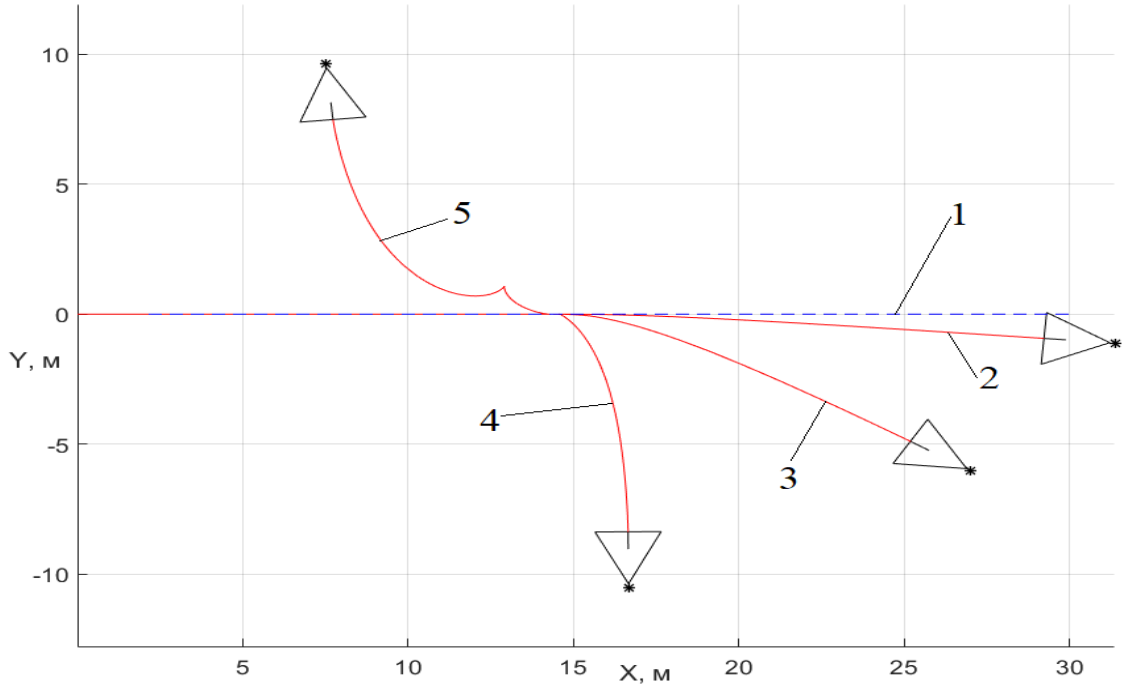

Рисунок 3.15 – Траектории движения точки O_1 БАС при действии различной по модулю возмущающей импульсной силы.

Далее приведены результаты моделирования движения БТ при импульсном внешнем возмущении, по расчётной модели и корректирующем управлении. На Рисунке 3.16 показаны графики зависимости управляющих воздействий.

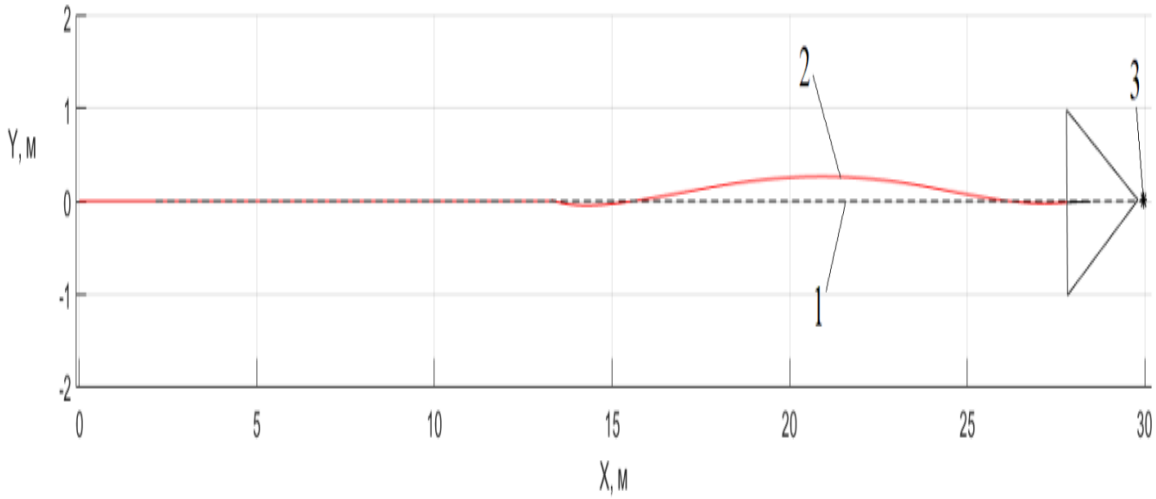

Рисунок 3.16 – График движения БТ при расчётном и корректирующим управлении.

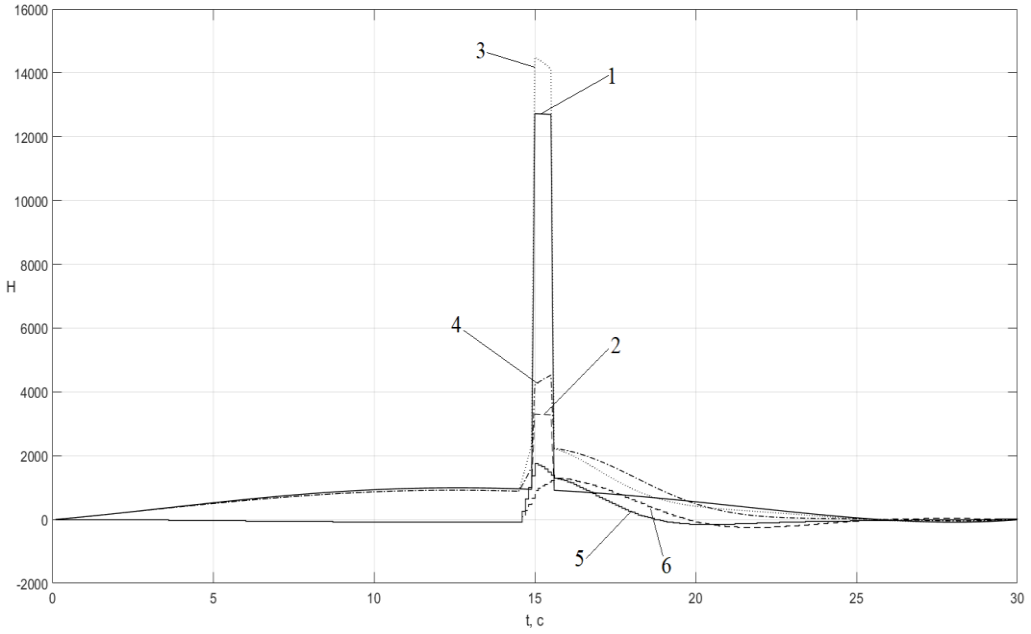

Рисунок 3.17 – График изменения управляющих сил

На Рисунке 3.18 представлены графики изменения кинематических параметров, определяющих положение БТ на траектории, скорость и ускорение точки O_1. На Рисунке 3.19 показаны зависимости расчётного положения БТ на траектории и отклонения положения беспилотного тягача от заданного, рассчитанного по уравнениям (3.6).

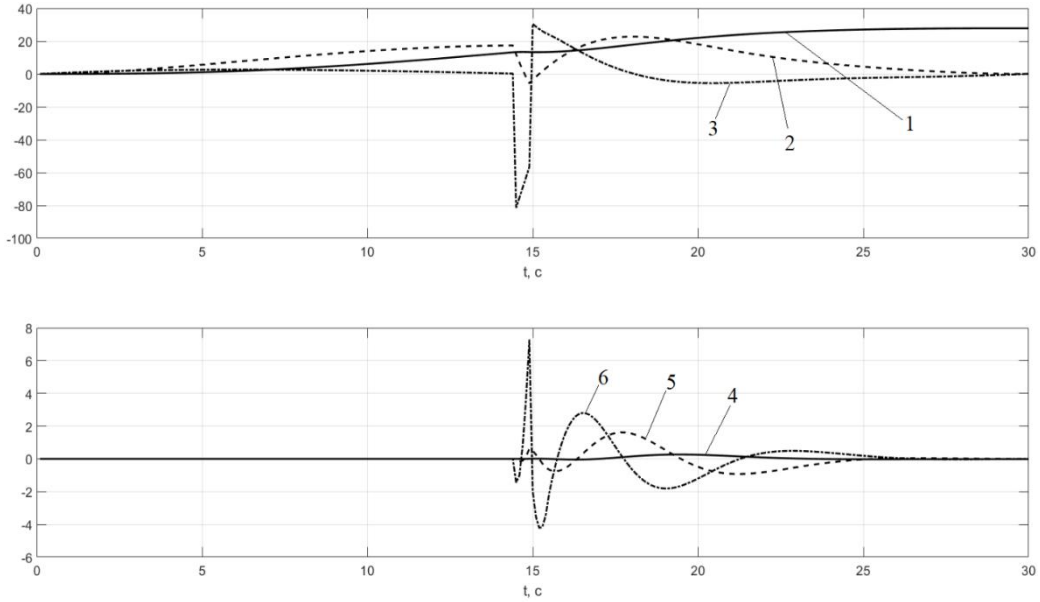

Рисунок 3.18 – Графики изменения кинематических параметров, определяющих положение БТ на траектории, скорость и ускорение

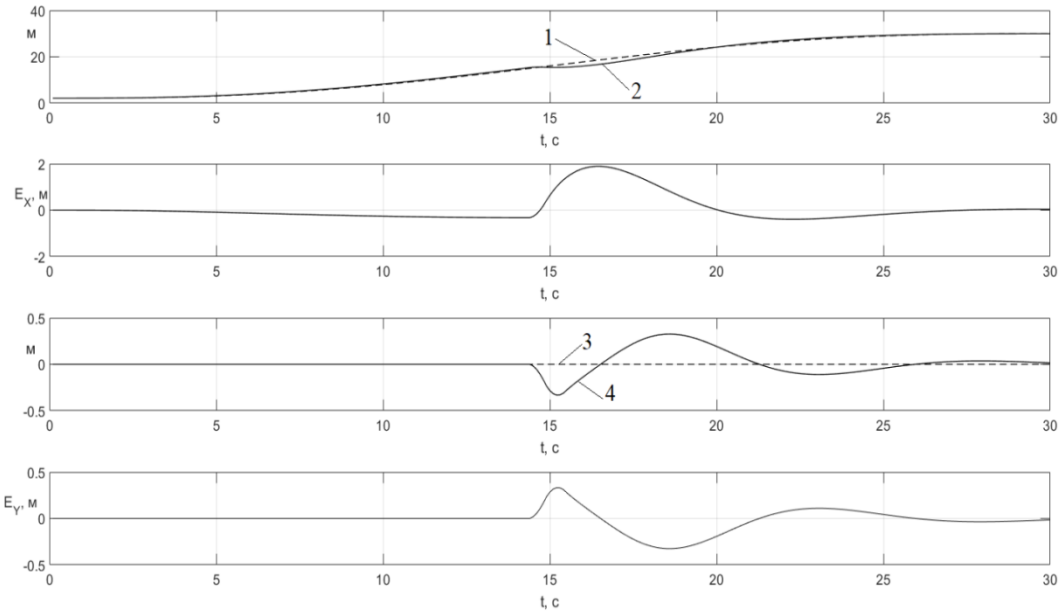

Рисунок 3.19 – Графики изменения ошибок

3.6.2 Моделирование управляемого движения БАС по прямолинейной траектории при корректирующем управлении.

Рассмотрим движение беспилотной авиационной системы при управлении по расчётной модели без корректирующего воздействия и учёта возмущающей силы $\overline{F} = \overline{F}^0$. Ниже приведены примеры реакции рассматриваемой системы на внешнее импульсное воздействие с различными параметрами. На Рисунке 3.20 приведен график возмущающей силы, действующей на беспилотный тягач при импульсном воздействии [135].

На Рисунке 3.21 показана траектория движения БАС при расчётном управлении. Очевидно, что программное управление по расчётной модели не обеспечивает устойчивость из-за наличия возмущений.

На Рисунке 3.22 показана зависимость расчётных сил F_{11} F_{12}, действующих на расчётной траектории движения БАС.

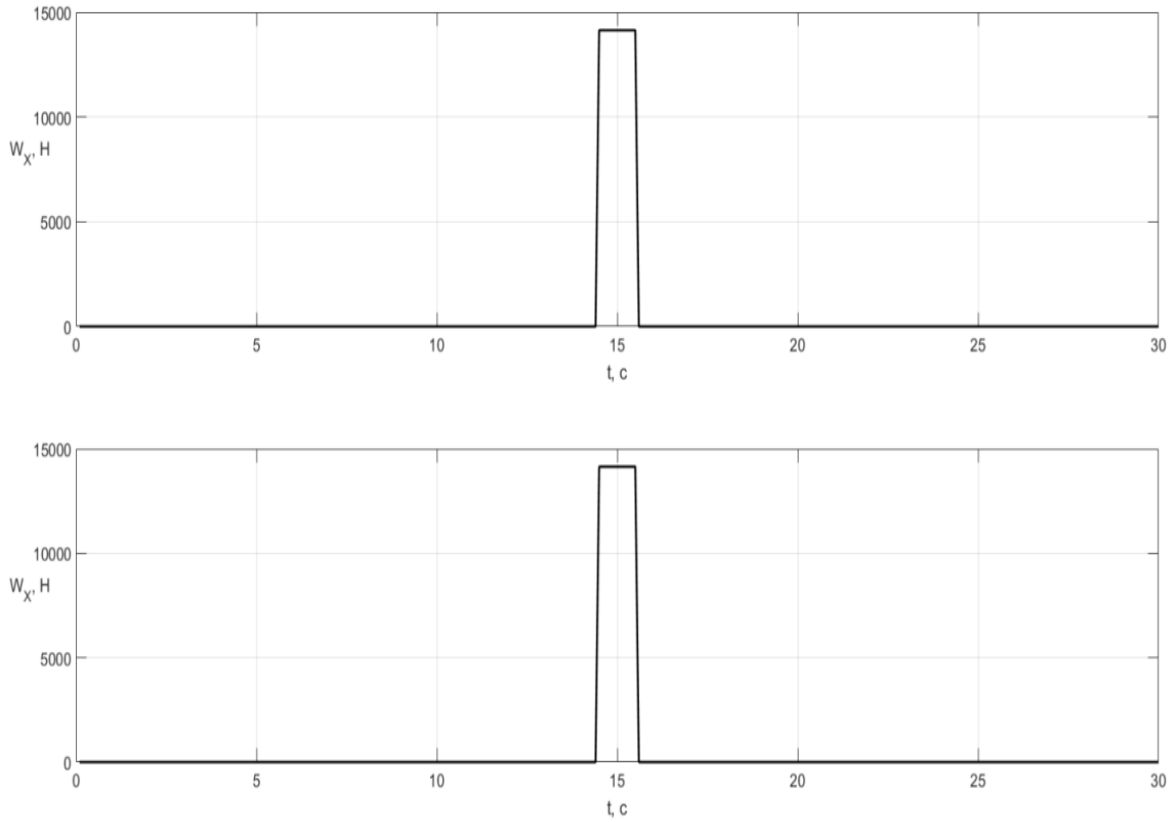

Рисунок 3.20 – Графики изменения возмущающей силы

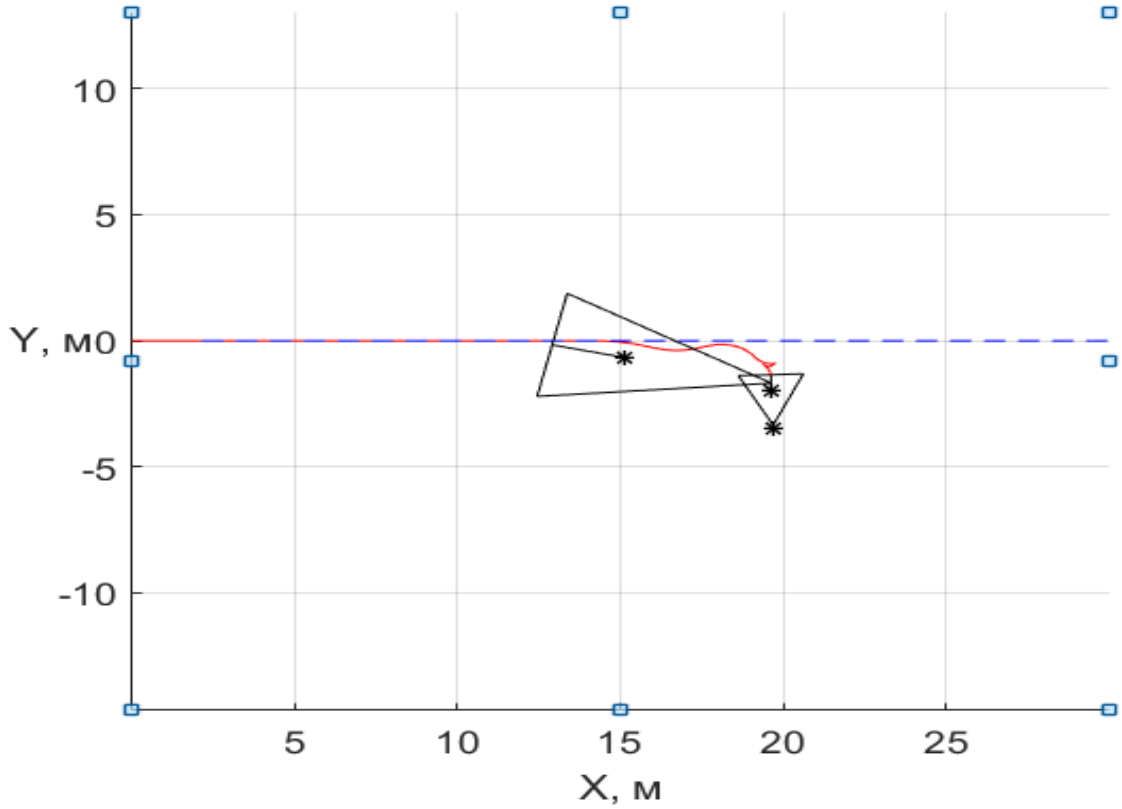

Рисунок 3.21 – Траектория движения системы при расчётном управлении без корректировки

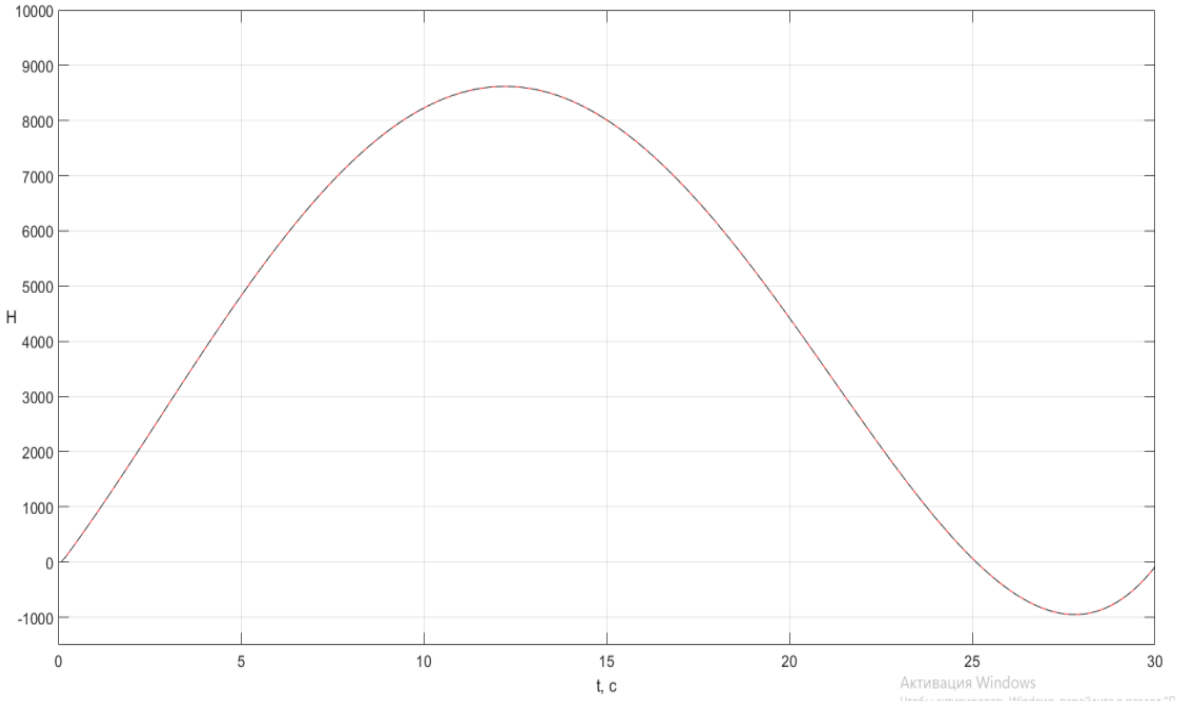

Рисунок 3.22 – Зависимость расчётных сил F_{11} F_{12} от времени

На Рисунке 3.23 представлены графики зависимости расчётного перемещения скорости и ускорения по координатам X и Y от времени при действии внешнего импульса, вид которого приведен на рис. 3.24.

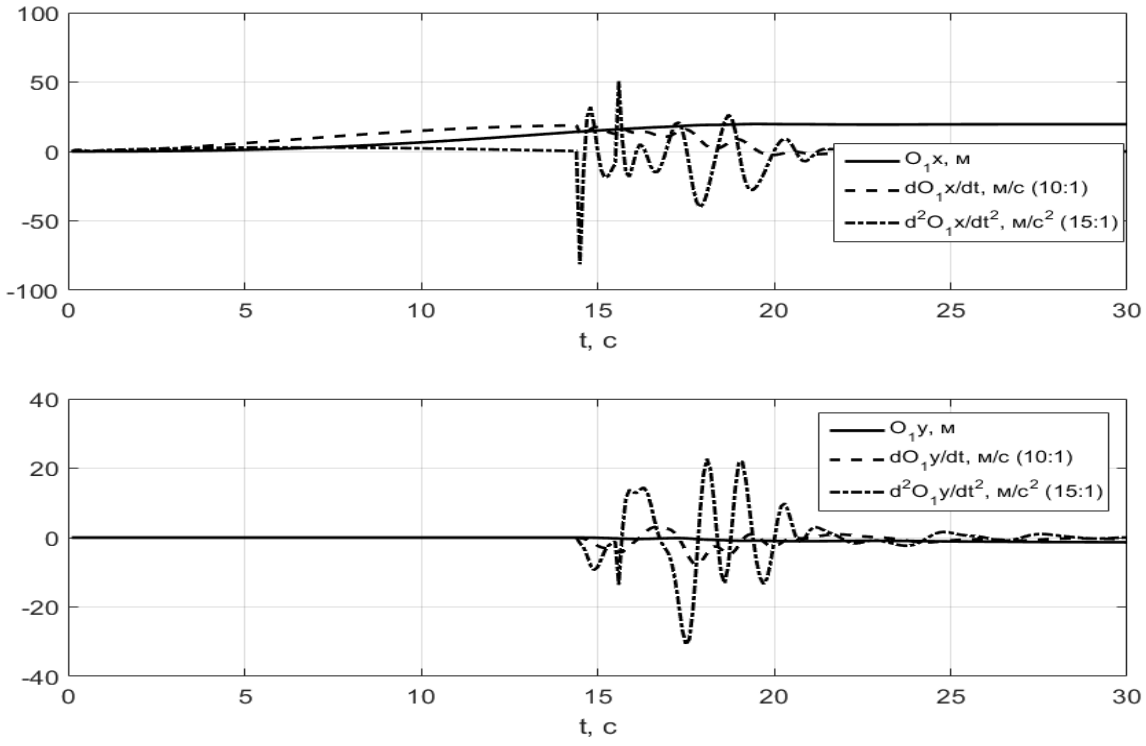

Рисунок 3.23 – Графики зависимости расчётного перемещения БТ

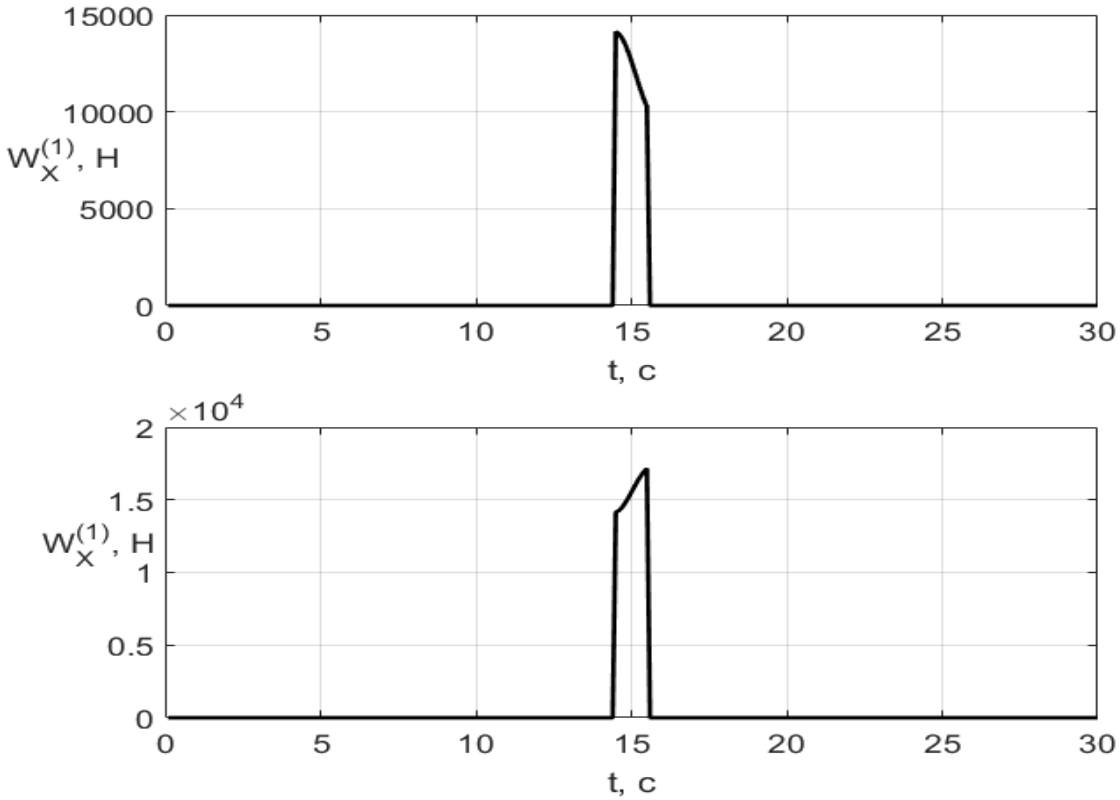

Рисунок 3.24 – Графики внешнего возмущающего импульсного воздействия по координатам X и Y от времени

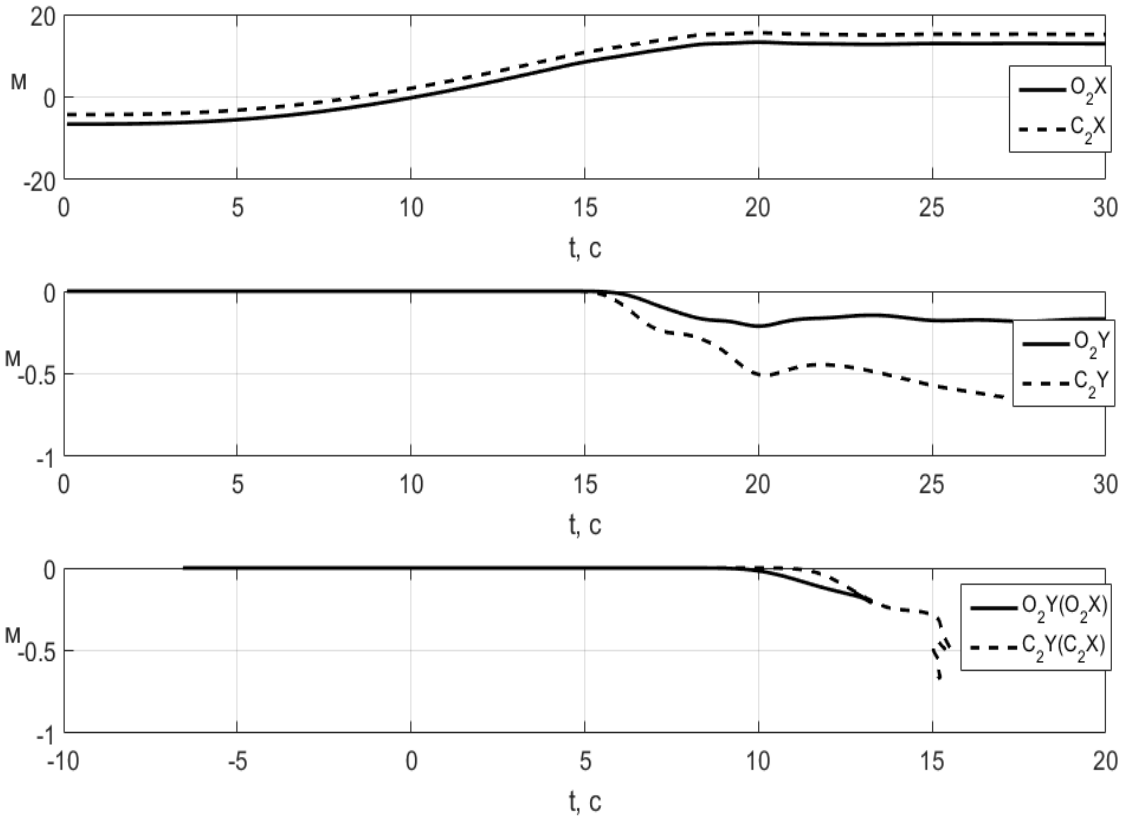

Рисунок 3.25 – Графики зависимости положения ВС по координатам X и Y от времени

Рассмотрим управление движением БАС при формировании корректирующих управляющих воздействий с учетом импульсной возмущающей силы. На Рисунке 3.26 приведена планируемая и расчётная траектория движения БТ и ВС по прямолинейному отрезку, где: 1 – траектория точки М*; 2 – траектория точки М; 3 – точка М на БТ; 4 – точка С1; 5 – точка С2.

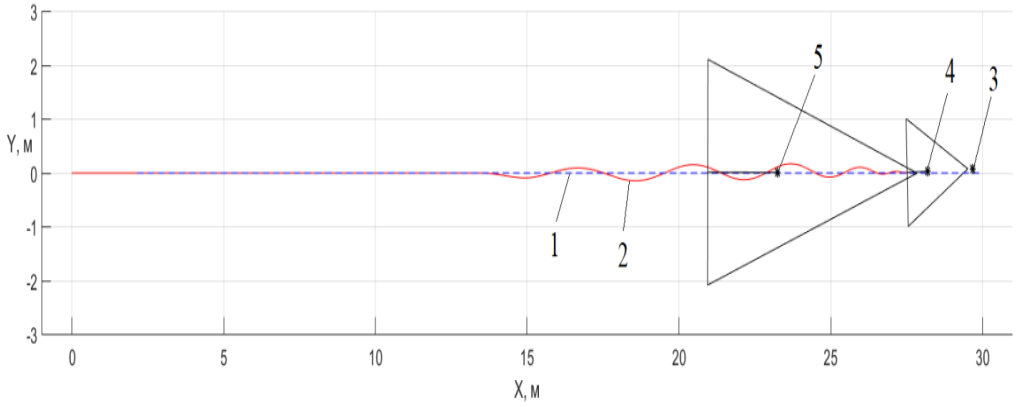

Рис.3.26 – График совместного движения БТ и ВС
при корректирующем управлении

На Рисунке 3.27 показаны диаграммы изменения управляющих сил после однократного импульсного воздействия.

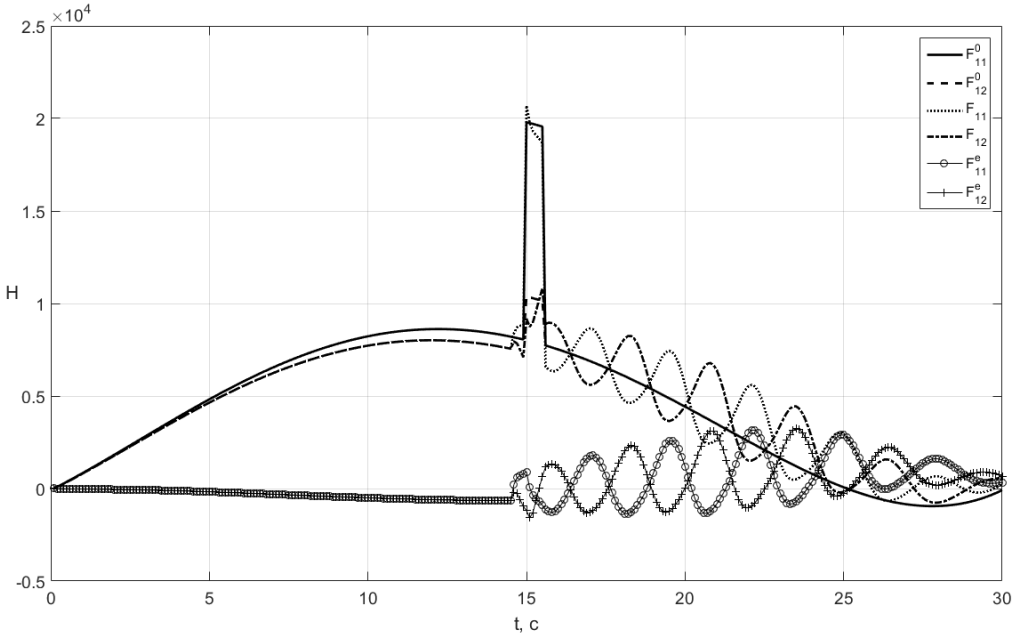

Рисунок 3.27 – Графики изменения компонентов сил F_{11}, F_{12}

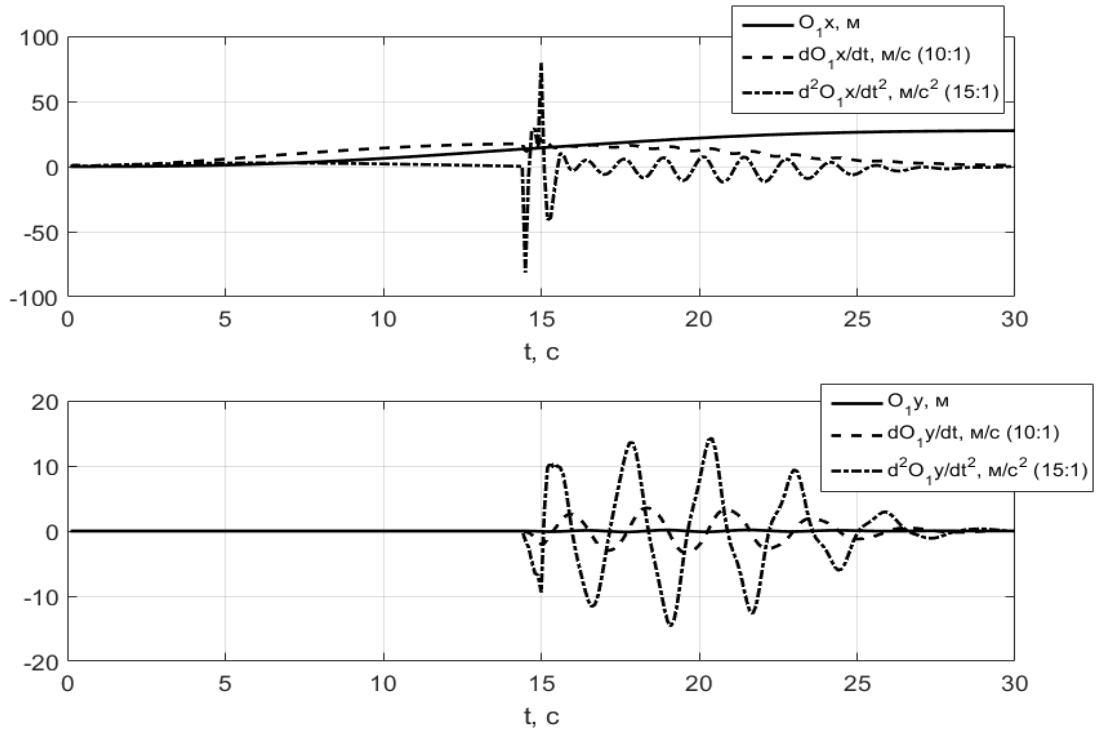

Рисунок 3.28 – Графики изменения кинематических параметров точки O_1, принадлежащей беспилотному тягачу

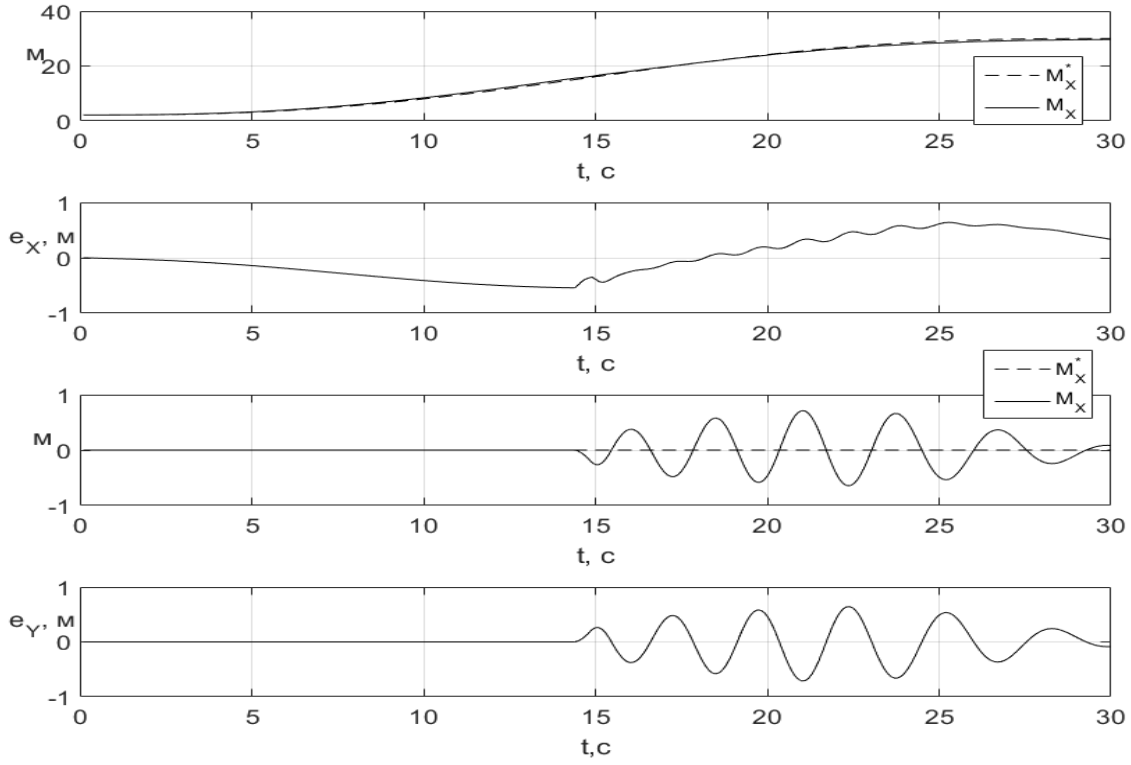

Рисунок 3.29 – Графики изменения ошибок положения БТ.

На Рисунке 3.29 приведены зависимости ошибок положения беспилотного тягача при действии импульсного воздействия. По оси OY наблюдается колебательный характер изменения ошибки. Положение БТ на траектории остается устойчивым. На Рисунке 3.30 представлены траектории движения точек O_2 и C_2, принадлежащие ВС. Анализ приведенных диаграмм показывает, что величина отклонений ВС от заданной траектории при прямолинейном движении значительно меньше отклонений БТ. Особый интерес представляет движение рассматриваемой системы при повороте траектории на 90^0. Опыт показывает, что при повороте возникают значительные отклонения ВС от расчётного положения. Такие ошибки могут приводить к столкновению ВС с инфраструктурой аэропорта и другими ВС.

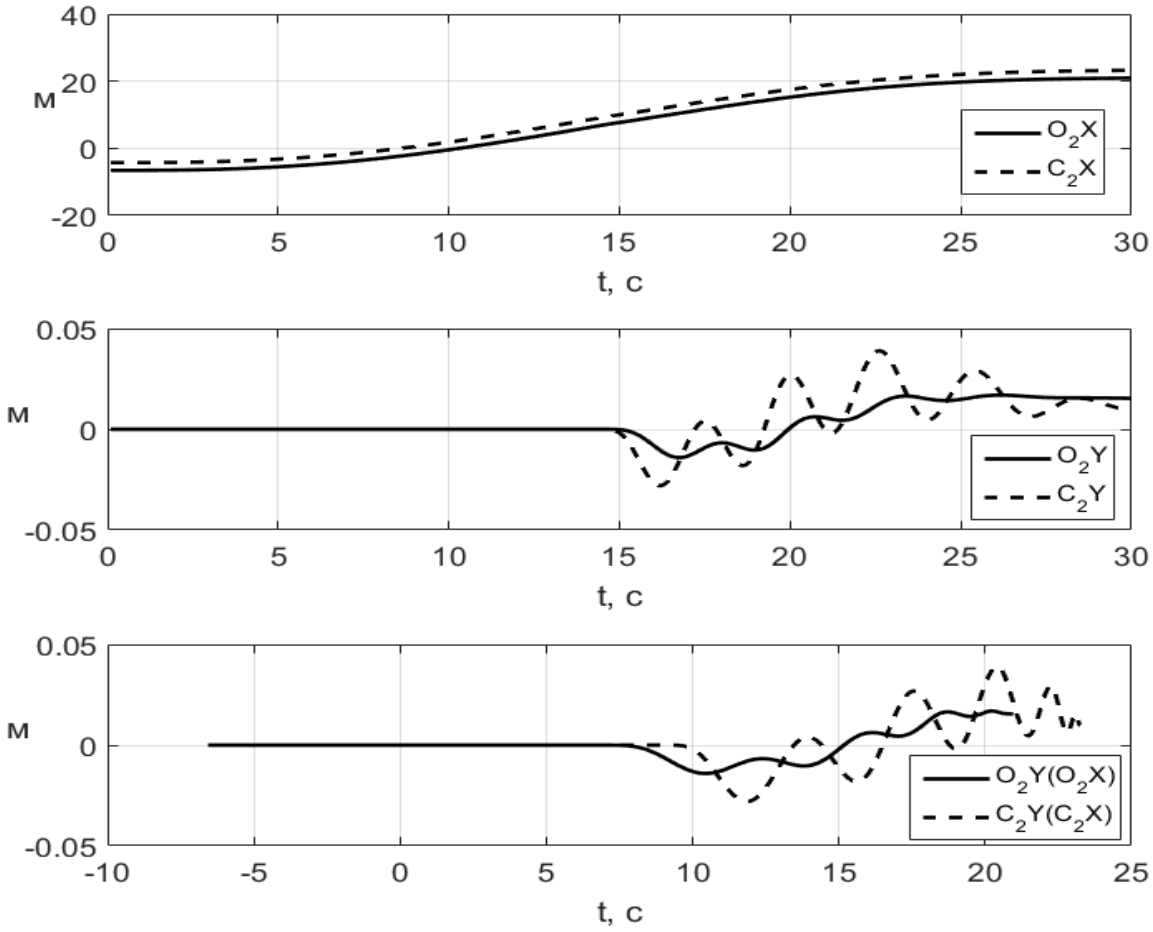

Рисунок 3.30 – Траектории движения точек O_2 и C_2, принадлежащих ВС

3.6.3 Моделирование движения БАС по кусочно-линейной траектории

На Рисунке 3.31 графически показаны результаты математического моделирования при повороте на 90^0. Представлена планируемая траектория движения БТ и траектории центра масс ВС. Оптоэлектронная микросхема (ОМ), установленная на БТ отслеживает заданную траекторию с достаточно высокой точностью, однако максимальные отклонения положения ВС наблюдаются при повороте на 90^0 и могут достигать значительных величин. На отрезке 10-15 метров отклонение ВС достигает 5 и более метров. В тоже время отклонение БТ от расчётной траектории не превышает 1 метра.

На Рисунке 3.32 показаны зависимости углов поворота БТ и ВС при прохождении расчётной траектории, а также проекции траекторий движения системы. На интервале времени 50-100 сек. Происходит поворот БТ на 90^0. Угол, определяющий допустимый интервал по углу φ_1 не превышен на всем интервале движения. Траектория состоит из трех отрезков прямой расположенных под углом 90^0. Хорошо видно, что максимальное отклонение расчётной траектории ВС и БТ наблюдается в зоне поворота.

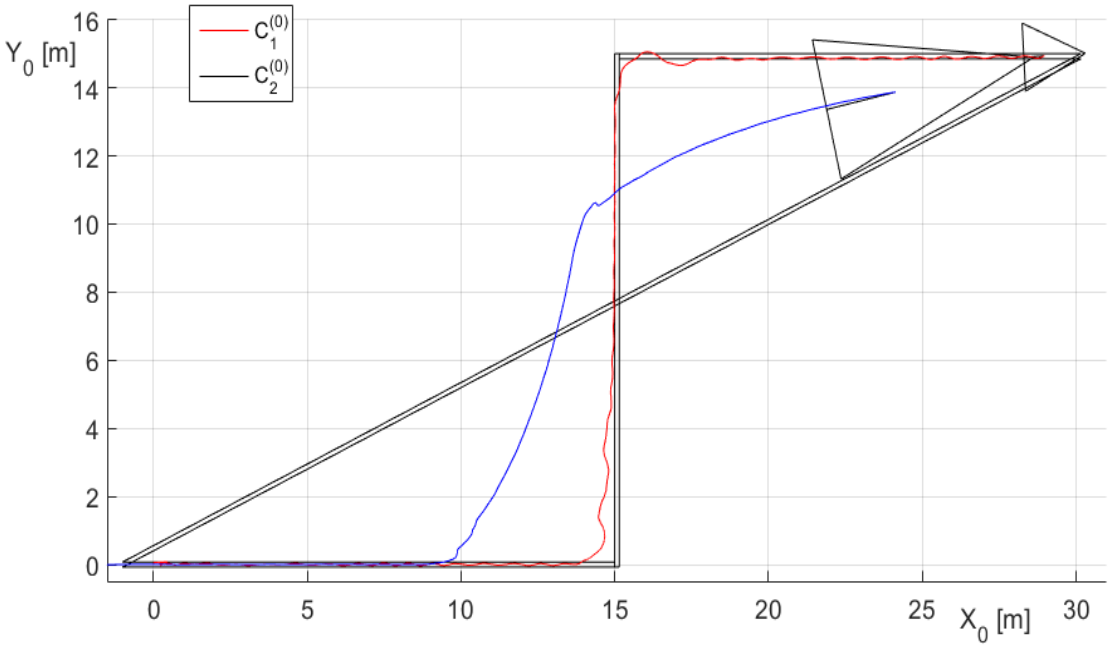

Рисунок 3.31 – Совместное управляемое движение БАС
по заданной кусочно-линейной траектории

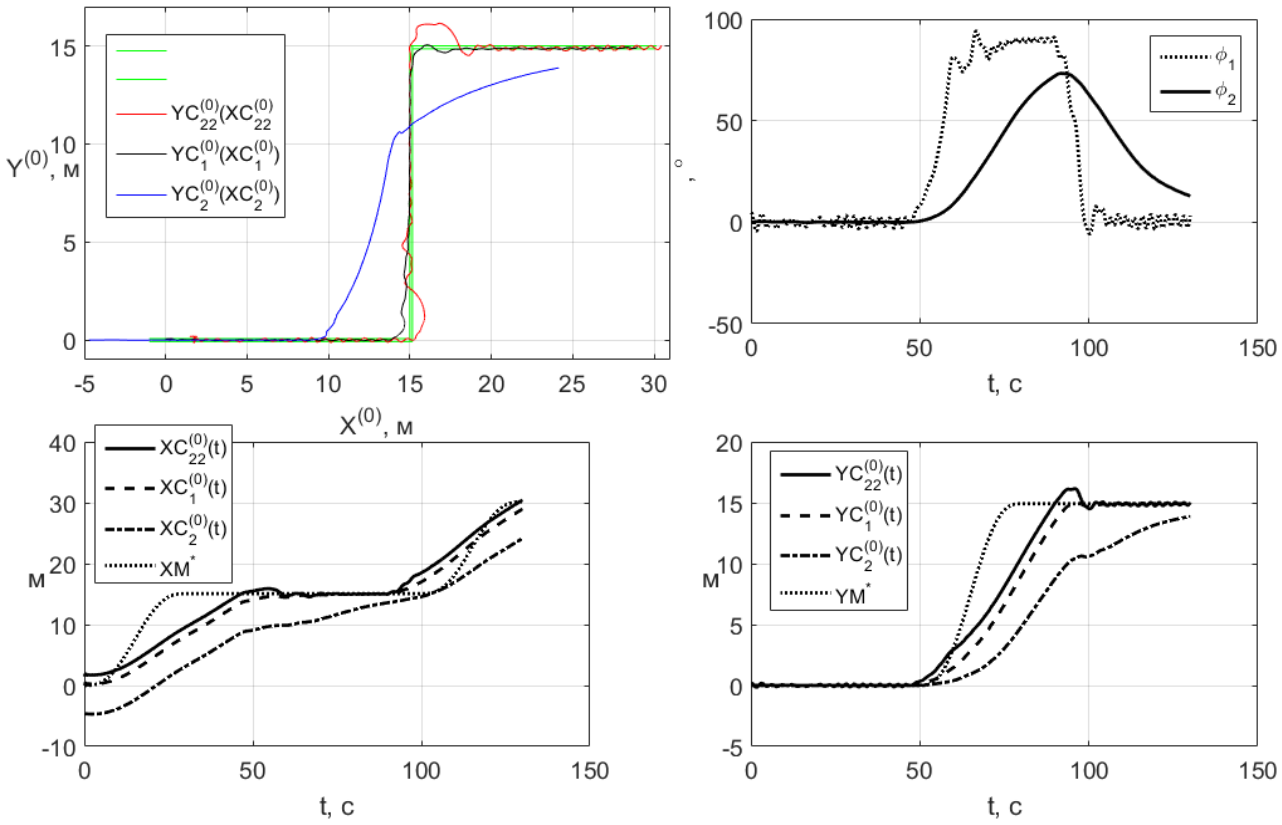

Рисунок 3.32 – Результаты моделирования совместного управляемого движения БАС.

Также при анализе результатов особое внимание уделено определению тяговых сил на БТ и силе $\overline{P}_{21} = -\overline{P}_{12}$, действующей в модуле сопряжения БТ и ВС. Максимальные значения наблюдаются в зоне поворота. В тоже время, в начальный момент времени наблюдается выход $\overline{P}_{12}$ из заданного интервала $0 < \overline{P}_{12} < 1$, что приводит к корректировке параметров адаптивного регулятора. Результаты моделирования демонстрируют, что адаптивная система управления способна совершать движение БАС с заданными характеристиками, с учетом больших значений массы и инерции не теряет устойчивость на скоростях до 1 м/с дальнейшее увеличение скорости движения приводит к критическому рассогласованию или потере устойчивости [131].

3.7 Анализ показателей качества управления беспилотной системы для различных стратегий

Полученные результаты моделирования, показали, что при осуществлении программного управления, полученного по расчётной модели беспилотного тягача неустойчивое, поэтому система становится ненаблюдаемой. В остальных случаях, при комбинированном управлении БТ, движение системы буксировки устойчивое. В связи с этим разработанный метод адаптивного управления движением БАС, обеспечивает повышение качества отработки заданной траектории по показателям точность и быстродействие.

В качестве основных учитываемых показателей управляемости БАС рассматривались среднеквадратичная ошибка (рассогласование по координатам):

$$J_e = \frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^{\mathrm{T}} e^T \mathrm{Qedt}, \tag{3.25}$$

Среднеквадратичное отклонение (управление по отклонению):

$$J_u = \frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^{\mathrm{T}} U^T N u \mathrm{dt}, \tag{3.26}$$

где $U = (U_1, U_2, U_3, U_4)^{\mathrm{t}}$ – управляющие напряжения, Q , N – положительно определенные матрицы. Интегральный показатель представим в виде:

$$J_k = \int_0^{\mathrm{T}} \alpha_1 e^T \mathrm{Qedt} + \int_0^{\mathrm{T}} \alpha_2 U^T N U \mathrm{dt}, \tag{3.27}$$

где α_1,α_2 – весовые коэффициенты. Для расчета интегрального показателя, объединяющего однородные параметры, применим формулу:

$$\mathrm{Fp} = (\ \hat{}\mathrm{e}, \hat{}\mathrm{U}/\mathrm{ai}) = a_1\hat{}\mathrm{e} + a_2\hat{}\mathrm{U}. \tag{3.28}$$

Результаты сравнения значений показателей различных стратегий управления БАС представлены в Таблицу 3.

Таблица 3. Сравнительный анализ стратегий управления БАС

Тип управления Показатели управления	Расчётная модель $\overline{U} = \overline{U}_0$	Корректирующее управление $\overline{U} = \overline{u}$	Комбинированное управление $\overline{U} = \overline{U}_0 + \overline{u}$
Среднеквадратичная ошибка $J_{e,}$ см	72,3	37,8	12,7
Среднеквадратичное отклонение $J_{u,}$ см	17,5	24,1	18,8
Интегральный показатель $J_{k,}$ см	74,1	62,0	**20,1**

Из Таблицы 3 видно, что разработанный алгоритм комбинированного управления, основанный на суперпозиции расчётного и корректирующего управлений по интегральному показателю превосходит известные алгоритмы управления, основанных на расчетной модели и корректирующем управлении в 1,5–4 раза.

3. 8 Выводы

Третья глава диссертации представляет теоретические результаты, полученные в результате исследования. Основной целью главы является разработка и описание новых методов и алгоритмов. Разработан метод управления позиционированием БАС. Разработана принципиальная схема системы управления БАС на основе распараллеливания потоков управления на расчетное управление и корректирующее воздействие. Полученный алгоритм и логика работы БУ, а также синтез многоканального регулятора системы управления БТ, в отличии от ранее имеющихся при моделирования совместного движения, демонстрируют работоспособность представленного метода управления. Разработана математическая модель и проведено моделирование управляемого движения БАС при движении в сложных условиях. Предложен интегральный показатель и выполнено сравнение различных стратегий управления.

Глава 4 Экспериментальное исследование управляемого движения беспилотной авиационной системы в различных режимах

4.1. Описание прототипа беспилотной системы

Для проверки достоверности математических моделей БТ, ВС и БАС было разработано экспериментальное оборудование имитирующее функционирование БАС в различных режимах. Сравнение теоретических и экспериментальных данных позволяет судить о возможности применения математических моделей в решении задач синтеза параметров системы управления БАС. Результаты экспериментов позволяют получить информацию о возможности прогнозирования поведения БАС на основе расчетных данных, полученных путем математического моделирования. Для практической реализации экспериментальных исследований создан прототип БАС.

Разработанный прототип беспилотной авиационной системы состоит из следующих основных подсистем:

1) прототипа беспилотного тягача;

2) прототипа воздушного судна;

3) прототипа сцепного устройства.

Прототип оснащен системой управления, которая позволяет решать задачи по управлению движением БАС в различных режимах, в том числе:

1. Движение БТ по контрастной линии.

2. Режим идентификации и поиска передней стойки ВС;

3. Режим стыковки БТ с передней стойкой ВС.

4. Совместное движение БТ и ВС по расчётной траектории.

Параметры разработанного беспилотного тягача приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 Параметры мотор – редуктора постоянного тока «IG-90GM»

Показатель	Диапазон
Питающее напряжение, В	4-24
Передаточное число редуктора	5
Обороты вала на выходе, об/мин	510
Момент на выходе в режиме короткого замыкания, Н·м	1,176
Потребляемый ток, А	4,2
Потребляемая мощность, Вт	105
Сопротивление обмотки, находящейся на якоре, Ом	1

На Рисунке 4.1 представлена схема контроля параметров БТ. Здесь приняты следующие обозначения: *Эд₁, Эд₂* – электродвигатели платформы; *Энк₁, Энк₂* – энкодеры, позволяют определить положение ведущих колёс БТ (φ_1 и φ_2); Ф – при обработке сигналов применяется фильтр. Отфильтрованные значения (φ_{11} и φ_{22}) попадают в блок дифференцирования, благодаря которому можно получить значения угловой скорости приводов (ω_{11} и ω_{22}); $Д_р$ – двухканальный драйвер *Pololudualvnh 5019*, оснащённый датчиками тока, который используется для измерения моментов (M_{11} и M_{22}), возникающих на двигателях;

Блок обработки информации (БОИ) включает блок управления (БУ), который состоит из драйвера двигателей, бортового вычислителя на базе *ATmega328*, обрабатывающего информацию, поступающую с оптоэлектронной интегральной микросхемы (*Кам₁*), IMU – модуля (*IMU₁*), *Эд₁, Эд₂* – приводные электрические двигатели; *Энк₁, Энк₂* – энкодеры; *Ф* - фильтр; *Др* – двухканальный драйвер (*Pololudualvnh 5019*); *БУ* – блок управления; *IMU* – модуль; *Кам₁* – камера системы технического зрения (СТЗ) *Raspberry Pi Camera v 2 No IR*. Данные об угловой скорости и моментах колёс платформы, поступающие с сопроцессорного

модуля управления приводами. Оптоэлектронная интегральная микросхема предназначена для измерения отклонения платформы от контрастной линии. Измерение отклонения производится по алгоритму, приведенному в главе 3.

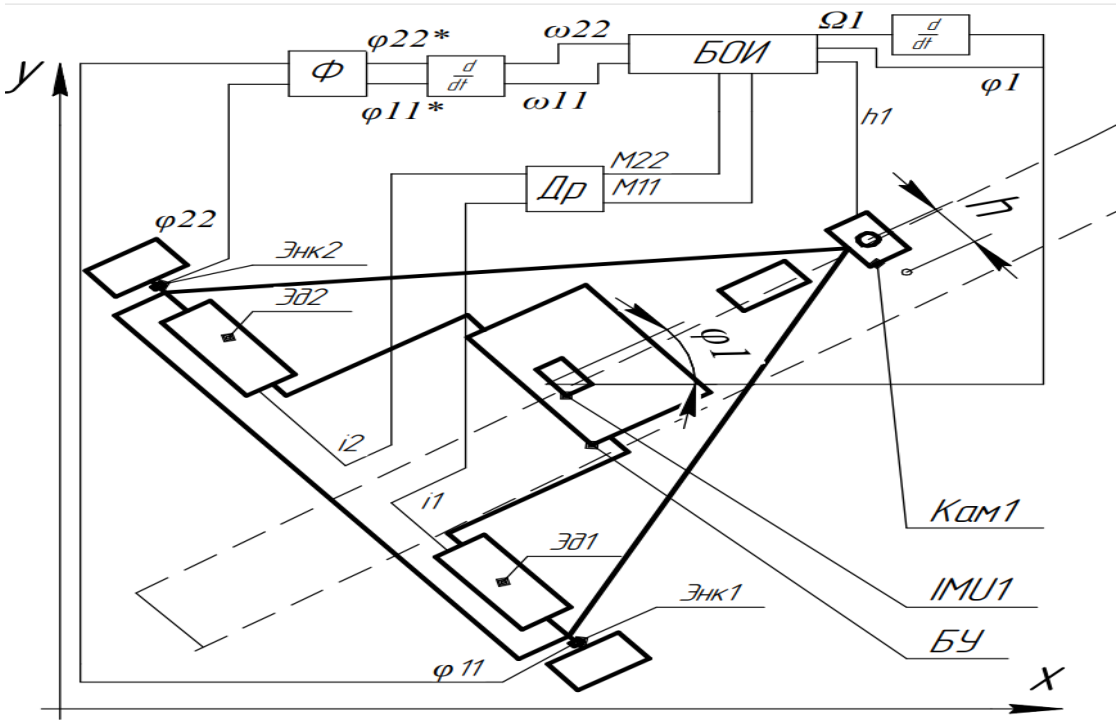

Рисунок 4.1 – Схема информационной системы БТ [6]

Для повышения точности системы контроля за положением беспилотного тягача относительно контрастной линии применяется камера системы технического зрения (СТЗ) *Raspberry Pi Camera v2 No IR*, также предназначенная для контроля отклонения платформы тягача от контрастной линии. Видеопоток, поступающий с камеры, обрабатывается бортовым вычислителем. Данные фильтруются с помощью цветового фильтра, окрашивающего все цвета пикселей, не относящихся к цвету контрастной линии, в чёрный, а цвета контрастной линии – в белый. Анализируя полученное цветовое пятно, алгоритмы СТЗ вычисляют геометрический центр контрастной линии и сравнивают его с созданной виртуальной точкой в центре кадра. На основании разницы между этими точками (h) формируется ошибка- отклонение реального положения БТ относительно

заданного оператором. IMU_1 – сенсор, контролирующий 10 степеней свободы, предназначенный для измерения угла рыскания платформы БТ [137].

На данной схеме БОИ реализован на одноплатном компьютере *Raspberry Pi 4,* который объединён с сопроцессорным модулем управления приводами на базе *Atmega 328*. Задача этого модуля состоит в обработке информации, поступающей с различных датчиков и передача этих данных на пульт управления оператору. В момент выполнения заданий беспилотный тягач полностью автономен. Для осуществления процесса транспортировки ВС было спроектировано и изготовлено захватное устройство, представляющее собой однокоординатный манипулятор, позволяющий осуществить захват передней стойки. Особенностью данного манипулятора является то, что он установлен на измерительной платформе, позволяющей контролировать усилие, возникающее между БТ и ВС.

Основной задачей экспериментальных исследований является измерение параметров БАС, определяющих управляемое движение БТ и ВС в различных режимах. Полученная информация в виде соответствующих диаграмм и графиков, позволяет сделать сравнительную оценку разработанной математической модели (модуля сопряжения СУ и ВС, реальному прототипу беспилотной авиационной системы буксировки), а также провести проверку возможности практической реализации предложенного метода комбинированного управления, включающего управляющий сигнал, полученный по расчетной модели.

Для контроля взаимодействия подсистем ВС и БТ измерительная система дополнена сило–моментным измерителем, установленным таким образом, что при захвате передней стойки осуществляется измерение силы P_{12}. Беспилотный тягач также комплектуется трехкоординатным датчиком силы (*ДС*), устанавливаемым на схвате БТ. Применение трехкоординатного датчика силы позволяет в динамическом режиме контролировать силу, возникающую в результате взаимодействия подсистем БТ и ВС.

Для оценки математической модели БАС реальному объекту применяется интегральный показатель L :

$$L_r = \frac{1}{T}\int_0^T \bar{\delta}_r{}^T Q \bar{\delta}_r dt \quad , \tag{4.1}$$

где Q – матрица весовых коэффициентов. Отклонение экспериментального положения БТ от расчетного:

$$\bar{\delta}_r = \bar{r}_{C1}^{Э} - \bar{r}_{C1}^{M} \quad , \tag{4.2}$$

$\bar{r}_{C1}^{Э}, \bar{r}_{C1}^{M}$ – радиус–векторы, определяющие положение точки C_1 в расчетах и эксперименте.

Кроме этого, проводилась оценка отклонения скорости центра беспилотного тягача от расчетной по показателю:

$$L_V = \frac{1}{T}\int_0^T \bar{\delta}_V{}^T Q \bar{\delta}_V dt \quad , \tag{4.3}$$

$$\bar{\delta}_v = \bar{V}_{C1}^{Э} - \bar{V}_{C1}^{M} \quad . \tag{4.4}$$

Экспериментальная скорость центра беспилотного тягача:

$$\bar{V}_{C1}^{Э} = (\bar{V}_{C1x}^{Э}, \bar{V}_{C1y}^{Э})^T \quad . \tag{4.5}$$

Расчетная скорость центра беспилотного тягача:

$$\bar{V}_{C1}^{M} = (\bar{V}_{C1x}^{M}, \bar{V}_{C1y}^{M})^T \quad . \tag{4.6}$$

4.2 Методика определения кинематических и силовых параметров БАС.

Разработанная методика включает проведение экспериментальных исследований созданного образца БАС имеющего два ведущих колеса. В ходе проведения исследований осуществлялся контроль значений скорости полюса БТ ($V_Э$) и угловой скорости его платформы ($\Omega_Э$). После чего полученные на основе математической модели результаты сравнивались (V, Ω). Применяя данный способ возможно достоверно оценить полученные результаты реального движения БАС с

результатами полученными расчетным путем. Значения $V_Э$ и $\Omega_Э$ определяются по выражениям:

$$V_{D1}^{Э} = \frac{r}{2}(\dot{\varphi}_{1_Э} + \dot{\varphi}_{2_Э}),$$
$$\Omega_Э = \frac{r}{2l}(\dot{\varphi}_{1_Э} - \dot{\varphi}_{2_Э}), \quad (4.6.1)$$

где $\dot{\varphi}_{1_Э}, \dot{\varphi}_{2_Э}$ – результаты проведенных экспериментальных исследований;

r – радиус ведущих колес беспилотного тягача.

Для определения $\overline{V}_{C1}^{Э} = (\overline{V}_{C1x}^{Э}, \overline{V}_{C1y}^{Э})^T$ применяется формула:

$$\overline{V}_{C1}^{Э} = \overline{V}_{D1}^{Э} + \overline{D}_1\overline{C}_1 \times \overline{\Omega}_Э, \quad (4.6.2)$$

Далее предполагается, что движение БТ осуществляется по сухой и ровной поверхности, то есть без проскальзывания колес. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что максимальная погрешность не превышает 1%. При этом значения $V_{Э1}$ и $V_Э$ соответствуют величине погрешности и определяются по выражению:

$$V_{Э_1} - V_Э = 0{,}002\left|V_{Э_1}\right| + 0{,}01V_Э, \quad (4.6.3)$$

Кроме контроля кинематических параметров, осуществлялось измерение моментов, генерируемых приводами ведущих колес, для этого применялись датчики тока, а моменты рассчитывались по формулам:

$$M_{11} = C_M i_1$$
$$M_{22} = C_M i_2. \quad (4.7)$$

где $C_м$ – постоянная электродвигателей.

Также измерительная платформа манипулятора сцепного устройства обеспечивает контроль силы P_{12}.

4.3 Метод позиционирования беспилотного тягача

Разработанная система управления движением беспилотного тягача при осуществлении буксировки будет функционировать следующим образом.

Имеющийся на платформе микроконтроллер тестирует оптодатчики микросхемы и постоянно запрашивает их. После чего выполняется расчет значения двух отклонений Δ_1, Δ_2 . Сравнительные испытания визуальной систем контроля положения БТ на контрастной линии на основе ОМ и СТЗ, показали, что в случае утери БТ контрастной линии система управления инициирует подпрограмму **«Поиск контрастного объекта»** Рисунок 4.2.

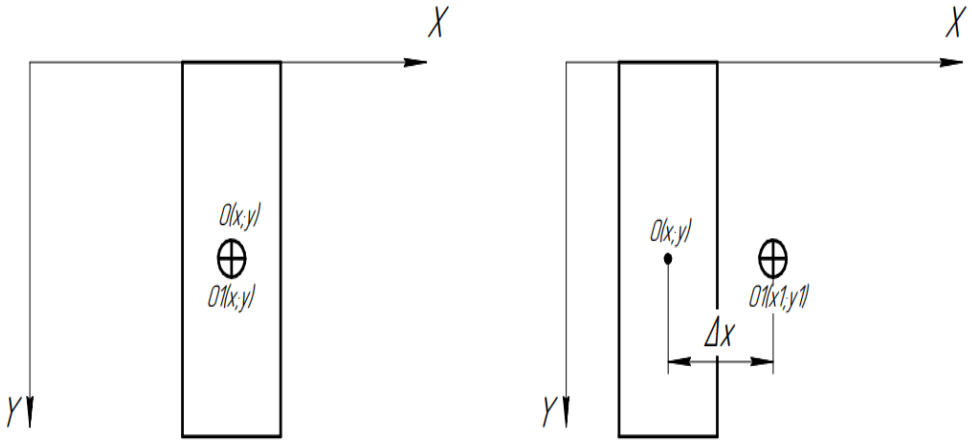

Рисунок 4.2 – Графическая схема формирования ошибки СУ [6]

Также перспективным решением является добавление сопроцессорных модулей, предназначенных для обработки данных с датчиков очувствления и управления приводами буксировщика. Такой подход позволяет снизить нагрузку на одноплатный компьютер, установленный в качестве блока управления, и повысить скорость работы системы управления приводами БТ, поскольку управляющий сигнал, программно-генерируемый одноплатным компьютером, занимает больше процессорного времени, по сравнению с аналогичным аппаратным ШИМ, генерируемым сопроцессорным модулем. Одноплатному компьютеру отведена роль обработчика поступающих с датчиков ОМ и камер СТЗ сигналов, а также роль «командного центра» прототипа беспилотного тягача, который будет принимать данные от сопроцессорного модуля обработки датчиков очувствления и отправлять команды об изменении характера движения на сопроцессорный модуль управления приводами посредством соединения с помощью *UART* интерфейса.

Следует отметить, что в разработанном прототипе БТ используются сопрягаемые порты и таймеры, которые соединяются с микроконтроллером.

Ключевым алгоритмом данной системы управления является алгоритм анализа изображений, блок-схема которого изображена на Рисунке 4.3. Входными данными являются три двумерных массива, характеризующих значения цветов пикселей изображения в трех каналах: красный(*R*), зелёный(*G*) и синий(*B*) и заданный диапазон значений искомого цвета, необходимый для компенсации влияния света на исследуемый объект. При накладывании этих массивов друг на друга образуется привычное человеческому глазу цветное изображение. Так как целью алгоритма является поиск контрастного объекта в кадре, наличие трех каналов, содержащих значение пикселей разной интенсивности, приведут к некорректной работе алгоритма, поэтому следует перейти к одноканальному изображению. Для получения характеристики значения цвета, его насыщенности и яркости предлагается перейти к цветовому пространству *HSV* (англ. *Hue, Saturation, Value* – тон, насыщенность, значение(яркость)). Наглядное представление *HSV* пространства в конической системе координат представлено на рис. 4.8. После перехода в *HSV* пространство начинается процесс попиксельной бинаризации изображения. В этом случае, если значение пикселя входит в заданный диапазон, цвет пикселя меняется на – белый, в противном же на – чёрный. Для снижения вероятности ложного срабатывания вводится пороговое значение числа белых пикселей в кадре. В случае превышения данного значения делается вывод о наличии контрастного объекта в кадре и производится вычисление моментов изображения [139, 140].

Момент изображения – это сумма всех пикселей, составляющих это изображение. Так как положение каждого пикселя определяется двумя координатами *x* и *y*, необходимо использовать формулу для поиска момента изображения второго порядка.

Формула определения момента $p+q$ изображения представлена ниже:

$$Mpq = \sum_X \sum_Y |x - A1|^p |y - A2|^q P(x,y) \quad (4.8)$$

P(x,y) – оцифрованное изображение; *A1* и *A2* – точки, относительно которых считается момент.

Момент изображения нулевого порядка характеризует площадь контрастного объекта.

$$M00 = \sum_X \sum_Y P(x,y) \quad (4.9)$$

Сумма всех пикселей по оси *x* и по оси *y* характеризуется моментом первого порядка.

$$M10 = \sum_X \sum_Y |x - A1|^1 P(x,y)$$ – для координаты X (4.10)

$$M01 = \sum_X \sum_Y |y - A2|^1 P(x,y)$$ – для координаты Y (4.11)

С помощью приведенных выше формул можно получить координаты центра тяжести исследуемого изображения. Они будут равны:

$$x_0 = \frac{M_{10}}{M_{00}}; y_0 = \frac{M_{01}}{M_{00}}, \quad (4.12)$$

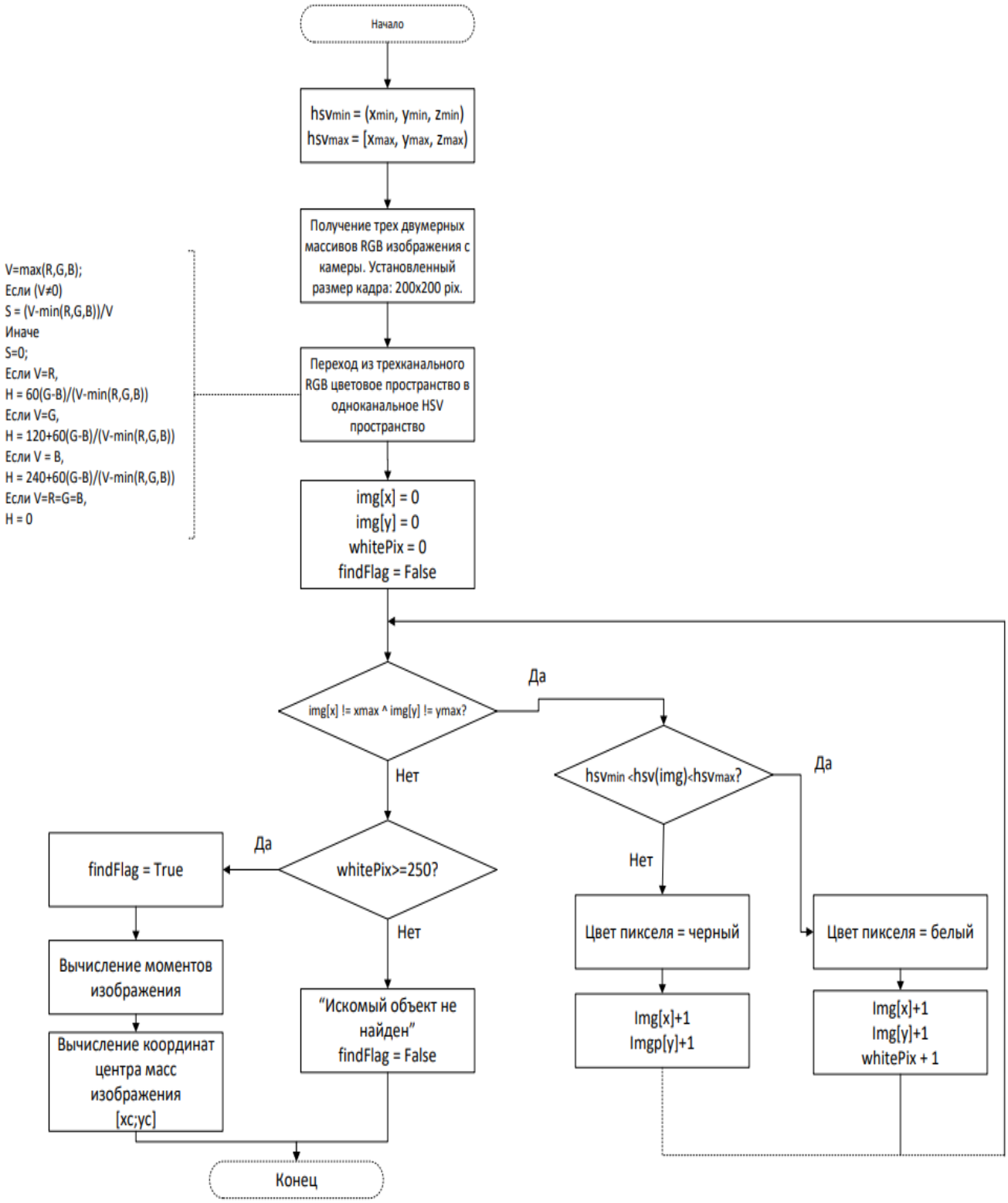

Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма анализа изображений СТЗ

Проведенная серия экспериментов позволила осуществить сравнение используемого алгоритма распознавания контрастной линии на основе оптоэлектронной интегральной микросхемы [141–143].

4.4 Сравнительный анализ определения точности отклонений

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее точно удается определить фактическое отклонение при применении аддитивного сигнала. Погрешность определения составила 9,6% для скорости 3 м/с. Для скорости 1 м/с - погрешность определения составила 1,85%. Результаты исследования представлены в Таблице 4.2

Таблица 4.2 – Полученные результаты проведенных исследований

Скорость БТ, м/с Отклонение, см	1 м/с	2 м/с	3 м/с
СТЗ	1.13	1.25	1.45
Оптронная матрица	1.15	1.3	1.5
Аддитивный сигнал	**1.1**	**1.22**	**1.27**
Фактическое отклонение	1.18	1.27	1.35

Результаты проведенных экспериментальных исследований демонстрируют, что система способна совершать заданное управляемое движение при применении комбинированного алгоритма управления. При данном способе контроля траектория БТ и ВС близка к заданной оператором, а рассогласование реального положения от заданного остается в пределах допустимой погрешности.

4.5 Результаты экспериментальных исследований управляемого движения БАС

При проведении экспериментальных исследований и измерении динамических характеристик БАС удалось оценить и сопоставить полученные результаты с теоретическими модельными расчетами для выявления существенных свойств и закономерностей процесса управления. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что созданная математическая модель соответствует реальному объекту.

На Рисунке 4.4 приведены зависимости заданных и реальных координат при возмущенном движении БТ и ВС. На временном интервале в 30 секунд происходит перемещение на расстояние 30 м, причем в начальный и конечный моменты времени скорости БТ равны нулю. В момент времени *t=15* секунд на БТ действует поперечный и продольный импульсы внешнего возмущающего воздействия, реакция БТ на эти воздействия видна на второй и третьей диаграммах рисунка 4.5. Появляется поперечное смещение БТ, а также отклонение БТ по продольной координате. На Рисунке 4.6 показаны диаграммы изменения скоростей БТ и ВС на интервале *t=0-120* секунд.

Особое внимание при проведении экспериментальных исследований уделено контролю тяговых сил создаваемых электроприводами ведущих колес F_{11}, F_{12}. А также, силам трения: T_{BRr}, T_{DRl} , PT_{BRr}, PT_{DRl} и силам взаимодействия подсистем P_{12}, P_{21}.

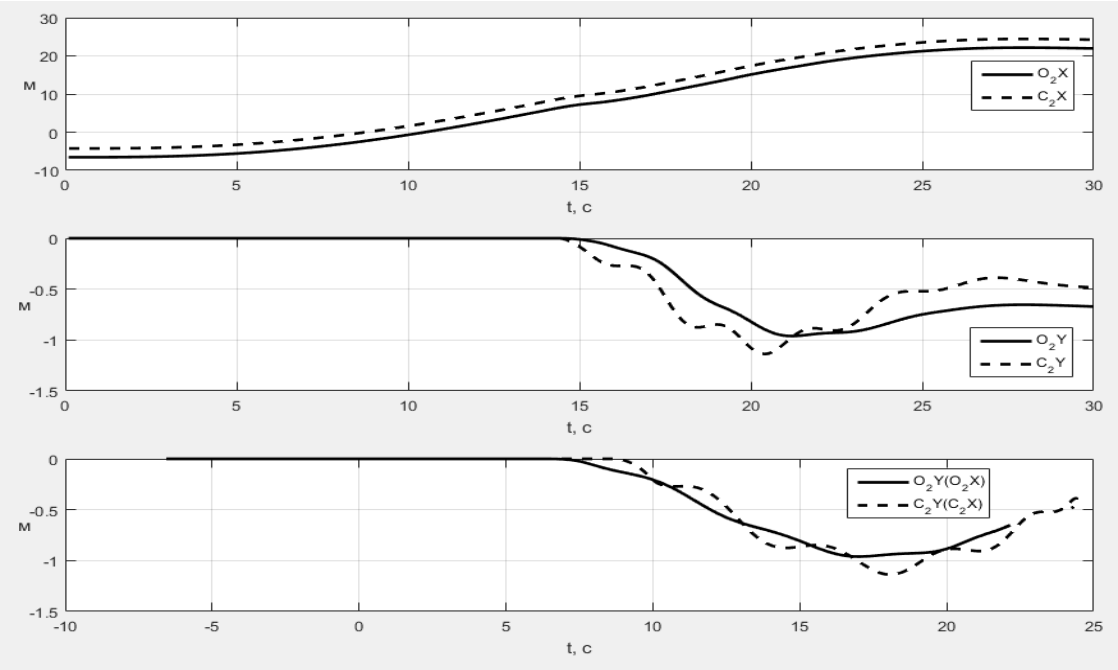

Рисунок 4.4 – Зависимость заданных и реальных координат БТ при возмущенном движении

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает устойчивый режим движения БАС по траектории при совместном управлении по расчётной модели и корректирующему сигналу.

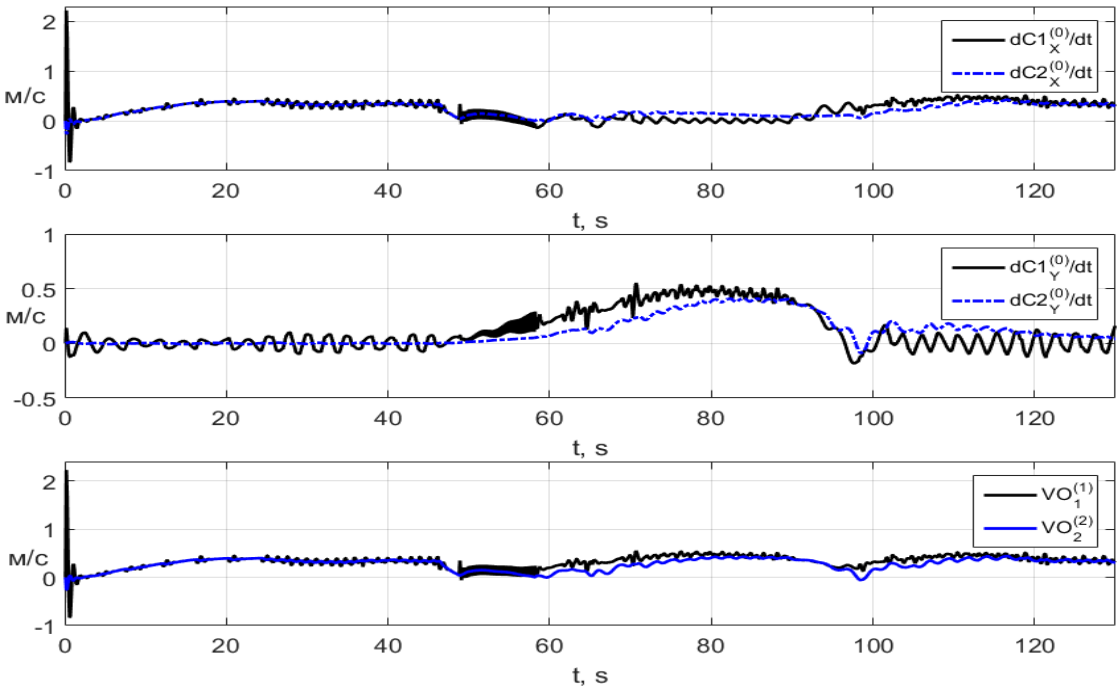

Рисунок 4.5 – Графики изменения скоростей БТ и ВС

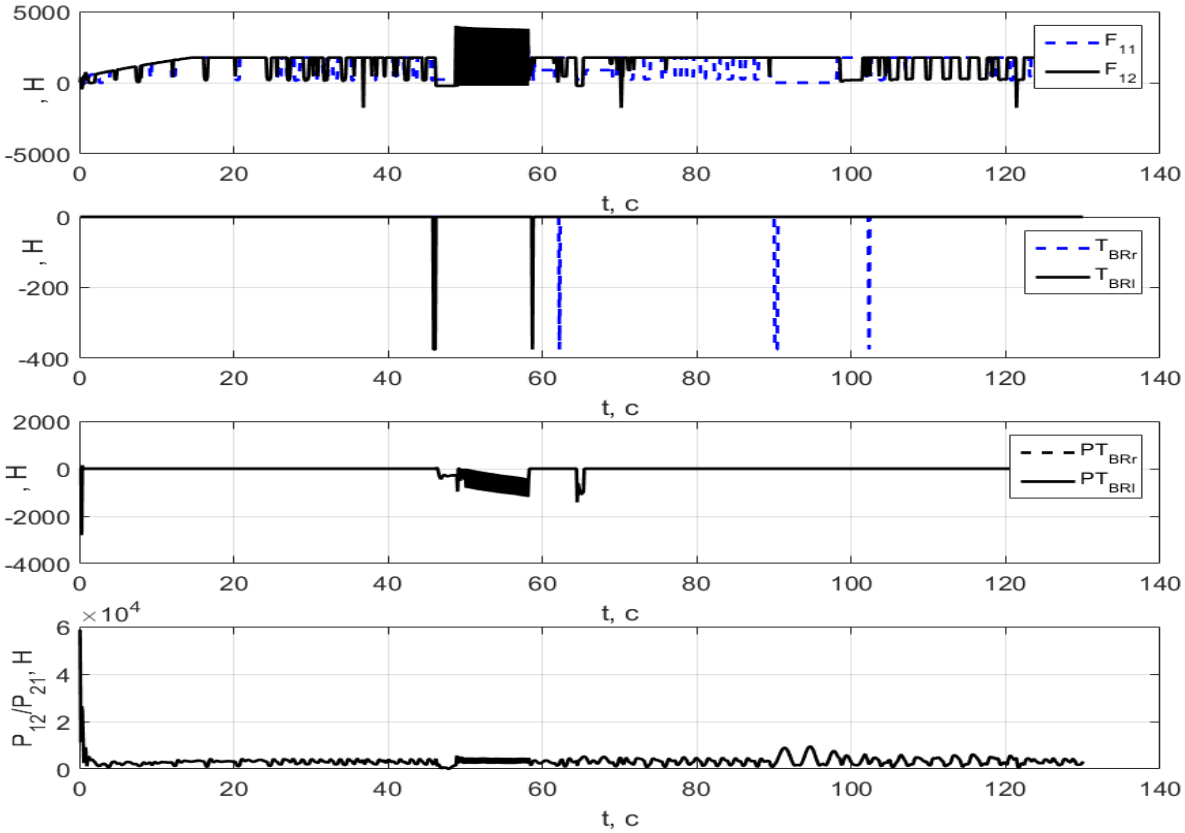

Рисунок 4.6 – Результаты исследования совместного управляемого движения БАС

Сравнение с расчетными теоретическими графиками показывает удовлетворительную сходимость.

4.6 Стыковка беспилотного тягача и воздушного судна

Рассмотрим ситуацию стыковки БТ с ВС, изображенную на Рисунке 4.7 Условное изображение БТ, который подъезжает к передней стойке самолета (5) для сцепки. Ведущие колеса тягача (1) имеют некие угловые скорости ω_{21} и ω_{22}. Колесо, обозначенное цифрой (2) – ролевое и является пассивным. Также, мы можем наблюдать центр масс робота C_2, а также направление его движения V_C.

Модуль сопряжения оснащен парой лазерных дальномеров (4). Они измеряют расстояние до переднего колеса, которое условно помечено буквами a и b. Расстояние рассчитывается исходя из размеров шасси воздушного средства.

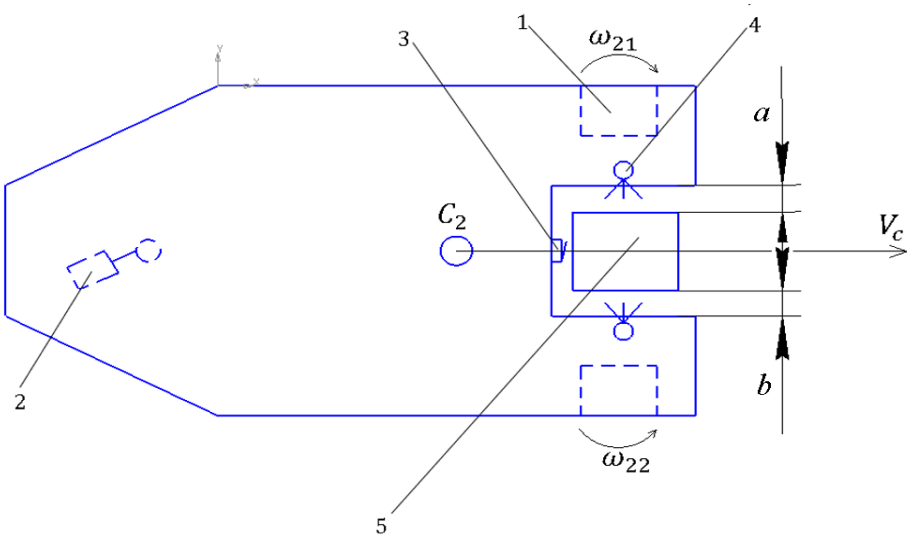

Рисунок 4.7 – Стыковка БТ с передней стойкой ВС

Также в корпусе беспилотного тягача располагается специальный концевой выключатель (3), который срабатывает, когда БТ соприкасается с колесом ВС. Этот сигнал сообщает в БУ, что БТ достиг нужной точки.

Рассмотренная ситуация, обеспечивающая эффективную работу сцепного устройства, предполагает, что ведущие колеса робота и переднее колесо самолета будут находятся на одной оси. Однако, в реальности БТ всегда подъезжает к переднему колесу под определенным углом.

Рассмотрим схему стыковки БТ и ВС при подходе к стойке под некоторым углом Рисунок 4.8. Для определения положения корпуса БТ установлены дополнительные датчики (6), позволяющие оценить положение БТ относительно контрастной линии при движении тягача задним ходом. Анализ информации, считываемой этими датчиками позволяет видеть несколько ситуаций. Можно рассмотреть несколько положений, которые необходимо проанализировать.

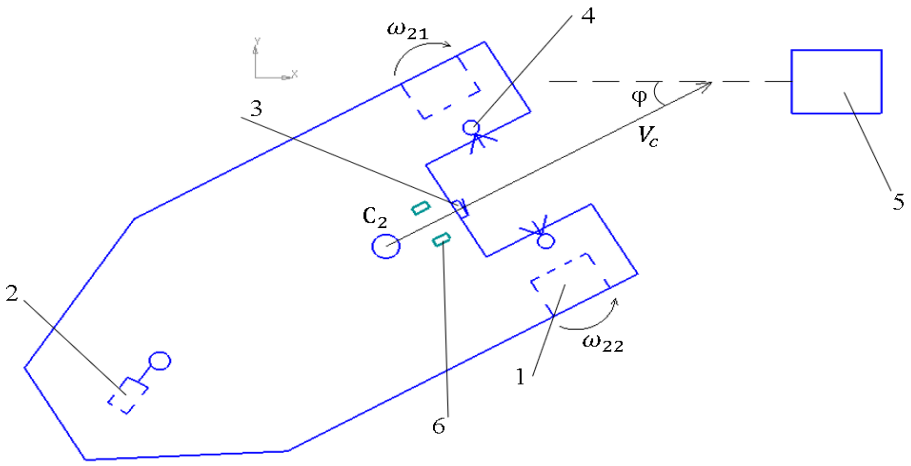

Рисунок 4.8 Стыковка БТ и ВС при подходе
к стойке под углом

1) Левый датчик также, как и правый над светлой поверхностью. Движение БТ происходит по прямой в сторону контрастной линии.

2) Левый датчик над светлой поверхностью, правый датчик над темной. Пересечение контрастной линии с правой стороны, остановка БТ, определение угла с помощью *IMU* модуля. Разворот БТ на необходимый угол и движение по прямой соосной с передним колесом.

3) Левый датчик над темной поверхностью, правый датчик над светлой. Пересечение контрастной линии с левой стороны, остановка БТ, определение угла с помощью *IMU* модуля. Разворот БТ на определенный угол и движение по прямой соосной с передним колесом.

Эксперимент показывает, что алгоритм поиска переднего колеса ВС обеспечивает стыковку беспилотного тягача и воздушного судна.

4.7 Выводы

Был создан экспериментальный прототип беспилотной авиационной системы, оснащенный СУ и осуществляющий движение беспилотным тягачом, реализующий созданный метод управления движением. Выполнено исследование управляемого движения БАС в различных режимах.

Основными задачами, решаемыми системой управления, являются: определение собственных координат БАС, обработка данных о маршруте, построение траекторий движения, позиционирование относительно ВС (два режима движения), обеспечение совместного движения по заданной траектории.

Для контроля положения БАС относительно контрастной линии, применяется ОМ. Для повышения точности системы контроля за положением БТ относительно контрастной линии применяется камера системы технического зрения (СТЗ).

Разработан алгоритм определения величины отклонений с помощью аддитивного сигнала. Анализ полученных результатов показывает, что наиболее точно удается определить фактическое отклонение при применении аддитивного сигнала.

Разработанный алгоритм комбинированного управления, основанный на суперпозиции расчётного и корректирующего управлений по интегральному показателю превосходит известные алгоритмы управления, основанные на расчетной модели и корректирующем управлении в 1,5–4 раза.

Заключение

В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения управляемости беспилотных авиационных систем (БАС) посредством снижения погрешности движения системы буксировки за счет разработки методов, моделей и алгоритмов управления и исследования функционирования рассматриваемой системы. Совокупное применение разработанных моделей, алгоритмов и методов, продемонстрировало снижение погрешности движения системы буксировки, достигнув значения 9,6% для скорости 3 м/с, а для скорости 1 м/с - погрешность определения составила 1,85% и время подготовки и отправки ВС на 14 %.

Таким образом, использование такого беспилотного тягача приводит к повышению безопасности процесса автономной буксировки ВС и значительному сокращению количества обслуживающего персонала, на основе которого в дальнейшем могут вырабатываться технические решения при проектировании и конструировании БАС.

Итоги исследования включают следующие результаты:

1. Аналитическая модель беспилотной авиационной системы буксировки воздушных судов, позволяющая благодаря конфигурируемой структуре подсистем БАС анализировать и изучать управляемое автономное движение с учетом взаимодействующих подсистем и влияния внешних нестационарных возмущающих воздействий в автономном режиме.

2. Метод синтеза планируемой кусочно-линейной траектории движения беспилотного тягача, реализуемый суперпозициями параметров траектории системой буксировки, учитывающий индивидуальные параметры траектории на каждом этапе буксировки в соответствии с заданными граничными условиями, обеспечивающий безопасное и точное движение системы буксировки из начального положения в конечное.

3. Алгоритм управления движением беспилотного тягача на основе синтеза множества параметров, определяющих работу адаптивного регулятора, использующий интегральные параметры движения для формирования корректирующих воздействий с учетом возникающих внешних факторов,

обеспечивающий минимизацию отклонения реальной траектории от заданной оператором.

4. Алгоритм позиционирования беспилотного тягача на основе обработки данных аддитивного сигнала системы визуального контроля, позволяющий повысить управляемость системы контроля управления буксировкой воздушных судов за счет минимизации фактического отклонения системы буксировки относительно контрастной линии.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы могут быть внедрены на предприятиях авиационной отрасли и профильных научно-образовательных организациях при проектировании и конструировании БАС с использованием разработанных алгоритмов управления.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В качестве перспектив дальнейшей разработки темы можно указать исследования, связанные с интеграцией технологий искусственного интеллекта и дальнейшего развития предлагаемой беспилотной авиационной системы буксировки воздушных судов.

Соответствие научной специальности. Полученные результаты соответствуют пп. 2, 5, 6, 14 специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Результаты диссертационного исследования соответствуют пунктам 2, 5, 6, 14 паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Список используемых сокращений

БАС – беспилотные авиационные системы;

ВС – воздушное судно;

ВС РФ – вооруженные силы Российской Федерации;

ВКС – воздушно-космические силы;

БТ – беспилотный тягач;

СУ – сцепное устройство;

СТЗ – системы технического зрения;

ОМ – оптоэлектронная интегральная микросхема;

БАСНС – беспоисковая адаптивная самонастраивающаяся система;

МНК – метод наименьших квадратов.

Список литературы

1. Аверкин, А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов // Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

2. Александров, В.В. Оптимальное управление движением [Текст] / В.В. Александров, В.Г. Болтянский, С.С. Лемак, Н.А. Парусников, В.М. Тихомиров – М.: Физматлит, 2005. – 376 с.

3. Александров, В.В. Математическое моделирование управляемых динамических систем [Текст] / В.В. Александров, А. Гомез, А. Кастро – Гавана, Изд. Гаванского ун-та, 1990. – 315 с.

4. Аппель, П. Теоретическая механика. Статика. Динамика точки / П. Аппель // Перевод с пятого французского издания И.Г. Малкина. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 515 с.

5. Афонин, Д. В. Динамический анализ двухзвенной связанной системы / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун //International Journal of Open Information Technologies. -2024. -Т. 12. -№. 5. -С. 49.

6. Афонин, Д.В. Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы / Д.В. Афонин, О.Б. Кочергин, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. -2023. -22(3). -С. 24.

7. Афонин, Д. В. Повышение эффективности буксировочных аэродромных систем на основе быстродействия процесса буксировки воздушных судов / Д. В. Афонин // Научный альманах. -7-2 (105). -2023. -С. 23.

8. Афонин, Д. В. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / Д. В. Афонин, Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев // Наука молодых-будущее России. -2017. -С. 14.

9. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной двухзвенной колесной системы по заданной траектории / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун //International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11. – №. 4. – С.38.

10. Афонин Д. В., Политов Е. Н., Яцун С. Ф. Роботизированная платформа для перемещения самолетов по аэродрому // Прогресс транспортных средств и систем-2018. С. 190-191.

11. Афонин, Д.В. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной системы буксировки летательных аппаратов / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2022. -(2). -С. 91.

12. Афонин, Д.В. Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолета с помощью сигналов оптронной матрицы / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. -2022. -26(3). -С. 63.

13. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной колесной системы двух тел, связанной упругим элементом / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // Известия Волгоградского государственного технического университета -2024. -№. 4. -С. 6.

14. Афонин Д. В. Программно-вычислительный комплекс алгоритмов функционирования роботизированной буксировочной аэродромной системы // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022669489, 20.10.2022.

15. Афонин Д. В. Программная реализация адаптивного алгоритма управления движением системы буксировки воздушных судов по заданной контрастной линии // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022680281, 28.10.2022.

16. Программная реализация методики экспериментального получения характеристик основных показателей роботизированной буксировочной аэродромной системы № 2022680280, 28.10.2022.

17. Афонин Д.В. Схема «Роботизированная буксировочная аэродромная система» // Патент на промышленный образец № 139660, 14.12.2023.

18. Баранов, Д.Н. Разработка интеллектуальной системы управления мобильными роботами на основе следящей системы технического зрения и нечеткой

логики [Текст] / Д.Н. Баранов // Диссер. на соис. уч. ст. канд. техн. наук – М., 2008. – 223 с.

19. Бартенев, В.В. Анализ возможностей применения интервальной нейтрософской логики в интеллектуальных системах управления мобильных роботов [Текст] / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун // Интегрированные модели, мягкие вычисления, вероятностные системы и комплексы программ в искусственном интеллекте: сборник научных трудов научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. – М.: Физматлит, 2009. Ч. 2. – С. 50-61.

20. Бартенев, В.В. Динамика управляемого движения мобильных колесных роботов по сигналу оптронной матрицы / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – №5(2). – С. 254-259.

21. Бартенев, В.В. Математическая модель управляемого движения мобильного колесного робота по шероховатой горизонтальной плоскости в вязкой среде [Текст] / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун, I. Zeidis, K. Zimmermenn // Управляемые вибрационные технологии и машины: сборник научных статей международной конференции. – Курск: Курск ГТУ, 2010. Ч. 2. – С. 234-247.

22. Бартенев, В.В. Повышение качества функционирования комбинированного нечеткого регулятора системы управления движением на базе применения нейтрософской логики [Текст] / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун // Интегрированные модели и мягкие вычисления: сборник научных трудов 5-й международной научно-практической конференции. – М.: Физматлит, 2009. Ч. 2. – С. 799-807.

23. Бартенев, В.В. Применение алгоритмов нечеткой логики в автоматических системах управления [Текст] / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун // Вибрационные машины и технологии: сборник научных трудов международной конференции. – Курск: Курский ГТУ, 2008. – С. 812-820.

24. Бартенев, В.В. Управление движением материальной точки по шероховатой плоскости в вязкой среде с использованием оптимального комбинированного нечеткого регулятора [Текст] / В.В. Бартенев, С.Ф. Яцун // Управляемые виб-

рационные технологии и машины: сборник научных статей международной конференции. – Курск: КурскГТУ, 2010. Ч. 2. – С. 284-298.

25. Батанов, А.Ф. Дистанционно управляемые средства для гуманитарного разминирования [Текст] / А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин // Специальная техника. – 2000. – №2. – С. 24-29.

26. Батанов, А.Ф. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций [Текст] / А.Ф. Батанов, С.Н. Грицынин, С.В. Муркин // Специальная техника. — 1999. – №6. – С. 15-21.

27. Батыршин, И.З. Нечеткие гибридные системы [Текст] / И.З. Батыршин, А.О. Недосекин, А.А. Стецко, В.Б. Тарасов, А.В. Язенин, Н.Г. Ярушкина // Теория и практика – М.: Физматлит, 2007. – 208 с.

28. Безнос, А.В. Управление автономным движением двухколёсного велосипеда с гироскопическим стабилизатором [Текст] / А.В. Безнос, Е.В. Гурфинкель, Д.Н. Жихарев, А.В. Ленский, К.В. Савицкий, А.М. Формальский, Л.С. Чесалин // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы» — М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 57-67.

29. Богусловский, А.А. Построение описания внешней среды в системах информационного обеспечения мобильных робототехнических комплексов [Текст] / А.А. Богусловский, А.А. Кирильченко, А.К. Платонов, С.М. Соколов, О.В. Трифонов, В.С. Ярошевский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – №12. – С. 15-24.

30. Буданов, В.М. О движении колёсных роботов [Текст] / В.М. Буданов, Е.А. Девянин // ПММ. – 2003, Т. 67, вып. 2. – С. 244-255.

31. Буданов, В.М. Особенности движения колёсных роботов – неголономных механических систем [Текст] / В.М. Буданов, Е.А. Девянин // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы» – М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 147 -164.

32. Бурдаков, С.Ф. Системы управления движением колесных роботов [Текст] / С.Ф. Бурдаков, И.В. Мирошник, Р.Э. Стельмаков – СПб.: Наука, 2001. – 227 с.

33. Вечканов, В.В. Адаптивная система нечеткого управления мобильным роботом [Текст] / В.В. Вечканов, Д.В. Киселев, А.С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2002. – №1. – С. 20-26.

34. Гаврилов, А.В. Архитектура гибридной системы управления мобильного робота [Электронный ресурс] / А.В. Гаврилов, В.В. Губарев, К.Х. Джо, Х.Х. Ли // Научно-исследовательская лаборатория Гибридные Интеллектуальные Системы: [сайт]. URL: http://www.insycom.ru /html/Articles/2004/VestNGTU.pdf (дата обращения: 09.04.2009).

35. Голован, А.А. Алгоритмы решения задачи навигации мобильных роботов [Текст] / А.А. Голован, А.А. Гришин, С.Д. Жихарев, А.В. Ленский // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», 7-8 декабря 1999 г. — М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 109-128.

36. Голубев, Ю.Ф. Основы теоретической механики / Ю.Ф. Голубев – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 720 с.

37. Гусев, Д.М. Моделирование динамики РТС в масштабе реального времени [Текст] / Д.М. Гусев, А.И. Кобрин // Труды Международной конференции «Информационные средства и технологии» – М.: Изд-во Станкин, 1997. – С. 66-71.

38. Гусев, Д.М. Навигация мобильного робота на полигоне, оснащённом системой маяков [Текст] / Д.М. Гусев, А.И. Кобрин, Ю.Г. Мартыненко // Материалы науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», 5-6 декабря 2000 г. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – С. 140—151.

39. Девянин, Е.А. О движении колесных роботов [Текст] / Е.А. Девянин // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – С. 169-200.

40. Дуньюэ, Ц. Разработка системы управления мобильным роботом с использованием нечётких моделей [Текст] / Ц. Дуньюэ // Автореф. дис. ... канд. техн. наук // Московский государственный технологический университет СТАНКИН. – М., 2007. – 24 с.

41. Евграфов, В.В. Динамика и управление движением колесных роботов [Текст] / В.В. Евграфов // Автореф. дис. ... канд. техн. наук // Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – М., 2008. – 15 с.

42. Евграфов, В.В. Динамика, управление, моделирование роботов с дифференциальным приводом [Текст] / В.В. Евграфов, В.Е. Павловский, В.В. Павловский // Теория и системы управления. – 2007. – №5. – С. 171-176.

43. Жданов, А.А. Бионическая интеллектуальная адаптивная система управления мобильным роботом [Текст]: часть 1 / А.А.Жданов, М.В. Крыжановский, Н.Б. Преображенский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – №1. – С. 21-30.

44. Жданов, А.А. Бионическая интеллектуальная адаптивная система управления мобильным роботом [Текст]: часть 2 / А.А. Жданов, М.В. Крыжановский, Н.Б. Преображенский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – №2. – С. 17-22.

45. Жданов, А.А. Система управления мобильным роботом на основе биологических принципов [Текст] / А.А. Жданов, М.В. Крыжановский, Б.М. Магомедов // Докл. II-го Международного научно-практического семинара Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте – М.: Физматлит, 2003. – С. 197-202.

46. Зегжда, С.А Уравнение движением неголономных систем и вариационные принципы механики [Текст] / С.А. Зегжда, Ш.Х. Солтаханов, М.П. Юшков – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2002. – 408 с.

47. Зенкевич, С.Л. Моделирование движения мобильного робота по сложному маршруту [Текст] / С.Л. Зенкевич, А.В. Назарова, Д.М. Лисицын // Материалы науч. школы-конференции «Мобильные роботы 2000». – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – С. 14-27.

48. Зиксин, С. Интеллектуальное навигационное управление и диагностика адаптивных мобильных роботов в незнакомой среде [Текст] / С. Зиксин, А.В. Тимофеев // Докл. межд. науч.-техн. конференции «Экстремальная робототехника. Нано-, микро- и макророботы» (ЭР-2009). – 2009. – С. 415-422.

49. Калёнова, В.И. Устойчивость и стабилизация установившихся движений неголономных механических систем одного класса [Текст] / В.И. Калёнова, В.М. Морозов, М.А. Салмина // Мобильные роботы и мехатронные системы. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – С. 119-134.

50. Каляев, А.В. Однородные управляющие структуры адаптивных роботов [Текст] / В.П. Носков, И.А. Каляев // Под ред. А.В. Каляева и Ю.В. Чернухина – М.: Наука, 1990. – 152 с.

51. Карапетян, А.В. Методы исследования устойчивости и бифуркации стационарных движений консервативных неголономных систем [Текст] / А.В. Карапетян, А.С. Кулешов // Проблемы механики. – М.: Физматлит, 2003. – С. 429-464.

52. Кобрин, А.И. Неголономная динамика мобильных роботов и её моделирование в реальном времени [Текст] / А.И. Кобрин, Ю.Г. Мартыненко // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». – М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 107-123.

53. Лебедев, Г.Н. Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации [Текст]: учебное пособие. / Г.Н. Лебедев – М.: Издательство МАИ, 2002. – 112 с.

54. Лобас, Л.Г. Неголономные модели колёсных экипажей [Текст] / Л.Г. Лобас – Киев: Наукова думка,1986. – 232 с.

55. Львович, А.Ю. Электромеханические системы [Текст] / А.Ю. Львович – СПб.: Издательство ЛГУ, 1989. – 296 с.

56. Лямин, А.В. Решение некоторых транспортных задач управления мобильным роботом [Текст] / А.В. Лямин, А.В. Русак // Информационные технологии моделирования и управления / Под ред. О.Я. Кравец – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2006. – №5(30). – С. 637-644.

57. Ляшин, А.М. Система управления мобильным транспортным средством для передвижения по пересеченной местности [Текст] / А.М. Ляшин, Ю.А. Пичугин // Докл. IX-ой Всероссийской науч. конференции «Краевые задачи и математическое моделирование». – 2008. – С. 95-99.

58. Макаров, И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления [Текст] / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов – М.: Наука, 2006. – 336 с.

59. Макаров, И.М. Создание интеллектуальных систем автоматизации и управления на основе современных информационных технологий [Текст] / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – №4. С. 13-20.

60. Мартыненко Ю.Г. Управление автономным движением мобильного робота МЭИ [Текст] / Ю.Г. Мартыненко, А.И. Кобрин, Д.М. Гусев, А.О. Ефремов, И.В. Орлов, А.В. Шутяев // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». – М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 58-80.

61. Мартыненко Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Фундаментальная и прикладная математика. – 2005. – №8. – С. 29-80.

62. Мартыненко, Ю.Г. Алгоритмы управления мобильным роботом при движении по маякам [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Докл. Международной конф. «Информационные средства и технологии». – М., 1998. – Т. 2. – С. 75-80.

63. Мартыненко, Ю.Г. О матричной форме уравнений неголономной механики [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Сборник научно-методических статей по теоретической механике. Вып. 23. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – С. 9-21.

64. Мартыненко, Ю.Г. Проблемы управления и динамики мобильных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Новости искусственного интеллекта. – 2002, № 4 (52). – С. 18-23.

65. Мартыненко, Ю.Г. Декомпозиция задачи управления мобильным одноколесным роботом с невозмущаемой гиростабилизированной платформой [Текст] / Ю.Г. Мартыненко, А.И. Кобрин, А.В. Ленский // Докл. РАН. –2002. – Т. 386, № 6. – С. 767-769.

66. Мартыненко, Ю.Г. Аналитическая динамика электромеханических систем [Текст] / Ю.Г. Мартыненко – М.: Изд-во МЭИ, 1985 – 62 с.

67. Мартыненко, Ю.Г. Влияние переходных процессов в электроприводе на устойчивость движения мобильного колёсного робота [Текст] / Ю.Г. Мартыненко, И.В. Орлов // Мобильные роботы и мехатронные системы. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – С. 135-149.

68. Мартыненко, Ю.Г. Динамика мобильных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – №5. – С. 110-116.

69. Мартыненко, Ю.Г. Неголономная динамика, управление и устойчивость мобильных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко, А.И. Кобрин, А.В. Ленский // Восьмой Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – С. 330-331.

70. Мартыненко, Ю.Г. Новые задачи управления и динамики мобильных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Математика. Механика. Информатика. Труды конференции, посвященной десятилетию РФФИ. – М.: Физматлит, 2004. – С. 75-117.

71. Мартыненко, Ю.Г. Применение матричных методов для составления уравнений Маджи и Эйлера-Лагранжа неголономных систем [Текст] / Ю.Г. Мартыненко, М.Ф. Зацепин // Сборник научно-методических статей по теоретической механике. Вып. 25. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – С. 86-101.

72. Мартыненко, Ю.Г. Применение теории неголономных электромеханических систем к задачам динамики мобильных колёсных роботов [Текст] / Ю.Г. Мартыненко // Сб. науч. статей, посв. 125-летию кафедры теоретической механики. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – С. 33-47.

73. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления [Текст]: учебник / Под ред. Н.Д. Егупова // 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.

74. Мобильный робот с оптронной матрицей: пат. на полезную модель №99253 Российская Федерация: МПК H01S 3/00 / С.Ф. Яцун, В.В. Бартенев, С.И. Савин, А. Аль-Еззи // заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет». – №2010124311/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. №31.

75. Морозов, В.М. Устойчивость и стабилизация движения одноколёсного велосипеда [Текст] / В.М. Морозов, В.И. Калёнова, Е.Н. Шевелёва // Изв. РАН. МТТ. – 2001. – № 4. – С. 49-58.

76. Неймарк, Ю.И. Динамика неголономных систем [Текст] / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев – М.: Издательство Наука, 1967. – 520 с.

77. Охоцимский, Д.Е. Аппаратное и алгоритмическое обеспечение мобильного робота класса монотип [Текст] / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов, В.Е. Павловский, С.Н. Емельянов, В.В. Павловский // Докл. науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». – М.: Институт механики МГУ, 1999. – С. 134-146.

78. Охоцимский, Д.Е. Новые задачи динамики и управления движением мобильных колёсных роботов [Текст] / Д.Е. Охоцимский, Ю.Г. Мартыненко // Успехи механики. – 2003. – Т. 2, №1. С. 3-47.

79. Павлов, С.А. Буксировка воздушных судов: учебн. пособие / С.А. Павлов, В.Б. Сердобов. –М.: МАДИ, 2018. –104 с.

80. Павловский, В.Е. Исследование динамики движения цепочки робопоезд [Текст] / В.Е. Павловский, Н.В. Петровская, В.В. Евграфов // Управляемое движение, Препринт ИПМ им М.В. Келдыша РАН, 2005. – №120.

81. Павловский, В.Е. Синтез Dl-гладких траекторий для мобильного робота с дифференциальным приводом [Текст] / В.Е. Павловский, В.В. Евграфов // Интеллектуальные и многопроцессорные системы. – Геленджик, 2003, с. 148-152.

82. Павловский, В.Е. Синтез алгоритмов управления интеллектуальной транспортной системой робопоезд в стесненных условиях сложных сред [Текст] / В.Е. Павловский, Н.В. Петровская, В.В. Евграфов // Труды конф. «Мехатроника и робототехника». – СПб., 2007. – С. 114-125.

83. Павловский, В.Е. Управление и сенсорное обеспечение мобильных роботов [Текст] / В.Е. Павловский, В.В. Евграфов, Н.В. Петровская, А.Н. Забегаев, В.В. Павловский // Труды конф. «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2007 (МАУ-2007). – Геленджик, 2007. – С. 53-60.

84. Павловский В.Е., Петровская Н.В. Синтез и исследование алгоритмов управления движением «робопоезда» в стесненных условиях сложных сред. Мехатроника, автоматизация, управление. Изд-во: Новые технологии –Москва,– 2007,–№ 1, –с. 2-8.

85. Пшихопов, В.Х. Позиционное, субоптимальное по быстродействию управление мобильным роботом [Текст] / В.Х. Пшихопов // Журнал национальной Академии наук Украины «Искусственный интеллект». – 2001. – № 3. – С. 490-497.

86. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

87. Сабанин, В.Р. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении [Текст] / В.Р. Сабанин, А.И. Смирнов, А.И. Репин // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – №3-4. – С. 78-85.

88. Самарин, А.И. Модель адаптивного поведения мобильного робота, реализованная с использованием идей самоорганизации нейронных структур [Электронный ресурс] / А.И. Самарин // Сайт Круглого стола Искусственные интеллектуальные системы – достижения, проблемы, перспективы: [сайт]. URL: http://wsni2003.narod.ru/Papers/Samarin.htm (дата обращения: 09.04.2009).

89. Сиротенко, М.Ю. Нейросетевой 3D-планировщик перемещений автономных мобильных роботов [Электронный ресурс] / М.Ю. Сиротенко // Таганрогский государственный радиотехнический университет: [сайт]. URL: http://store.ierton.homelinux.net/books/math/neuralnet/Нейросетевой 3D-планировщик перемещений мобильных роботов.pdf (дата обращения: 09.04.2009).

90. Сыцко, А.В. Система управления автономным мобильным роботом на основе адаптивного резонанса [Текст] / А.В. Сыцко // Сб. научн. трудов. XXIX Академических чтений по космонавтике. – М.: Изд-во ИСПРАН, 2005. – С. 93-97.

91. Тимофеев, А.В. Адаптивные робототехнические комплексы [Текст] / А.В. Тимофеев – СПб.: Машиностроение, 1988. – 332 с.

92. Тимофеев, А.В. Методы нейросетевого и мультиагентного управления в робототехнике и мехатронике [Текст] / А.В. Тимофеев // Нелинейная теория управления и ее приложения: Динамика, управление, оптимизация. – М.: Физматлит, 2003. – С. 101-126.

93. Тимофеев, А.В. Роботы и искусственный интеллект [Текст] / А.В. Тимофеев – М.: Наука, 1978. – 192 с.

94. Тимофеев, А.В. Системы цифрового и адаптивного управления роботов [Текст] / А.В. Тимофеев, Ю.В. Экало – СПб.: Издательство СПбГУ, 1999. – 248 с.

95. Тимофеев, А.В. Управление роботами [Текст] / А.В. Тимофеев – СПб.: Издательство СПбГУ, 1985. – 217 с.

96. Устюжанин, А.Е. Разработка ассоциативной памяти для систем автономного адаптивного управления на основе систем детерминированного хаоса [Текст] / А.Е. Устюжанин // Автореф. дис....канд.физ.-мат.наук // Институт системного программирования РАН. – М., 2007. – 26 с.

97. Чаплыгин, С.А. Исследования по динамике неголономных систем [Текст] / С.А. Чаплыгин – М.: Гостехиздат, 1949. – 111 с.

98. Чернухин, Ю.В. Нейропроцессорные сети [Текст] / Ю.В. Чернухин – Таганрог, Издательство ТРТУ, 1999. – 439 с.

99. Чернухин, Ю.В. Нейросетевое планирование и позиционно-траекторное управление мобильным роботом в априори неформализованной внешней среде [Текст] / Ю.В. Чернухин, В.Х. Пшихопов // Сборник трудов научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // Под ред. Е.И. Юревича – СПб, 2001. – С. 162-173.

100. Чернухин, Ю.В. Программно-аппаратный комплекс моделирования нейросетевых систем управления интеллектуальных мобильных роботов [Текст] / Ю.В. Чернухин, В.Х. Пшихопов, С.Н. Писаренко, О.Н. Трубачев // Мехатроника. – 2002. – №1. – С. 27-29.

101. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем в среде MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.

102. Эмулятор движения мобильного колесного робота: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010613625 Российская Федерация / Бартенев В.В.; правообладатель: ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет»; заявл. 20.04.2010; зарегистрировано 02.06.2010.

103. Юревич, Е.И. Основы робототехники [Текст] / Е.И. Юревич // 2-е изд.– СПб.: BXV-Петербург, 2005. – 416 с.

104. Ющенко, А.С. Эргатические мехатронные системы [Текст] / А.С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – №3. – С. 12-25.

105. Яцун, С. Ф. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В Афонин. // Известия Юго-Западного государственного университета. -2018. -22(2). -С. 34.

106. Afonin, D. V. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft In / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Frontiers in Robotics and Electromechanics. Springer. -2023. -P.97.

107. Afonin, D. V. Simulation of the Autonomous Curvilinear Motion of a Robotic Aircraft Towing System / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. -2022. -51(2). -P.173.

108. Politov, E. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot / E. Politov, D. Afonin, V. Bartenev //In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer. Singapore. -2020.-P. 397.

109. Saveleva, E. Mobile robotic platform with three-wheeled transmission motion control / E. Saveleva, E. Politov, D. Afonin // In Proceedings of RusAutoCon-2022, Scopus. -2022. -P.34.

110. Balmer, C. Avatar: A home built robot [Text] / C. Balmer // Robotics Age. – 1988. – vol. 4, n. 1. – P. 20-25.

111. Bartenev, V.V. Application of the combined neutrosophic PID controller to motion control of a mobile object [Text] / V.V. Bartenev // Proceedings of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint

Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2009. – P. 264-268.

112. Bartenev, V.V. Motion control of mobile wheeled robots on the base of the signal of optron matrix [Text] / V.V. Bartenev, S.F. Yatsun // Proceedings of the17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg: State Research Center of the Russian Federation – Central Scientific & Research Institute Elektropribor, 2010. – P. 279-284.

113. Bastin, G. On adaptive linearizing control of omnidirectional mobile robots [Text] / G. Bastin, G. Campion // Proceedings of MTNS 89, Progress in Systems and Control Theory 4 – Amsterdam, 1989. – vol. 2. – P. 531-538.

114. Billard, A. Hayes G. DRAMA, a Connectionist Architecture for Control and Learning in Autonomous Robots [Text] / A. Billard, G. Hayes // Adaptive Behavior. – 1999. – №7 (1). – PP. 35-63.

115. Bloch, A. M. Nonholonomic mechanical systems with symmetry [Text] / A.M. Bloch, P.S. Krishnaprasad, J.E. Marsden, R. Murray // Arch. Rational Mech. Anal. – 1996. – Vol. 136. – PP. 21-99.

116. Bloch, A. M. Stability of nonholonomic control systems [Text] / A.M. Bloch // Automatica. – 1992. – Vol. 28. – PP. 431-435.

117. Bloch, A. M. Control and stabilization of nonholonomic Chaplygin dynamic systems [Text] / A.M. Bloch, N.H. McClamroch // Proc. IEEE Conf. Decision Control. 1991. Brighton, UK. – PP. 1127-1132.

118. Bloch, A. M. Control and stabilization of nonholonomic dynamic system [Text] / A.M. Bloch, M. Reyhanoglu, N.H. McClamroch // IEEE Trans. Automat. Control. –1992. – Vol. 37, no. 11. – PP. 1746-1757.

119. Campion, G. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots [Text] / G. Campion, G. Bastin, B. D'Andre'a-Novel // IEEE Trans. Robot. Autom. – 1996. – Vol. 12, No. 1. – PP. 47-62.

120. Canudas de Wit, C. Trends on Mobile Robot and Vehicle control [Text] / C. Canudas de Wit // Control problems in Robotics and Automation: future directions. – 1997. – V.3. – PP. 151-172.

121. Canudas de Wit, C. Theory of robot control [Text] / C. Canudas de Wit, B. Siciliano, G. Bastin – London: Springer-Verlag, 1996. – 550 P.

122. Dixon, W. Nonlinear control of wheeled mobile robot [Text] / W. Dixon, D.M. Dawson, E. Zergeloglu, A. Bahal // Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 262. – London: Springer-Verlag, 2001. – 195 P.

123. Dixon, W. Robust Tracking and Regulation Control for Mobile Robots [Text] / W. Dixon, D. Dawson, E. Zergeroglu, F. Zhang // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2000. – Vol. 10. – PP. 199-216.

124. Helmers, C. Ein Hendenleben, (or, A hero's life) [Text] / C. Helmers // Robotics Age. – 1983. – vol. 5, n. 2. – P. 7-16.

125. Hirose, S. Introduction of intelligent sport [Text] / S. Hirose // J. Robotics Mechatronics. – 1998. – Vol. 10, no. 1. – P. 226.

126. Holland, J.M. Rethinking robot mobility [Text] / J.M. Holland // Robotics Age. – 1988. – vol. 7, n. 1. – P. 26-30.

127. Isidory, A. Nonlinear control systems [Text] / A. Isidory – New York: Springer-Verlag, 1995. – 549 P.

128. Kalenov, V.I. Nonholonomic mechanical systems and stabilization of motion [Text] / V.I. Kalenova, A.V. Karapetjan, V.M. Morozov, M.A. Salmina // Fundamentalnaya i prikladnaya matematika. – 2005, Vol. 11, №7. – PP. 117-158.

129. Karapetyan, A.V. Steady motions of nonholonomic systems [Text] / A.V. Karapetyan, A.S. Kuleshov // Regular Chaotic Dynamics. –2002. – Vol. 7, no. 1. – PP. 81-117.

130. Kolmanovsky, V.B. Developments in nonholonomic control problem [Text] / V.B. Kolmanovsky, N.H. McClamroch // IEEE Control Systems. – 1995. – Vol. 15, no. 6. – PP. 20-36.

131. Laumond, J.P. Controllability of a multibody mobile robot [Text] / J.P. Laumond // ICAR – Pisa, 1991. – P. 1033-1038.

132. Miroshnik, I.V. Trajectory motion control and coordination of multilinks robots [Text] / I.V. Miroshnik, V.O. Nikiforov // Prepr. of 13th IFAC World Congress. – San-Francisco, 1996. – Vol. A. – PP. 361-366.

133. Muir, P.F. Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional mobile robot [Text] / P.F. Muir, C.P. Neuman // Proceedings of IEEE Conf. Robotics and Automation, 1987. – P. 1772-1778.

134. Riid A. Transparent fuzzy systems: modeling and control [Text] / A. Riid – Tallinn Technical University, 2002. – 217 P.

135. Sheng, Z. Study of the stability and motion control of a unicycle [Text] / Z. Sheng, K. Yamafuji, S.V. Ulyanov // J. Robotics Mechatronics. –1996. – Vol. 8, no. 6. – P. 571-579.

136. Timofeev, A.V. Intelligent control applied to non-linear systems and neural networks with adaptive architecture [Text] / A.V. Timofeev // Journal of Intelligent Control, Neurocomputing and Fuzzy Logic. – 1996. – V.1 – PP. 1-18.

137. Timofeev, A.V. Neural multiagent control of robotic systems [Text] / A.V. Timofeev // Proceedings of International Conference on Informatics and Control. – 1997. – V.2, №3. – PP. 537-542.

138. Wang, H. Interval neutrosophic sets and logic: theory and applications in computing [Text] / H. Wang, F. Smarandache, Y. Zhang, R. Sunderraman // – Arizona, Hexis Publishers, 2005. – 87 P.

139. Weitzenfeld, A. A. Neural Schema Architecture for Autonomous Robots [Text] / A.A. Weitzenfeld // Mobile Robot Laboratory, Georgia Institute of Technology. – 1998. – 15 P.

140. Xu, W.L. Fuzzy reactive control of a mobile robot incorporating a real/virtual target switching strategy [Text] / W.L. Xu, S.K. Tso, Y.H. Fung // Robotics and Autonomous Systems. – 1998. – Vol. 23. – PP. 171-186.

141. Zenkov, D. V. The energy-momentum method for the stability of nonholonomic systems [Text] / D.V. Zenkov, A.M. Bloch, J.E. Marsden // Dynamic Stability Systems. – 1998. – Vol. 13. – PP. 123-166.

142. Richter C., Bray A., Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments //Robotics research. – Springer, Cham, 2016. – С. 649-666.

143. Wang H. Smooth point-to-point trajectory planning for industrial robots with kinematical constraints based on high-order polynomial curve //Mechanism and Machine Theory. – 2019. – T. 139. – C. 284-293.

Приложение А.

Список публикаций соискателя

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1.Афонин, Д. В. Динамический анализ двухзвенной связанной системы / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12. №. 5. С. 49.

2. Афонин, Д.В. Моделирование автономного криволинейного движения роботизированной системы буксировки летательных аппаратов / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. Т. 2. С. 91.

3. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной двухзвенной колесной системы по заданной траектории / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. №. 4. С.38.

4. Афонин, Д.В. Информационная система роботизированной буксировочной аэродромной системы / Д.В. Афонин, О.Б. Кочергин, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 22(3). С. 24.

5. Афонин, Д.В. Моделирование совместного движения роботизированного буксировщика и самолета с помощью сигналов оптронной матрицы / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26(3). С. 63.

6. Афонин, Д. В. Управление движением роботизированной колесной системы двух тел, связанной упругим элементом / Д. В. Афонин, А. С. Печурин, С. Ф. Яцун // Известия Волгоградского государственного технического университета 2024. №. 4. С. 6.

7. Яцун, С. Ф. Моделирование движения робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / С. Ф. Яцун, В. В. Бартенев, Е. Н. Политов, Д. В Афонин. // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22(2). С. 34.

Публикации в российских и иностранных научных изданиях, входящих в перечни WoS/Scopus:

1. Afonin, D. V. Development of a Control System for a Robotic Towing Platform for Aircraft In / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Frontiers in Robotics and Electromechanics. Springer. 2023. P.97.

2. Afonin, D. V. Simulation of the Autonomous Curvilinear Motion of a Robotic Aircraft Towing System / D. V. Afonin, A. S. Pechurin, S. F. Yatsun // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. 51(2). P.173.

3. Politov, E. Mathematical Modeling of Motion of a Two-Section Wheeled Robot / E. Politov, D. Afonin, V. Bartenev //In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. Springer. Singapore. 2020.P. 397.

4. Saveleva, E. Mobile robotic platform with three-wheeled transmission motion control / E. Saveleva, E. Politov, D. Afonin // In Proceedings of RusAutoCon-2022, Scopus. 2022. P.34.

Публикации в других изданиях:

1. Афонин, Д.В. Комбинированная система управления движением роботизированной буксировочной системы / Д.В. Афонин, А.С. Печурин, С.Ф. Яцун // Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике. Завалишинские чтения. Санкт-Петербург: 2023. С. 119.

2. Афонин, Д. В. Повышение эффективности буксировочных аэродромных систем на основе быстродействия процесса буксировки воздушных судов / Д. В. Афонин // Научный альманах. 72 (105). 2023. С. 23.

3. Афонин, Д. В. Разработка робота-тягача для транспортировки самолетов по аэродрому / Д. В. Афонин, Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев // Наука молодых-будущее России. 2017. С. 14.

4. Афонин Д. В., Политов Е. Н., Яцун С. Ф. Роботизированная платформа для перемещения самолетов по аэродрому // Прогресс транспортных средств и систем-2018. С. 190-191.

5. Политов, Е. Н. Кинематический анализ двухсекционного колесного робота / Е. Н. Политов, Е. А. Тимофеев, Д. В. Афонин // Завалишинские чтения. 2019. С. 272.

Приложение Б.

Сведения о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Афонин Д. В. Программно-вычислительный комплекс алгоритмов функционирования роботизированной буксировочной аэродромной системы // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022669489, 20.10.2022.

2. Афонин Д. В. Программная реализация адаптивного алгоритма управления движением системы буксировки воздушных судов по заданной контрастной линии // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2022680281, 28.10.2022.

3. Программная реализация методики экспериментального получения характеристик основных показателей роботизированной буксировочной аэродромной системы № 2022680280, 28.10.2022.

Патент на промышленный образец:

1. Афонин Д.В. Схема «Роботизированная буксировочная аэродромная система» // Патент на промышленный образец № 139660, 14.12.2023.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ

№ 139660

СХЕМА "РОБОТИЗИРОВАННАЯ БУКСИРОВОЧНАЯ АЭРОДРОМНАЯ СИСТЕМА"

Патентообладатель(ли) ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Автор(ы): ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Заявка №

Приоритет(ы) промышленного образца **декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре промышленных образцов Российской Федерации **декабря 2023 г.**

Срок действия исключительного права на промышленный образец истекает **декабря 2027 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164baf96f83b73b4aa7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022669489

Программно-вычислительный комплекс алгоритмов функционирования роботизированной буксировочной аэродромной системы

Правообладатель: ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Автор(ы): ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Заявка № **2022668853**
Дата поступления **12 октября 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***20 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680280

Программная реализация методики экспериментального получения характеристик основных показателей роботизированной буксировочной аэродромной системы

Правообладатель: ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Автор(ы): ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Заявка № **2022668877**
Дата поступления **12 октября 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***28 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680281

Программная реализация адаптивного алгоритма управления движением системы буксировки воздушных судов по заданной контрастной линии

Правообладатель: ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Автор(ы): ***Афонин Дмитрий Вячеславович (RU)***

Заявка № **2022668875**

Дата поступления **12 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***28 октября 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов