Юго-Западный государственный университет

На правах рукописи

Мартинез Леон Андрес Сантьяго

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОНИТОРИНГОМ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки России,
доктор технических наук, профессор
Яцун Сергей Фёдорович

Курск 2025

Содержание

Введение 4
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 13
1.1. Обзор методов мониторинга прибрежных территорий 13
1.2. Основные факторы появления неопределенностей в системе мониторинга прибрежных территорий 15
1.3. Обзор методов управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) 17
1.4. Системы управления БПЛА с прогнозирующими моделями (MPC) 22
1.5. Методы обнаружения объектов на прибрежных территориях 24
1.6. Система технического зрения для обнаружения водного транспорта 26
1.7. Обзор существующих конструкций БПЛА 30
1.7.1. Общая классификация БПЛА 32
1.7.2. Малогабаритные беспилотные летательные комплексы (МБЛК) 34
Выводы по первой главе 39
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА (СМПТ) 41
2.1. Структура СМПТ 42
2.2. Структура МБЛК 44
2.3. Алгоритм планирования движения МБЛК 46
2.4. Структура человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) 49
2.5. Математическая модель МБПК 52
2.5.1. Кинематический анализ МБЛК 53
2.5.2. Определение внешних сил, действующих на МБЛК 56
2.5.3. Определение моментов, действующих на МБЛК 58
2.5.4. Математические модели электромеханической системы электроприводов МБЛК 64
2.6. Имитационная модель движения МБЛК 66
Выводы по второй главе 75

Глава 3. ИЗУЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МБПК 76
3.1. Планирование траектории движения 76
3.2 Обобщенная математическая модель движения МБЛК 79
3.4. Структура системы управления МБЛК 84
3.5 Синтез алгоритма системы управления МБЛК 87
3.6 Результаты моделирования автономного движения МБЛК 92
3.6.1. Управляемое движение МБЛК по заданной траектории 94
3.6.2. Возмущенное движение МБЛК 99
3.6.3. Движение МБЛК с возможностью облета препятствий 109
Выводы по третьей главе 114
Глава 4. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МБЛК ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ 115
4.1. Описание аппаратно-программного комплекса 115
4.2. Описание алгоритмов функционирования системы мониторинга прибрежных территорий 124
4.3. Экспериментальное изучение движения МБЛК 134
4.4. Экспериментальное изучение СМПТ 142
4.5. Экспериментальная оценка показателей качества мониторинга прибрежных территорий 153
Выводы по четвертой главе 157
Заключение 159
Список литературы 161

Введение

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия динамическое развитие информационных технологий и микроэлектроники привело к совершенствованию современной авиации, что способствовало переосмыслению концепций применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), путей дальнейшего их развития, совершенствованию полезной нагрузки и приданию им многоцелевого характера в военном и гражданском секторах. Особое внимание представляют малогабаритные БПЛА мультироторного типа, благодаря их особенностям и возможности осуществить оперативные и высокоточные работы при решении таких задач, как мониторинг наземных объектов, картографирование, оптимизация ресурсов в сельскохозяйственной отрасли, охрана окружающей среды, предотвращение стихийных бедствий, патрулирование и обеспечение безопасности. В диссертационной работе особый интерес представляет мониторинг морских прибрежных территорий, обладающих стратегическим значением для любого государства, с точки зрения торгово-экономической, производственной, политической и оборонной деятельности. Мониторинг морской береговой линии предлагается рассматривать на примере Республики Эквадор. Побережье страны характеризуется сложным рельефом местности, наличием труднодоступных и относительно незаселенных территорий. Таким положением пользуются организации, осуществляющие различные виды несанкционированной деятельности: незаконная добыча и торговля природными ресурсами (полезные ископаемые, нефтепродукты, древесина, браконьерство, вылов рыбы и др.), вызывающие крупные экономические потери государства. В Республике Эквадор инспекционный осмотр прибрежных территорий проводится сотрудниками государственных служб и соответствующих подразделений вооруженных сил в соответствии с Конституцией, Органическим законом о судоходстве и управлении морской безопасностью, а также международными конвенциями. Вышеуказанные государственные структуры находятся в непрерывном процессе поиска и

модернизации технологий для повышения эффективности проводимых работ по мониторингу, направленных на обеспечение безопасности вверенных территорий, выявление и задержание нарушителей, минимизируя экономические расходы и риски для жизни человека. Одним из важных объектов мониторинга являются морские суда, служащие в качестве основного средства транспортировки незаконно добытой продукции. Предлагается разработать систему мониторинга прибрежных территорий (СМПТ), в состав которой входит малогабаритный беспилотный летательный комплекс (МБЛК), оснащенный бортовым аппаратно-программным комплексом управления (БАПКУ). Кроме того, методы, модели и алгоритмы управления СМПТ, обеспечивающие точность и быстродействие процесса мониторинга прибрежных территорий, требуют дальнейшего развития. Актуальным направлением исследования является синтез оптимальных управляющих алгоритмов и совершенствование структурных связей элементов СМПТ; разработка методов планирования траекторий движения и построения алгоритмов автономного управления на основе математических моделей, с учетом как детерминированных, так и случайных внешних возмущений.

Степень разработанности темы исследования. Сегодня методы мониторинга прибрежных морских территорий предполагают использование наземных пунктов охраны, специализированного водного транспорта, пилотируемой авиации и спутниковых технологий, а также привлечение большого количества специалистов. В этой связи, в мире интенсивно совершенствуются системы мониторинга прибрежных территорий, направленные на контроль за объектами и природными ресурсами, выявление противоправных действий, проведение миграционного контроля, разведывательных и оперативных мероприятий по обеспечению безопасности территориальных вод и государственных границ. В разных странах активно ведутся исследования по созданию СМПТ с применением роботизированных мобильных платформ (РМП) воздушного базирования. Примерами могут

служит роботы ScanEagle (Корпорация «Insitu Inc.», США), Горизонт Эйр S-100 (ОАО «Горизонт», Россия), IAI Heron (Концерн «IAI», Израиль), Fulmar X (Группа «Thales», Испания), Gavilan-2 (НИЦ «CIDFAE», Эквадор) и др. Большинство робототехнических систем воздушного базирования нуждаются в наличии взлетных площадок, систем запуска или посадки, а также большой группы специалистов. Однако, морские службы должны находиться в постоянной готовности оперативного развертывания при выполнении любых неотложных операций по охране прибрежных территорий для осуществления запуска и посадки малогабаритных беспилотных летательных комплексов (МБЛК) как на суше, так и на служебно-разъездных катерах, находящихся на море. Следовательно, МБЛК должен быть оснащен бортовым аппаратно-программным комплексом, обеспечивающим повышение его функциональных возможностей и уровень интеллектуализации в задачах мониторинга водного транспорта по заданной оператором траектории, как в автономном, так и в телеуправляемом режимах. Для математического моделирования функционирования СМПТ применяются системные методы и процедуры, такие как: абстрагирование и конкретизация; анализ и синтез, формализация; декомпозиция; линеаризация и выделение нелинейных составляющих; структурирование и макетирование. Основой СМПТ служит малогабаритный беспилотный летательный аппарат, выполненный по квадрокоптерной схеме, осуществляющий управляемое движение в условиях внешних воздействий. Вопросам управляемого движения малогабаритных летательных аппаратов посвящены труды российских (Е.И. Юревич, С.А. Белоконь, С.А. Мальцев, С.Л. Зенкевич, Н.А. Чулин, Ю.В. Подураев, А.С. Ющенко, В.Е. Павловский, А.С. Сыров, В.В. Щербинин) и зарубежных (R. D’Andrea, V. Kumar, R. Lozano, S. Salazar O. Montiel, J. Alonso-Mora, S. Bouabdallah, T.A. Johansen, J. Tsitsiklis, R. Siegwart, M. Cannon) ученных. Подходы, применяемые в ходе моделирования неопределенностей, основываются на интервальных и стохастических подходах. Большой вклад в решении задач по изучению управляемого движения мобильных роботов в

условиях неопределенностей внесли российские (Г.Л. Дегтярев, В.И. Гаркушенко, К.А. Неусыпин, Н.Е. Зубов, А.А. Колесников, А.М. Ляпунов, А.А. Воронов, Ю.П. Доброленский, А.В.Фомичев) и зарубежные (C. A. Desoer, H.H. Rosenbrock, H. Kwakernaak, J. How, D.T. McRuer, E. Kayacan, T.W. McLain, R. Tedrake, S. Singh, M. Likhachev, N. Michael) ученые. Фундаментальные исследования интеллектуальных систем управления последнее время получают широкое распространение в трудах А.В Румакиной, А. Г. Булгакова, Н.М. Гревцова, С.Б. Ткачёва, Б.Р. Андриевского, А.Л. Фрадкова, А.Р. Гайдука, М.Ю. Медведева и др. Анализ работ показывает, что наиболее оптимальный подход по обеспечению робастного управления летательными аппаратами в недетерминированных условиях окружающей среды достигается посредством применения интервального подхода при задании диапазона распределения значений неопределенных параметров.

Объектом исследования является система мониторинга прибрежных территорий (СМПТ), в состав которой входят: оператор (ОП) – человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) – малогабаритный беспилотный летательный комплекс (МБЛК).

Предметом исследования являются структурные связи элементов СМПТ, модели и алгоритмы управления, обеспечивающие точность и быстродействие процесса мониторинга прибрежных территорий.

Цель исследования является повышение эффективности системы мониторинга прибрежных территорий (СМПТ) посредством использования малогабаритного беспилотного летательного комплекса (МБЛК) и разработанных моделей и алгоритмов управления, обеспечивающих повышение быстродействия и точности процесса мониторинга малогабаритных моторных лодок.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

1. Разработана структура системы мониторинга прибрежных территорий роботизированного типа и ее элементов в составе: оператор- человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) - МБЛК.

2. Разработан метод модульного планирования кусочно-линейной траектории движения малогабаритного беспилотного летательного комплекса в режимах автономного движения при мониторинге малогабаритных моторных лодок на прибрежных территориях.

3. Разработаны математические модели и алгоритмы управления, описывающие автономное движение МБЛК по заданной оператором траектории, с учетом свойств средств локальной навигации и окружающей среды, включая влияние внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного типа, действующих на МБЛК.

4. Разработан метод синтеза параметров многоканальной системы управления на основе декомпозиции движения на заданное и возмущенное, включая решение задачи об автономном управлении движением МБЛК по заданной траектории при наличии внешних возмущений.

5. Разработана бортовая система технического зрения, способная реализовать в реальном масштабе времени задачи обнаружения водного транспорта, а также выполнить задачу точной посадки МБЛК на суше и служебно-разъездных катерах.

Научную новизну диссертации составляют:

– структура системы мониторинга прибрежных территорий роботизированного типа, включающая оператора, человеко-машинный интерфейс и МБЛК, отличающаяся от известных наличием аппаратно-программного комплекса оператора и метода модульного планирования траектории движения в виде кусочно-линейных отрезков, позволяющего автоматизировать процесс пространственного зондирования заверенных оператором территорий;

– математическая модель СМПТ, рассматриваемая как человеко-машинная система (ЧМС) в состав которой входят оператор, человеко-

машинный интерфейс и МБЛК; математические модели, описывающие движение МБЛК по заданным траекториям, отличающиеся от известных тем, что движение раскладывается на два вида: 1) движение по заданному закону, позволяет определить вектор управляющих воздействий; 2) возмущенное движение относительно заданного с учетом свойств окружающей среды и средств локальной навигации на основе ультразвуковых, инфракрасных модулей и системы технического зрения для определения корректирующих воздействий;

– метод синтеза многоканального регулятора МБЛК, отличающийся от известных тем, что подбирается такой вектор корректирующих управляющих воздействий, который позволяет оптимизировать параметры регулятора по качественным показателям переходного процесса при движении МБЛК в условиях неполноты информации об окружающей среде;

– многоуровневая аппаратно-программная архитектура системы мониторинга прибрежных территорий, отличающаяся от известных наличием бортовой системы технического зрения, выполняющей автономно высокоточную посадку МБЛК методом визуального распознавания идентификационных маркеров, расположенных на суше и служебно-разъездных катерах, а также распознавание в реальном масштабе времени водного транспорта методом переносного обучения одноэтапной свёрточной нейронной сети, учитывающим качество и вид снимков, а также особенности погодных условий, свойственных прибрежным территориям.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в исследовании системных связей и закономерностей функционирования и развития СМПТ. В результате взаимодействия элементов удается обеспечить эффективное быстродействие и точность позиционирования МБЛА при выполнении задач мониторинга морских судов, при этом оптимизируется процесс взаимодействия между оператором и МБЛК. Практическая значимость работы состоит в создании прототипа СМПТ на основе

разработанной структуры, которая может быть использована для проведения исследований в рамках решения задач мониторинга морского транспорта.

Работа выполнена в соответствии с научным направлением Юго-Западного государственного университета, результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс Юго-Западного государственного университета, прошли испытания в ООО «Аэроб» и ООО «РД-Хели». Кроме того, основные результаты диссертационного исследования апробированы научно-исследовательским центром военно-воздушных сил Республики Эквадор (CIDFAE) с целью модернизации и оптимизации применяемых в настоящее время технологий для выполнения задач по контролю и обеспечению безопасности прибрежных территорий страны.

Методология и методы исследования. Математические модели и алгоритмы управления построены на принципе декомпозиции управляющих воздействий. Оператор создает полетное задание в виде составления траектории движения МБЛА, состоящей из массива точек GPS координат, затем эти данные передаются в блок планирования траектории модуля управления, где производится расчет траектории движения и создается основное управляющее воздействие, обеспечивающее движение по заданной траектории. Наличие возмущающих воздействий и помех, определяемых контуром обратной связи, необходимо устранить посредством создания контура корректирующего управления, целью которого является устранение возникших отклонений. Данная стратегия управления обеспечивает быстрое и точное движение БПЛА при выполнении задач мониторинга. Для решения вышеупомянутых задач использовались методы системного анализа, проектирования технических систем экологического назначения, теории автоматического управления, теоретической механики, методы математического моделирования динамических систем, методы оптимального планирования и проектирования, основанные на многомерном зондировании

пространства. При создании программных продуктов использованы математические пакеты MathCAD, MATLAB.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели и алгоритмы управления, построенные на принципе декомпозиции управляющих воздействий, позволяют оператору планировать и задавать координаты точек для проведения задач мониторинга водного транспорта в автономном режиме.

2. Метод зондирования прибрежных территорий на основе модульного планирования траектории движения малогабаритным беспилотным летательным комплексом в виде кусочно-линейных отрезков траектории позволяет обеспечить максимальное быстродействие процесса пространственного зондирования заверенных оператором территорий.

3. Математические модели заданного и возмущенного движения малогабаритного беспилотного летательного комплекса позволяют определить управляющие и корректирующие факторы и обеспечивают движение по траектории при выполнении мониторинга водного транспорта на выбранной оператором территорий.

4. Алгоритмы управления системы мониторинга прибрежных территорий позволяют обеспечить автономное движение малогабаритного беспилотного летательного комплекса по заданным оператором точкам при наличии внешних возмущающих воздействий с учетом свойств окружающей среды.

Степень достоверности и апробации результатов работы. Основные научные результаты диссертации получены на основе математического моделирования; теории систем, автоматического управления и механики; а также методов экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований согласованы с теоретическими результатами. Результаты научных экспериментальных исследований согласуются с теоретическими положениями. Результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на

международных и всероссийских семинарах и конференциях: семинаре по современным материалам и технологиям в авиационной промышленности «CMTAI2016» (Москва, 2017), XII Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2017), XIV Международной научной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Курск, 2019), семинаре по материалам и аэронавтике «MEA2019» МАИ (Москва, 2019), IV Международной конференции по информационным системам и компьютерным технологиям «INCISCOS2019» (Кито, 2019), VI Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2020), XV Международной научной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Уфа, 2020), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям, FarEastCon2020, (Владивосток, 2020), семинаре по материалам и аэронавтике «MEA2020» МАИ (Москва, 2020), XVI Международной конференции «Завалишинские чтения» (Санкт Петербург, 2021), Международном конгрессе в области мехатроники «CIME2022» (Кито, 2022), Международной конференции по прикладной инженерии и инновационным технологиям «AENIT2024» (Ибарра, 2024), на научно-технических семинарах кафедры механики, мехатроники и робототехники (Курск, 2018-2025) и другие.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 29 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по специальности диссертации, 14 публикаций в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus, 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 120 наименований. Основная часть работы изложена на 173 страницах машинописного текста, включая 112 рисунков и 16 таблиц.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Обзор методов мониторинга прибрежных территорий

Мониторинг представляет собой комплексный процесс систематического или непрерывного наблюдения и сбора информации о параметрах сложного объекта, позволяющих провести оценку и прогнозирование тенденций изменения его параметров [1-3].

В диссертационной работе особый интерес представляет мониторинг морских прибрежных территорий. Выбор связан с тем, что зоны выхода к морю имеют стратегическое значение для любого государства, с точки зрения торгово-экономической, производственной, политической и оборонной деятельности [7-9]. Основными объектами, в отношении которых могут применяться системы мониторинга являются: водные ресурсы, инфраструктура, водный транспорт и предупреждение чрезвычайных ситуаций [2-6,9-12]. При проведении мониторинга морских прибрежных территорий могут быть решены следующие задачи (рисунок 1.1).



Рис.1.1. Основные направления мониторинга морских прибрежных территорий

Для прибрежных стран и международного судоходства актуальным является вопрос о защите суверенитета и территориальной целостности. В связи с этим, необходимо осуществлять периодические работы по мониторингу водного транспорта, служащего в качестве основного средства перевозки населения и продукции [7,12,13]. Мониторинг водного транспорта ведется с целью контроля передвижения судов, предотвращения аварийных ситуаций, выявления незаконной добычи природных ресурсов и торговли, проведения миграционного контроля и обеспечения безопасности границ, осуществления розыскных и оперативных мероприятий [2,8,10,13].

Контроль деятельности, осуществляемой на прибрежных территориях, может быть проведен двумя способами: традиционным и дистанционным (рисунок1.2).

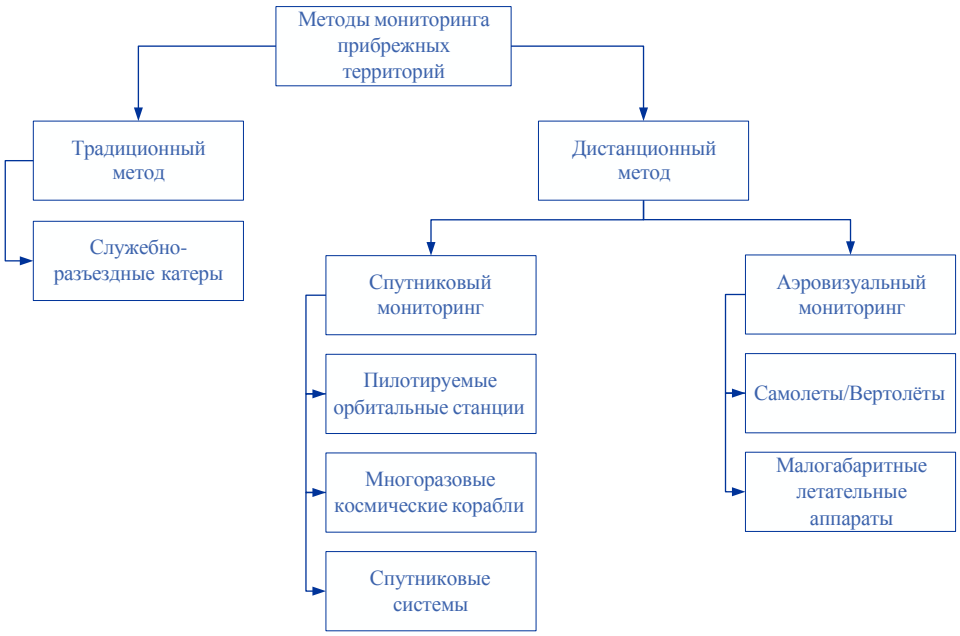


Рис.1.2. Методы мониторинга прибрежных территорий

Традиционный метод включает в себя инспекционный осмотр водного транспорта сотрудниками государственных служб путем использования служебно-разъездных катеров [13,14,19].

Дистанционный метод базируется на спутниковом и аэровизуальном видах мониторинга. Спутниковый мониторинг основан на использовании снимков с действующих космических комплексов таких, как: пилотируемые

орбитальные станции, многоразовые космические корабли, спутниковые системы. Аэровизуальный мониторинг осуществляется на основе фото и видеоматериала, полученного при помощи летательных аппаратов [7-9,13-18].

Одним из наиболее важных преимуществ дистанционного метода является возможность быстрого и эффективного обследования труднодоступных и протяженных участков местности, а также способность нести полезную нагрузку, позволяющую осуществлять задачи мониторинга на основе измерительных приборов.

Спутниковые системы, расположенные на околоземных орбитах, имеют возможность охватывать большую площадь исследуемых территорий на высоких дистанциях. Однако высокая стоимость внедрения и сопровождения эксплуатации технологии, не ремонтопригодность, ограниченная оперативность работы (1,5 часа 3 раза в сутки), необходимость обновления группировки спутников (приблизительно 1 раз в 3 года) и др. приводят к тому, что в последнее время при выполнении дистанционного обследования территорий кроме традиционных летательных аппаратов самолетного или вертолетного типа получают распространение малогабаритные летательные аппараты (МБЛА), представляющие более оптимальный вариант с точки зрения стоимости внедрения, ремонта и эксплуатации, включая возможность проведения задач мониторинга в реальном времени [8,10,15,18,19].

1.2. Основные факторы появления неопределенностей в системе мониторинга прибрежных территорий

Процесс мониторинга характеризуется появлением неопределённых параметров, оценка и устранение которых обычно является сложной задачей. Принято выделять два вида неопределенных параметров: внутренние и внешние [20,21].

К внутренним параметрам можно отнести: помехи, возникающие в результате сбоя аппаратных и программных составляющих, включая отказ в работе электромеханических компонентов, неисправность бортовых

измерительных приборов, сбой программного обеспечения МБЛА и др. Среди внешних параметров следует отметить непредсказуемость поведения воздушной и водной среды, а также отсутствие прямого визуального обзора местности оператором [21].

В рамках диссертационной работы особый интерес представляет вопрос воздействия внешних параметров на стабилизацию и точность позиционирования МБЛА. При этом, под неопределенными внешними параметрами будем понимать возникновение закручивающих ветровых потоков или кратковременных возможных порывов ветра, в отношении которых отсутствует информация, кроме возможных границ их значений [20-22]. Эффективным способом подавления внешних воздействий является оценка их характеристик путем моделирования аэродинамических эффектов, вызванных ветровым возмущением. В работе М.А. Ковалёва, А.А. Назарова и др. [23] осуществляется определение воздушной скорости на основе информации, поступающей из ГЛОНАСС/GPS модулей, а также формирования дисперсионных матриц погрешностей прогноза и оценивания ветровых возмущений. В статье К.С. Амелина, О.Н. Граничина и др. [24] предлагается алгоритм оценки скорости и направления ветра с использованием метода стохастической аппроксимации одновременных возмущений (SPSA). В зарубежных трудах авторов Y. Yang, X. Liu и др. [25] определяются ветровые возмущающие эффекты посредством применения бортовой системы измерительных приборов, включающей GPS и инерциальные модули, магнитометр, барометр и датчик воздушной скорости. Информация обрабатывается нелинейным наблюдателем на основе фильтра Калмана. Также в работе F. Schiano, J. Alonso-Mora и др. [26] в аэродинамической трубе проводятся лабораторные испытания по оценке влияния продольного и бокового случайного ветрового потока на коэффициенты тяги, подъемной силы и стабилизации летательного аппарата путем использования датчика давления и анемометра. Аэродинамическая модель системы проверяется в реальных условиях.

Получение полной информации о аэродинамических характеристиках воздушного пространства позволяет решать задачу синтеза законов управления, обеспечивающих устойчивое движение МБЛА по заданной траектории в условиях действий ветровых возмущений.

Один из подходов к проектированию автономной системы управления МБЛА заключается в моделировании математической модели, учитывающей вызванные аэродинамические эффекты внешним ветровым возмущением [21, 27]. Однако, воздушные массы на прибрежных территориях периодически находятся в движении из-за солнечного нагрева, вращения Земли или различных термодинамических и электромагнитных процессов, поэтому аэродинамическая модель атмосферы изменяется в пространстве и во времени [21, 28]. В связи с этим, существует другой подход, цель которого заключается в полном устранении требования к точному моделированию внешних возмущающих воздействий в системе или архитектуре законов управления МБЛА, опираясь исключительно на данные, полученные от измерительных приборов системы [29, 30]. Главным достоинством данного метода является способность изменить параметры регулятора или его структуру в зависимости от изменения параметров МБЛА или возмущающих нагрузок, действующих на него. Основой служат адаптивные и интеллектуальные алгоритмы управления, описанные в п.п. 1.3,1.4.

1.3. Обзор методов управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

В последнее время разработка малогабаритных беспилотных летательных аппаратов является динамично развивающимся направлением [2, 9, 12, 31]. Однако экспертная оценка современного состояния робототехники показывает, что существуют проблемы в вопросах научно-технического задела применительно к исследованию и разработке методов и алгоритмов автономного управления, способных обеспечить требования точности позиционирования и устойчивости летательного аппарата в условиях

неопределенностей внешних параметров при выполнении полетных заданий [32, 33, 34, 35]. До конца 30-х годов XX века управление летательными аппаратами осуществлялось пилотом вручную, на основе визуального ориентира с использованием информации, поступающей из бортовых измерительных приборов [34, 35]. В настоящее время на бортовую систему автоматического управления (САУ) МБЛА возлагаются функции управления, сложно выполнимые для оператора. К числу наиболее важных задач следует отнести: посадку при ограниченной или недостаточной видимости, автономное управление движением на всех стадиях полета согласно установленным алгоритмам, включая облет статических или динамических препятствий, навигацию в ограниченном пространстве, а также в случае отсутствия сигнала спутниковой системы связи, и др. С расширением спектра задач, выполняемых МБЛА, возникает необходимость в усовершенствовании существующих или создании новых алгоритмов управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям окружающего пространства [20, 22]. Разработчиками в различных странах исследовано множество стратегий управления МБЛА. Основные алгоритмы управления могут быть классифицированы по следующим категориям: линейные, нелинейные и интеллектуальные [20, 29, 31, 34, 36].

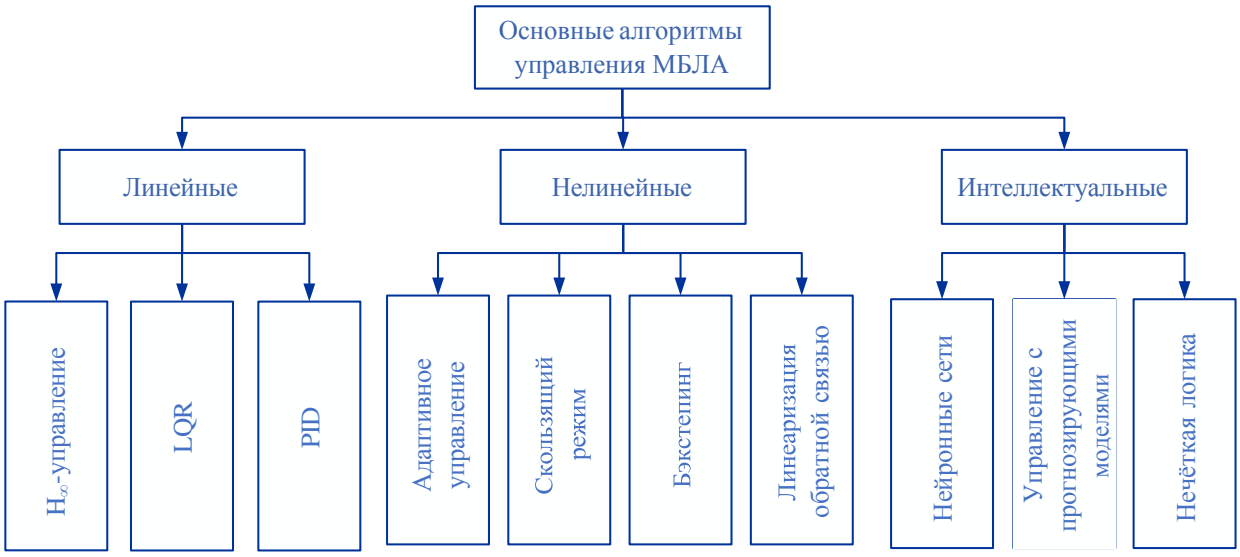


Рис. 1.3. Классификация алгоритмов управления МБЛА

Среди наиболее распространенных линейных алгоритмов управления МБЛА можно отметить: классический пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (англ. PID), линейно-квадратичный регулятор (англ. LQR) и H∞-управление (англ. H-Infinity Control). Данные методы широко применяются при решении задач стабилизации и зависания МБЛА и представляют собой эффективный метод, требующий минимальных вычислительных операций и обеспечивающий робастность системы относительно некоторого состояния равновесия. Синтез линейных алгоритмов управления реализуется на основе линеаризованной динамической модели МБЛА, что может привести к неустойчивости полета при периодически изменяющихся аэродинамических характеристиках воздушного пространства (порывы ветра, турбулентность и др.). При этом, одним из способов улучшения динамических характеристик системы является совместное использование интеллектуальных методов, таких как: нечеткая логика (англ. Fuzzy Logic), рой частиц (англ. PSO), нейронные сети (англ. Neural Networks) и др. для автоматической настройки параметров линейного регулятора. Это позволяет увеличить надежность и производительность, минимизировать энергопотребление, улучшить динамические характеристики и точность позиционирования МБЛА при условиях неопределенности [20, 21, 27, 29, 30, 36].

С другой стороны, учитывая избыточные и нелинейные характеристики, а также высокую чувствительность системы к внутренним и внешним возмущениям, возникает необходимость использования надежных алгоритмов на основе нелинейной динамики полета МБЛА, обладающих приемлемыми характеристиками и свойствами робастности в соответствии с установленными критериями. К числу наиболее эффективных нелинейных алгоритмов, применяемых на сегодняшний день, относятся: линейное управление с обратной связью (англ. Feedback Linearization), метод управление со скользящим режимом (англ. Sliding Mode Control) [37], Бэкстеппинг (англ. Backstepping) [38], адаптивное управление (англ. Adaptive

Control) [22, 29]. Однако, при синтезе нелинейных алгоритмов управления, значения параметров, соответствующие принятым в математической модели допущениям и характеристикам действующих возмущений на МБЛА, остаются постоянными во времени или ограничиваются интервалом, в пределах которого эти параметры могут варьироваться. Это может привести к неполной адекватности работы системы реальным процессам, происходящим в МБЛА, а затем к существенным отклонениям системы, включая потерю устойчивости и управляемости.

В последнее время, в силу увеличения требований к степени автономности МБЛА и способности ими самостоятельно принимать решение в ходе выполнения поставленных оператором задач в условиях неполноты информации и различных видов неопределенностей (изменяющиеся условия и режимы эксплуатации, сбой аппаратных или программных модулей), широкое распространение получают методы интеллектуального управления, которые повышают функциональные возможности и эффективность выполняемых технологических операций, позволяют осуществить процесс управления МБЛА со стороны оператора на уровне постановки цели, используя человеко-машинный интерфейс как средство взаимодействия с оборудованием и окружающей средой [39]. Наиболее часто применяемых методов интеллектуального управления МБЛА, основываются на алгоритмах нечеткой логики, нейронных сетей, управления с прогнозирующей моделью (англ. Model Predictive Control) и др. [29, 36]. При этом, применение интеллектуальных алгоритмов управления МБЛА усложняется рядом причин, одной из которых является необходимость сохранить баланс между вычислительными требованиями к бортовой системе управления и потреблением энергоресурсов. Это сказывается на производительности и точности выполнения МБЛА задач, заверенных оператором. В связи с этим, возникают противоречивые критерии технических требований по созданию МБЛА и ограниченных возможностей, применяемых на сегодняшний день алгоритмов управления автономным движением МБЛА. В результате анализа

наиболее перспективных и часто применяемых алгоритмов управления МБЛА [29, 36, 40, 41] была проведена оценка их основных показателей, которые представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Оценка показателей основных алгоритмов управления МБЛА

	Алгоритмы управления	Показатель							
		Робастность	Адаптивность	Оптимальность	Интеллектуальность	Быстродействие	Точность	Простота	Шумоподавление
1	ПИД	1	0	1	0	2	1	2	0
2	ЛКР	0	1	0	0	1	0	1	1
3	H∞-управление	2	1	1	0	0	1	0	1
4	Линейное управление с обратной связью	1	1	1	0	1	2	0	1
4	Бэкстеппинг	0	2	0	0	0	1	0	2
5	Скользящий регулятор	1	2	1	0	1	2	1	2
6	Адаптивное управление	1	2	1	1	1	2	1	1
7	Нечетная логика	1	1	1	2	1	1	1	1
8	Управление с прогнозирующей моделью	1	2	2	2	1	2	1	2
9	Нейронные сети	1	2	1	2	1	1	0	1

где, 0 - низкий, 1 - средний, 2 - высокий показатель.

Один из оптимальных подходов в теории управления автономными робототехническими системами заключается в использовании комплексных критериев посредством совместного использования двух или больше алгоритмов управления, выбор которых зависит от вида задач, возлагаемых на МБЛА.

В диссертационной работе предлагается использовать оптимальный способ управления МБЛА, сочетающий в себе применение классического PID регулятора и интеллектуального метода управления с прогнозирующей моделью (MPC). Данный метод позволит увеличить производительность, минимизировать энергопотребление, улучшить точность позиционирования МБЛА в зависимости от изменения внешних возмущений окружающей среды.

1.4. Системы управления БПЛА с прогнозирующими моделями (MPC)

Интеллектуальные системы управления сложными динамическими объектами являются на сегодняшний день перспективным направлением исследования. Однако реализация интеллектуального управления такими системами сопряжена с рядом затруднительных факторов, к которым можно отнести сложность синтеза объективных и полных знаний, осуществляемого как автоматически (в отсутствии требуемой обучающей выборки), так и экспертами. Кроме того, под затруднительными факторами следует понимать распределенность параметров объекта управления, нелинейность, присущие характеристики запаздывания, неполнота информации о внешних воздействиях или состоянии объекта, наличие существенных помех, включая периодическое изменение целей, критериев или ограничений [42].

Согласно оптимальной теории управления, способность системы самостоятельно обучаться и адаптироваться к ранее перечисленным вариационным факторам определяет качество процесса управления. При этом, процесс обучения чаще всего происходит на основе априорной информации об объекте управления и внешней среде, или на базе обработанных данных о функционировании робототехнического устройства при экспериментальных испытаниях. Однако даже такая система не будет являться полностью адаптируемой.

В связи с этим, возникает необходимость в синтезе методов с прогнозирующими моделями (MPC). Системы MPC-управления начали развиваться в начале 60-х годов XX века для управления процессами и оборудованием в нефтехимическом и энергетическом производстве. В настоящее время, в силу развития и увеличения вычислительных способностей микропроцессорной техники, MPC-управление является перспективным методом, применяющимся в авиации, судоходстве, робототехнике и других областях [43-45].

Основное достоинство метода MPC заключается в относительной простоте формирования базовой схемы обратной связи и возможности

учитывать прогнозируемую информацию, что позволяет управлять многомерными и многосвязными объектами со сложной структурой, проводить оптимизацию процессов в режиме реального времени с учетом ограничений на управляющие и управляемые параметры, а также учитывать неопределенности в задании модели объектов и возмущений [44,45]. Следовательно, MPC-управление можно представить как многопараметрический алгоритм, использующий нелинейную динамическую модель объекта управления, что позволяет прогнозировать значения вектора управляемых параметров в пределах скользящего временного горизонта.

Согласно рисунок 3, значения вектора управляемых параметров $\bar{y}(t)$, прогнозируемые в определенный момент времени *t*, обозначены как $\hat{y}(t)$. Горизонт прогнозирования *N* строится на определенное число шагов вперед. Корректировка значений вектора управляемых параметров производится путем нахождения некоторой последовательности значений вектора управляющих параметров $\bar{u}(t)$. Длина последовательности рассчитываемых управляющих параметров является фиксированной величиной и называется горизонтом управления *P*.

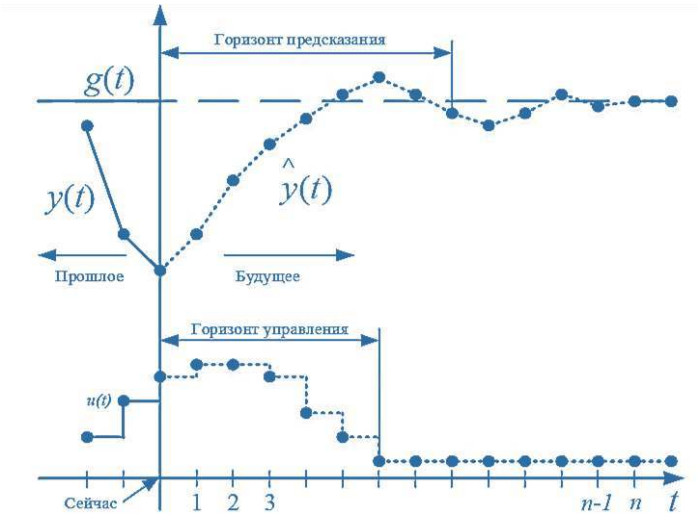


Рис.1.4. Оптимизация вектора управляющих воздействия $\bar{u}(t)$ при помощи MPC-управления

Искомая последовательность значений вектора управляющих параметров определяется в результате решения задачи оптимизации, для

которой необходимо использовать некоторую целевую функцию, которая содержит квадрат рассогласования между управляемыми $y(t)$ и желаемыми $g(t)$ параметрами объекта управления (рисунок 1.5).

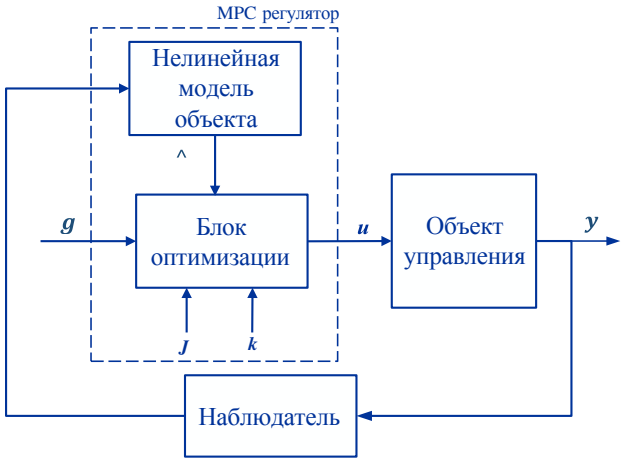


Рис. 1.5. Общая структурная схема MPC-управления

В процессе поиска оптимальных значений вектора управляющих параметров, регулятор стремится минимизировать функционал качества J по алгоритму квадратичного программирования [44] с учетом существующих ограничений на управляющие и управляемые параметры k. Функционал качества может быть представлен следующим выражением [45]:

$$J = \sum_{i=1}^{N} \|\bar{g}(i) - \bar{y}(i)\|^2 \qquad (1.1)$$

При этом, точность прогнозируемого вектора управляющих параметров $\bar{u}(t)$ в последующем интервале времени зависит от качества значений вектора управляемых параметров $\bar{y}(t)$. В этой связи, возникает необходимость спроектировать наблюдатель (например, на основе фильтра Калмана) [44], служащий в качестве обратной связи системы управления. Процедура оптимизации повторяется циклично с учетом вновь поступившей информации.

1.5. Методы обнаружения объектов на прибрежных территориях

Традиционные методы мониторинга прибрежных территорий включают в себя систему обнаружения объектов, позволяющую осуществлять контроль морского транспорта, определение его местонахождения и слежение

маршрута. При этом, основой системы обнаружения объектов служат морские радары и модули спутниковой связи. Однако для расширения функциональных возможностей системы мониторинга СМПТ, на борту МБЛК необходимо использовать современные методы, основанные на стратегиях машинного обучения. Данные методы обеспечивают автоматизацию процесса обнаружения и оценки состояния объектов, находящихся на прибрежных территориях посредством фото или видеоматериала, поступающего от видеокамер, электрооптических или инфракрасных датчиков (рисунок 1.6).

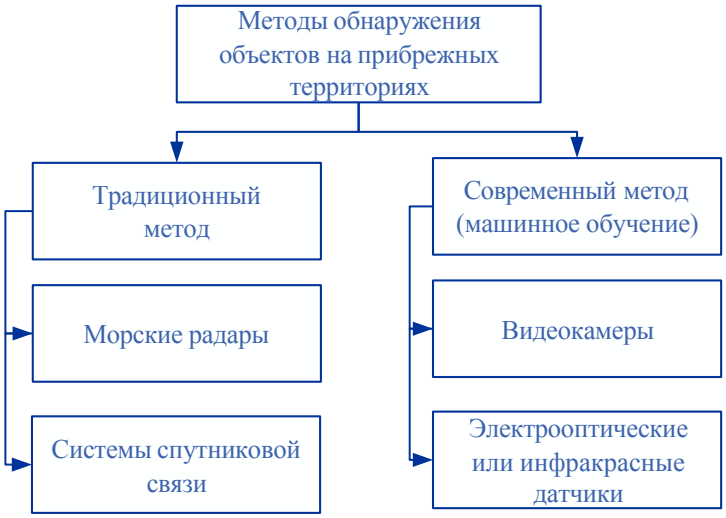


Рис.1.6. Методы обнаружения объектов на прибрежных территориях

Использование морских радаров предполагает обнаружение морского транспорта путем генерации радиоимпульсов СВЧ-излучения, которые позволяют извлекать необходимую информацию о присутствии и отслеживании судов в определенном диапазоне. Однако точность системы сильно снижается при попытке обнаружить небольшие суда (яхты, парусники, катера, и др.). Системы связи, основанные на технологиях спутниковой навигации (GNSS) и автоматической идентификации (IAS) позволяют производить обнаружение судов, а также определить их скорость, направление и местонахождение на основе искусственных спутников, расположенных на околоземных орбитах. Использование спутников является целесообразным решением для обнаружения крупных судов (трансатлантических или грузовых), находящихся в открытом море, при

условии, что службы геолокации водного транспорта находятся в открытом доступе. В связи с этим, использование спутниковых систем связи для обнаружения морских судов, находящихся вблизи портов или прибрежных территорий, является неэффективным решением [46-48].

В последнее время задачи распознавания визуальных образов и классификации объектов осуществляется при помощи систем технического зрения (СТЗ) на основе алгоритмов машинного обучения, результаты которых обеспечивают быстродействие и точность обнаружения цели [46, 48, 59]. Система технического зрения включает в себя видеокамеру, электрооптические или инфракрасные датчики и вычислительное устройство. Значительный прогресс приобрели алгоритмы машинного обучения для распознавания образцов посредством использования свёрточных нейронных сетей (СНС) [46, 47, 54-59]. Наиболее перспективными являются детекторы, выполненные на основе алгоритмов R-FCN, Faster R-CNN, Multibox, SSD, YOLO и др. [46, 48-52, 54]. Эти алгоритмы обеспечивают баланс между точностью детектирования, энергопотреблением и быстродействием бортового вычислительного устройства, установленного на борту роботизированных мобильных платформ. Алгоритм YOLO (англ. You Only Look Once) в силу упрощенной архитектуры нейронной сети позволяет осуществлять задачу распознавания объектов в реальном времени на базе современных вычислительных устройств таких производителей, как NVIDIA, RaspberryPi и др. [52, 53, 55, 58].

1.6. Система технического зрения для обнаружения водного транспорта

В настоящее время актуальным остается вопрос о создании систем технического зрения (СТЗ), позволяющих на борту роботизированных мобильных платформ осуществить в реальном времени обработку видеопотока, представленного в виде набора последовательных изображений для решения задач распознавания, отслеживания, классификации и сегментация объектов различной физической природы (транспортные

средства, технологические объекты, люди и др.), включая определение их пространственных координат. По мнению многих исследователей [53, 58-62], эффективным способом аппаратной реализации мобильных СТЗ является применение свёрточных нейронных сетей (СНС), архитектура которых предполагает наличие свёрточных (англ. convolutional layers), подвыборных (англ. pooling layers) и выходных слоёв (рисунок 1.7).

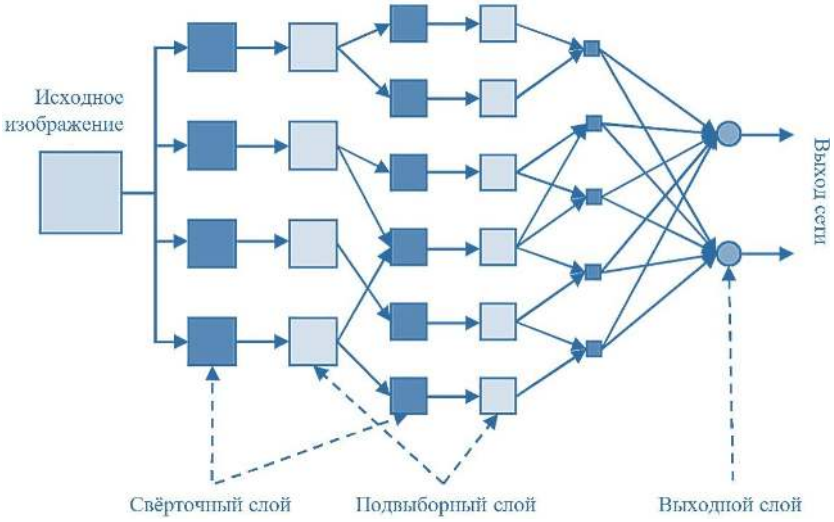


Рис.1.7 Архитектура сверточной нейронной сети

Основой для каждого свёрточного слоя служит процедура свёртки, цель которой заключается в получении двухмерной матрицы коэффициентов, так называемой карты признаков путем применения фильтра к изображению (рисунок 1.8).

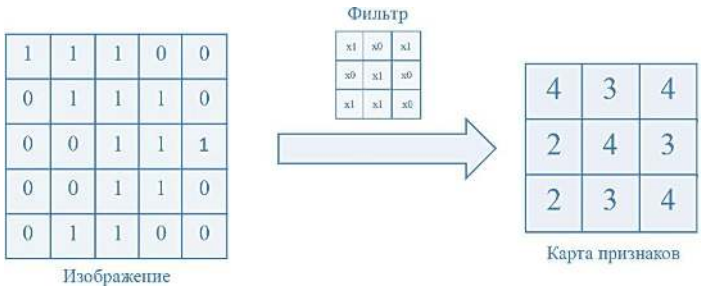


Рис.1.8. Операция свертки для формирования карты признаков

СНС строится посредством чередования слоёв свертки и подвыборки. Процедура подвыборки уменьшает размерность каждой карты признаков изображения, увеличивает степень инвариантности применяемых к нему фильтров и позволяет распознавать иерархию признаков. В результате этих действий, карты признаков изображения преобразуются в вектор или скаляр

вероятности. Затем, выходной (полносвязный) слой реализует задачи классификации и распознавания объектов на изображении посредством некоторой функции активации нейронов. При этом, характер функции активации определяет функциональные возможности и метод обучения нейронной сети. В силу быстродействия и отсутствия ресурсоемких требований к проведению вычислительных операций, СНС чаще всего используют линейную функцию активации ReLU (англ. Rectified Linear Unit) [55, 60]. Следует отметить, что архитектура каждой нейронной сети класса СНС определяется количеством и параметрами свёрточных и подвыборочных слоёв. Среди наиболее эффективных архитектур СНС можно отнести: LeNet5, AlexNet, ResNet, YOLO [53, 55, 59, 60]. На сегодняшний день, аппаратная реализация мобильных СТЗ предпочитается реализовать при помощи архитектуры YOLO, которая обладает приемлемой точностью распознавания объектов на изображениях при относительно низких требованиях по вычислительным ресурсам. Данный алгоритм был предложен Джозефом Редмоном (анг. Joseph Redmon) [46, 63] и представляет собой единую нейронную сеть, которая применяется ко всему изображению, предсказывая координаты обрамляющих окон (англ. bounding boxes) и вероятность нахождения в них объектов различных классов, что обеспечивает высокую скорость по сравнению с другими существующими алгоритмами (рисунок 1.7).

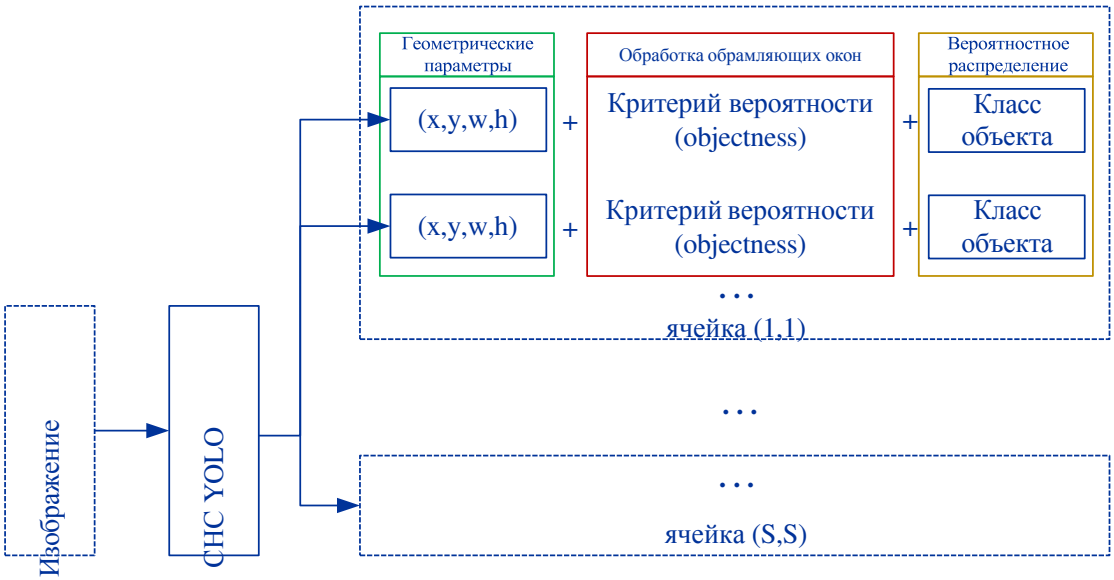


Рис. 1.9. Общая схема реализации алгоритма YOLO

Согласно рисунок 1.9 на исходное изображение наносится сетка размером *SxS*, в то время как процесс обучения и обработки изображения осуществляется внутри СНС YOLO. В результате этих действий образуется некоторая многомерная матрица изображения (тензор), которая содержит информацию о каждой ячейки сетки в виде вектора $\boldsymbol{\sigma}_i = [x, y, w, h, p, c]^T$, где *x*, *y* – координаты геометрического центра ячейки сетки; *w*, *h* – параметры ширины и высоты обрамляющего окна относительного всего изображения; *p* –вероятность того, что объект располагается в данной ячейке (англ. objectness); *c* – класс объектов мониторинга [46, 53].

Далее, для нанесения на изображении обрамляющих окон необходимо обнулить ячейки, неудовлетворяющие некоторому пороговому значению $p<\eta$, выбрать ячейку с наибольшим значением по критерии вероятности *p* в качестве геометрического центра искомого объекта, а также пренебрегать пересекающиеся окна, соответствующие одному и тому же объекту [53].

Важным этапом при создании СТЗ является процесс обучения нейронной сети, эффективность которого высказывается на быстродействие и точность обнаружения объектов. Данная процедура производится на основе большого набора данных (англ. dataset). В зависимости от требований к выполнению конкретной задачи можно использовать предобученные модели YOLO предложены ведущими технологическими компаниями в области компьютерного зрения, такие как Pascal VOC, ImageNet, MS COCO и др. [53-55]. Однако наиболее перспективным является реализация процесса обучения с переносом (англ. transfer learning) [46, 47, 53, 55], при этом подходе за основу берется уже обученная сеть, перенимается структура базовой сети, а её веса используются для инициализации обучаемой нейронной сети.

Программная реализация СНС может осуществляться на разных языках программирования под разные платформы (англ. framework), среди которых следует отметить Darknet, Caffe, Tensorflow, Pytorch и др. [53]. Выбор платформы опирается на потребление процессорных ресурсов и оперативной памяти, сложность архитектуры и совместимость с другими платформами,

направленность решаемой задачи и наличие пакетных инструментов для сбора, обработки и визуализации данных, и т.п. С точки зрения точности распознавания морских объектов на побережье или в открытом море, задача создания мобильной системы технического зрения для обладает рядом сложностей, связанных с такими факторами, как: искажение, изменяющиеся высота и вид съемки с летательного аппарата; отражение солнца или отсутствие освещения; погодные условия, образование волн или пены; малая площадь, занимаемая морским транспортом и незначительная признаковая информация на изображениях и др. [46, 47]. Схема реализации мобильной СТЗ для обнаружения морского транспорта представлена на рисунке 1.10.

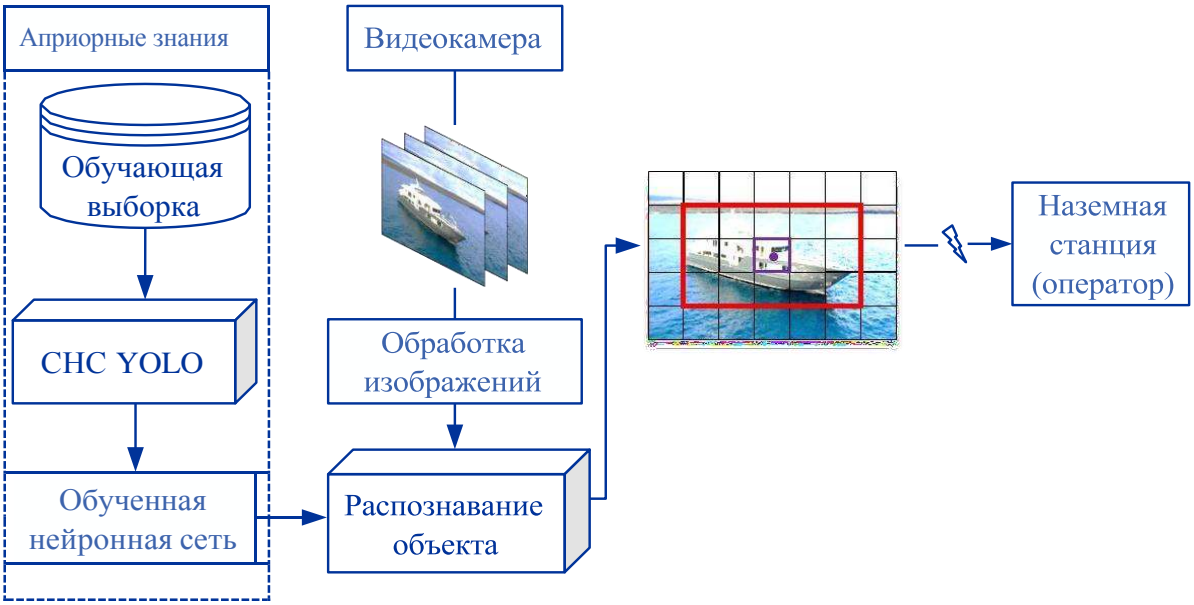


Рис. 1.10. Схема реализации СТЗ для обнаружения морского транспорта

1.7. Обзор существующих конструкций БПЛА

Один из наиболее прогрессивных методов осуществления задач мониторинга протяженных или труднодоступных территорий заключается в проведении комплексных мероприятий, основанных на периодическом наблюдении посредством использования систем аэрокосмического базирования (авиационные и спутниковые системы), осуществляющих сбор информации аппаратурой дистанционного зондирования в видимом, инфракрасном или радиоволновом диапазонах [46, 64]. Однако несмотря на

возможность аэрокосмических технологий охватывать большие территории, при проведении разведывательных и оперативных мероприятий специалистам необходимо проследить в реальном времени за динамикой развития событий. Кроме того, спутники имеют ограниченную оперативность работы, в то время как эксплуатация обычных авиационных систем является дорогостоящей и характеризуется повышенным риском. Это привело к распространению малогабаритных летательных аппаратов (МБЛА), представляющих собой эффективный инструмент для оперативного получения качественных пространственных и спектральных характеристик исследуемых объектов при относительно невысокой стоимости эксплуатации. Более того, актуальность создания и использования роботизированных мобильных платформ воздушного базирования отражается в п. 1.2 «Мехатронные системы управления с элементами искусственного интеллекта» и п. 3.2 «Создание систем роботов и машин, способных заменить труд человека в сложных и опасных условиях» Плана фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 года, в п. 6.1 «Робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения» Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 623 от 16.12.2015 г., а также в п. 1.5 «Разработка математического и программного обеспечения проблемно-ориентированных и информационно-управляющих систем интеллектуальных роботов различных типов» Программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на период до 2030 г. Кроме того, необходимость создания интеллектуальных робототехнических платформ воздушного базирования подтверждается Планом интегральной безопасности на 2019-2030 гг. [65], утвержденным Правительством Республики Эквадор, одно из направлений которого заключается в развитии инновационных и высокотехнологических решений по обеспечению безопасности, управлению рисками и проведению поисково-спасательных операций на сухопутных и морских границах страны. В этой связи, в разных

странах активно ведутся исследования по разработке и созданию роботизированных мобильных платформ воздушного базирования. Примерами могут служит роботы ScanEagle (Корпорация «Insitu Inc.», США), Горизонт Эйр S-100 (ОАО «Горизонт», Россия), Maritime Heron (Концерн «IAI», Израиль), Fulmar X (Группа «Thales», Испания), Gavilan-2 (НИЦ «CIDFAE», Эквадор) и другие.

1.7.1. Общая классификация БПЛА

Беспилотный летательный аппарат – это летательный аппарат без экипажа на борту. БПЛА могут обладать разной степенью автономности – от управляемых дистанционно до полностью автоматических, а также различаться по конструкции, назначению и множеству других параметров. Общая классификация БПЛА предлагается ввести по следующим критериям [66]:

а) По виду управления

По виду управления БПЛА подразделяются на: неуправляемые, автоматические, дистанционно-пилотируемые.

б) По массе, времени и высоте полета

БПЛА можно классифицировать по таким взаимосвязанным параметрам, как: масса, время и высота полёта:

- микро – массой до 10 кг., временем полёта около 1 ч. и высотой до 1 км.;
- мини – массой до 50 кг., временем полёта несколько часов и высотой до 3 – 5 км.;
- средние – до 1 000 кг., временем полё 10 – 12 ч. и высотой до 9 – 10 км.;
- тяжёлые – с высотами полёта до 20 км. и временем полёта 24 ч. и более.

в) По дальности полета:

- микро и мини БПЛА - дальность полета до 150 км;
- средне и тяжелые БПЛА - дальность полета до 300 км;
- боевые БПЛА – дальность полета до 1500 км.

г) По количеству винтов:

В соответствии с рисунком 1.11 также можно различать БПЛА по количеству винтов: с тремя (трикоптер), четырьмя (квадрокоптер), шестью (гексокоптер), восьмью (октокоптер) и т.д. электродвигателями с винтами. Винты могут быть расположены на электродвигателе, как по одному, так и по два (коаксиально).

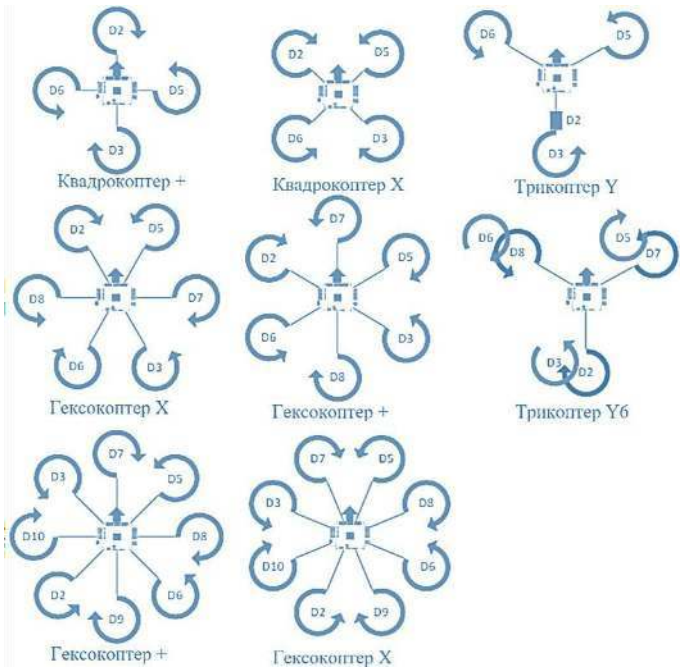


Рис.1.11. Классификация основных видов мультироторных систем

д) По типу взлета и посадки

По типу взлета и посадки различают следующие БПЛА:

- с посадкой по самолётному принципу;
- вертикально по вертолётному принципу;
- с помощью парашюта.

е) по назначению

- видеонаблюдение с целью охраны различных объектов и опасных природных явлений (паводков, извержений вулканов, лавиноопасных горных районов и др.);
- картографирование земной поверхности;
- разведка и составление планов помещений внутри разрушенных или опасных зданий;

- поиск полезных ископаемых с помощью специальных средств зондирования;
- нанесения ударов по наземным, морским или воздушным целям;
- мониторинг нефтегазовых объектов;
- видео- и фотосъемка труднодоступных промышленных объектов (линий электропередач, опор мостов, дымовых труб, ветрогенераторов, антенн и т.п.);
- видео- и фотосъемка объектов архитектуры, природы, бизнеса, а также массовых мероприятий с целью презентации или рекламы;
- метеорологические наблюдения;
- экологический мониторинг атмосферы и поверхности водоемов;
- наблюдение за дикими животными в заповедниках;
- доставка грузов и подобные задачи;
- распыление химикатов и внесение удобрений на полях;
- доставка медикаментов и медоборудования для пострадавших в зоны аварий и катастроф;
- эвакуация пострадавших из зоны бедствия;
- ретрансляция радиосигналов с целью увеличения дальности действия каналов связи;
- установка на борту громкоговорителей для воспроизведения звука: команд, музыки и т.п.

1.7.2. Малогабаритные беспилотные летательные комплексы (МБЛК)

В настоящее время малогабаритные беспилотные летательные аппараты нашли свое применение как в военном, так и в гражданском секторе. МБЛА гражданского применения появились в 2000 г. и активно развиваются в технологическом плане за счет своей узкой специализации и малых объемов производства. Быстродействие МБЛА достигается за счет использования различных кинематических схем, а также развитых электромеханических

систем, оснащенных устройствами контроля тягового усилия [67]. Основные плюсы МБЛА перед пилотируемыми самолетами, следующие:

- МБПЛА затрачивают гораздо меньший объем топлива или иных альтернативных источников энергии благодаря своему весу;
- МБПЛА способны взлетать или приземляться на небольшую взлетно-посадочную полосу;
- стоимость пилотируемых самолетов по сравнению с малогабаритными МБПЛА гораздо дороже в плане производства и обслуживания.
- затраты на обучение и подготовки пилотов занимает гораздо больше времени чем обучение оператора БПЛА.

Один из наиболее ярких примеров является МБЛК «ScanEagle» (рисунок 1.12), автономность полета которого составляет около 20 часов, при этом его максимальная скорость – 100 км/ч за счет поршневого бензинового двигателя мощностью 1,9 л.с. ScanEagle был разработан специалистами американских компаний «Insitu Inc» и «Boeing». На данный момент ScanEagle является продуктом линейки «Boeing Integrated Defense Systems» и активно применяется специалистами ВВС и ВМС США, при выполнении патрульных и наблюдательных задач, таких как: метеорологические и иные задачи, связанные с работой торгового или рыболовного флота, включая разведывательные операции различного характера. В силу выполняемых задач, робот может быть оснащен оптоэлектронными инфракрасными, химическими и биологическими датчиками, а также детектором магнитных аномалий. ScanEagle способен совершить полеты на высоте 5000 метров над уровнем Земли. Силовая рама ScanEagle выполнена из углеродного волокна с покрытием полистирола, при размахе крыльев 3 м и общей массе 15 кг. При эксплуатации ScanEagle не нужны аэродромы, однако необходимо осуществлять запуск с пневматической катапульты, а для приземления требуется специальная система зацепления крыльев за трос, натянутый между шестами высотой до 25 м [68].



Рис.1.12. МБЛА «ScanEagle» (США)

Еще одна интересная разработка принадлежит российской компании ОАО «Горизонт». Компания разработала МБЛА «Горизонт Эйр S-100» (рисунок 1.13), представляющий собой вертолет, предназначенный для обеспечения безопасности на море, выполнения поисково-спасательных мероприятий при чрезвычайных ситуациях, мониторинга наземного и надводного пространства, осуществления проводки судов в сложных ледовых условиях, обнаружения и контроля очагов экологических катастроф природного и техногенного происхождения.



Рис.1.13. МБЛА «Горизонт Эйр S-100» (Россия)

В зависимости от возлагаемых задач и области применения, Горизонт Эйр S-100 может быть оснащен видеокамерой дневного/ночного видения, лазерным сканером, датчиком мультиспектрального отображения, наземным радаром и др. При этом, общий вес робота составляет 200 кг., длина фюзеляжа – 3,1 м., средняя скорость – 100 км/ч, максимальная продолжительность полета до 6 часов. Эксплуатация робота может производиться на морских платформах

судов или водных сооружениях. На данный момент Горизонт Эйр S-100 применяется специалистами подразделений ВМС, МЧС и ФСБ России [69].

Компания «Israel Aerospace Industries» – одна из первых производителей БПЛА, направленных на выполнение морского патрулирования и сбора разведывательных данных. На сегодняшний день, Maritime Heron (рисунок 1.14) является оптимальным решением для обеспечения безопасности на морских территориях.



Рис.1.14. МБЛА «Maritime Heron» (Израэль)

Данный робот оснащен широким спектром измерительных приборов, включая морской поисковый радар, электрооптические и гидроакустические датчики. Maritime Heron способен проводить длительные операции на большом расстоянии посредством спутниковой системы передачи данных, передавая информацию на станцию управления, интегрированную на борту морских судов. При этом максимальная дальность полета составляет до 1000 км от операционной базы, общий вес робота – 1 200 кг., длина фюзеляжа – 8,5 м., размах крыльев – 16,6 м, средняя скорость – 120 км/ч, максимальная продолжительность полета – до 45 часов. Однако, для эксплуатации требуется наличие аэродромов или относительно протяженных морских платформ [70].

Испанской группой «Thales» создан МБЛА двойного назначения «Fulmar X» (рисунок 1.15), основные задачи которого заключаются в выполнении наблюдательных и разведывательных мероприятий на границах, обнаружении и реагировании на чрезвычайные ситуации и стихийные бедствия, мониторинге незаконного оборота и обеспечении безопасности важных объектов инфраструктуры. Фюзеляж робота выполнен из композитных

материалов при размахе крыльев 3 м и общей массе 20 кг. На борту Fulmar X расположены измерительные приборы, такие как многоспектральные камеры и система световой идентификации, обнаружения и определения дальности (LiDAR). Связь и передача данных в наземный пункт управления осуществляется в реальном времени дальностью до 90 км. Кроме того, автономность работы данного робота составляет до 8 часов. В настоящее время Fulmar X широко применяется специалистами подразделений ВВС и ВМС Испании и Малайзии. Следует отметить, что запуск данного робота осуществляется при помощи катапульты, а при посадке требуется наличие специальной сетки [71].



Рис.1.15. МБЛА «Fulmar X» (Испания)

Специалистами научно-исследовательского центра военно-воздушных сил Республики Эквадор при поддержке Национального секретариата высшего образования, науки и технологий (SENESCYT) был создан МБЛА Gavilan-2 (рисунок 1.16). Прототип способен проводить работы контроля, наблюдения и разведки наземных целей различного рода на пограничных и труднодоступных территориях страны, прежде всего в Амазонии. Робот обладает возможностью осуществлять взлет, посадку и полетные миссии в автономном режиме. Gavilan-2 изготовлен из углеродного волокна и дерева, при размахе крыльев 7 м и общем весе около 50 кг. Кроме того, автономность робота составляет до 5 ч при скорости 90 км/ч. Передача данных осуществляется в реальном времени при помощи спутниковых технологий. На данный момент МБЛА находится в процессе тестирования и улучшения его

технических характеристик, а затем специалисты планируют запустить серийное производство. Эксплуатация данного прототипа предполагает наличие аэродрома протяженностью не менее 20 м [72].



Рис.1.16. МБЛА «Gavilan-2» (Эквадор)

В ходе проведения литературного обзора существующих конструкций малогабаритных летательных платформ выявлены следующие достоинства: автономность, дальность полета, широкий спектр измерительных приборов, используемых в качестве полезной нагрузки. В качестве недостатков следует отнести: высокая стоимость, необходимость наличия взлетных площадок, систем запуска или посадки, а также привлечения большой группы специалистов.

Выводы по первой главе

1. Рассмотрена структурная схема системы мониторинга прибрежных территорий. Показано, что мониторинг водного транспорта представляет собой комплексный процесс систематического наблюдения и сбора информации, позволяющий провести оценку и контроль передвижения судов, предотвращения аварийных ситуаций, выявления незаконной добычи природных ресурсов и торговли, проведения миграционного контроля и обеспечения безопасности границ, осуществления розыскных и оперативных мероприятий.

2. Проведен сравнительный анализ адаптивных и интеллектуальных методов управления. Проведен анализ аппаратной и программной реализации бортовой системы технического зрения, обеспечивающей повышение функциональных возможностей и уровень интеллектуализации

летательной платформы в задачах мониторинга водного транспорта по заданной оператором траектории как в автономном, так и в телеуправляемом режимах.

3. Выполнен обзор существующих автономных малогабаритных летательных аппаратов. На основе обзора существующих конструкций сформулированы следующие выводы:

а) главным недостатком существующих малогабаритных летательных платформ является их высокая стоимость и необходимость наличия взлетных площадок, систем запуска или посадки, а также привлечения большой группы специалистов;

б) отсутствует визуальная система для обеспечения точного позиционирования и автоматической посадки на ограниченных площадках, расположенных на служебно-разъездных катерах, что усложняет процесс оперативного развертывания при выполнении любых неотложных операций по охране прибрежных территорий;

в) существующие на сегодняшний день прототипы малогабаритных летательных комплексов не имеют бортовой системы технического зрения, позволяющей осуществить задачи обнаружения, определения географических координат и слеживания за водным транспортом, что не обеспечивает автономный мониторинг в реальном масштабе времени;

г) система автоматического управления малогабаритных летательных платформ должна в зависимости от различных изменяющихся с течением времени параметров адаптироваться и принимать оптимальное решение, обеспечивающее выполнение вверенных оператором задач.

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА (СМПТ)

В настоящее время расширяется круг отраслей применения роботизированных мобильных платформ (РМП) наземного, водного и воздушного базирования, основным направлением которых является исследование земной поверхности и мониторинг объектов, располагающихся на ней. При проведении задач мониторинга прибрежных территорий наиболее эффективным способом является применение малогабаритных летательных аппаратов (МБЛА), которые способны обеспечить большую дальность обзора и обследовать протяженные территории, не представляя опасность для жизни человека. В целях повышения степени функциональных возможностей и интеллектуализации, МБЛА должен быть оснащен бортовым аппаратно-программным комплексом (БАПКУ), позволяющим осуществлять задачи мониторинга прибрежных территорий в автономном режиме. Следовательно, МБЛА можно рассматривать как малогабаритный беспилотный летательный комплекс (МБЛК).

Далее, представим режимы функционирования МБЛК при проведении задач мониторинга прибрежных территории:

- ручной режим – контроль за движением МБЛК осуществляется оператором, при этом МБЛК выполняет дистанционно заданные оператором, управляемые движения;
- автономный режим – МБЛК осуществляет управляемое движение по заранее заданной оператором траектории, необходимое для выполнения задач мониторинга прибрежных территорий в автономном режиме;
- гибридный режим – комбинированный способ управления МБЛК, сочетающий в себе возможность воспроизвести заранее заданную оператором траекторию движения, а при необходимости возможность периодического вмешательства оператора, позволяющего осуществлять

контроль и управление МБЛК. Эти действия со стороны оператора имеют корректирующий характер и не препятствуют выполнению МБЛК заданной программным способом траектории.

В диссертационной работе рассматривается гибридный режим функционирования МБЛК. При этом, МБЛК способен осуществлять управляемое движение по заданной оператором траектории в целях проведения мониторинга обследуемой территории. Бортовой программно-аппаратный комплекс обеспечивает стабилизацию и движение МБЛК по траектории в автономном режиме, а также обнаружение наземных объектов. Процесс обнаружения наземных объектов предполагает их идентификацию, определение координат о месте нахождения, включая передачу информации оператору в режиме реального времени. По факту завершения задачи мониторинга, МБЛК осуществляет посадку на выбранную оператором посадочную площадку.

2.1. Структура СМПТ

Процесс создания СМПТ предполагает разработку структуры, моделей и алгоритмов функционирования ее элементов. Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 2.1 СМПТ включает в себя оператора (ОП) и малогабаритный беспилотный летательный комплекс (МБЛК), выполненный по квадрокоптерной схеме.

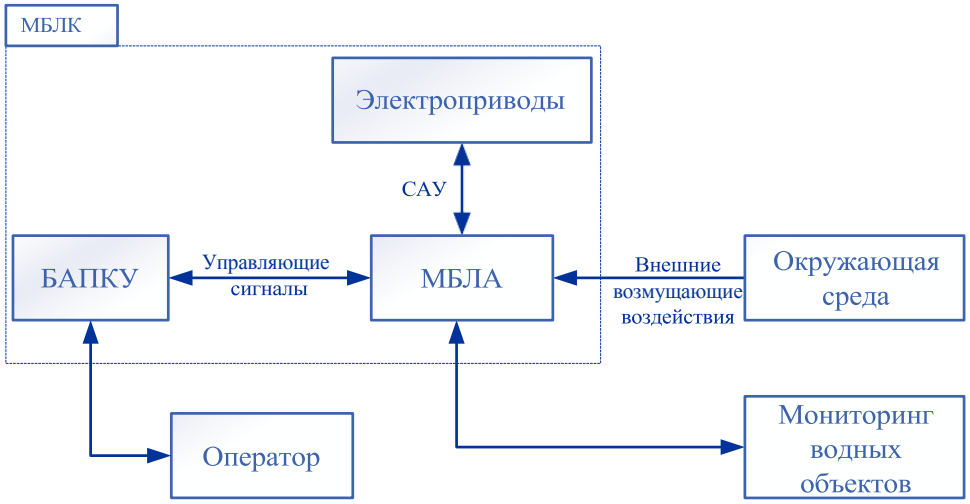


Рис.2.1. Общая структурная схема СМПТ

При проведении задач мониторинга прибрежных территорий, ОП создает полетное задание в виде составления траектории движения МБЛК, состоящей из массива точек GPS координат, а также обрабатывает информацию, поступающую из бортовой вычислительной системы управления аппаратом. На основании полученной информации, ОП способен провести оценку состояния МБЛК и следить за выполнением полетного задания. Следует отметить, что состояние МБЛК в пространстве и времени может быть представлено системой дифференциальных уравнений, полученных из динамической модели исследуемого объекта; а также информацией, поступающей из бортовой системы управления, наличие которых позволяет оценить динамику управляемого движения МБЛК.

Кроме того, процесс взаимосвязи межу оператором и МБЛК требует интегрального решения посредством создания человеко-машинного интерфейса (ЧМИ), позволяющего оператору осуществить планирование, корректировку и анализ задачи мониторинга, получить достоверную информацию о МБЛК, внедрить альтернативные или аварийные стратегии в случае возникновения нештатных ситуаций. При этом, ключевым критерием эффективности ЧМИ является синхронность работы его элементов, что отражается в повышении точности выполнения задачи мониторинга и минимизации влияния человеческого фактора. Общая структурная схема ЧМИ представлена на рисунке 2.2.



Рис.2.2. Общая структурная схема человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)

2.2. Структура МБЛК

Рассмотрим структуру МБЛК, которая приведена на рисунке 2.3. Система состоит из блока силового каркаса (МБЛА), бортового аппаратного комплекса управления (БПАКУ) и модуля питания.

На силовом каркасе МБЛА расположены исполнительные приводы (электродвигатели), управление которыми производится посредством регуляторов скоростей (ESC), на которые отправляются управляющие сигналы с полетного контроллера, формирующиеся на основе алгоритмов управления и полученных данных из системы оценки состояния, включающей в себя инерциальный модуль (ИМ), магнетометр (МГ), модуль глобального позиционирования (GPS) и барометр (БР). Бортовой аппаратный комплекс управления (БПАКУ) является важным составляющим МБЛК.

В состав БПАКУ входят модули управления, измерения и связи. В свою очередь, модуль управления состоит из полетного контроллера Pixhawk и микрокомпьютера Raspberry Pi, осуществляющих полет МБЛА по заранее заданной траектории оператором (низкий уровень управления) и интеллектуальную работу по облету препятствий, точной посадки и обнаружения водного транспорта соответственно (высокий уровень управления). Связь межу полетным контроллером и микрокомпьютером осуществляется через протокол связи MavLink [73]. Применение МБЛК в системе мониторинга обеспечивает высокую эффективность средств контроля водного транспорта, за счет того, что роботизированный комплекс снабжен различными измерительными приборами, такими как: ультразвуковые датчики, УЗД (система облета препятствий); инфракрасные датчики (ИКД) и камера RGB (система точной посадки); камера RGB-D с большой дальностью действия (система обнаружения объектов).

Кроме того, на борту МБЛК установлен модуль связи, состоящий из модуля мобильной связи 4G/LTE и радиоприемника. Модуль мобильной связи используется для приема и передачи информации о состоянии МБЛК, а также о ходе выполнения предусмотренных оператором задач мониторинга.

Полученная информация передается в реальном времени оператору, находящемуся на наземной станции управления для последующей обработки информации и принятия решения. При возникновения нештатных ситуаций оператором может быть произведена корректировка управляющих сигналов МБЛК по радиоканалу.

Модуль питания состоит из аккумулятора (АКМ) и распределительного блока питания (РБП), удовлетворяющих требований эксплуатации электромеханических и электронных модулей МБЛК.

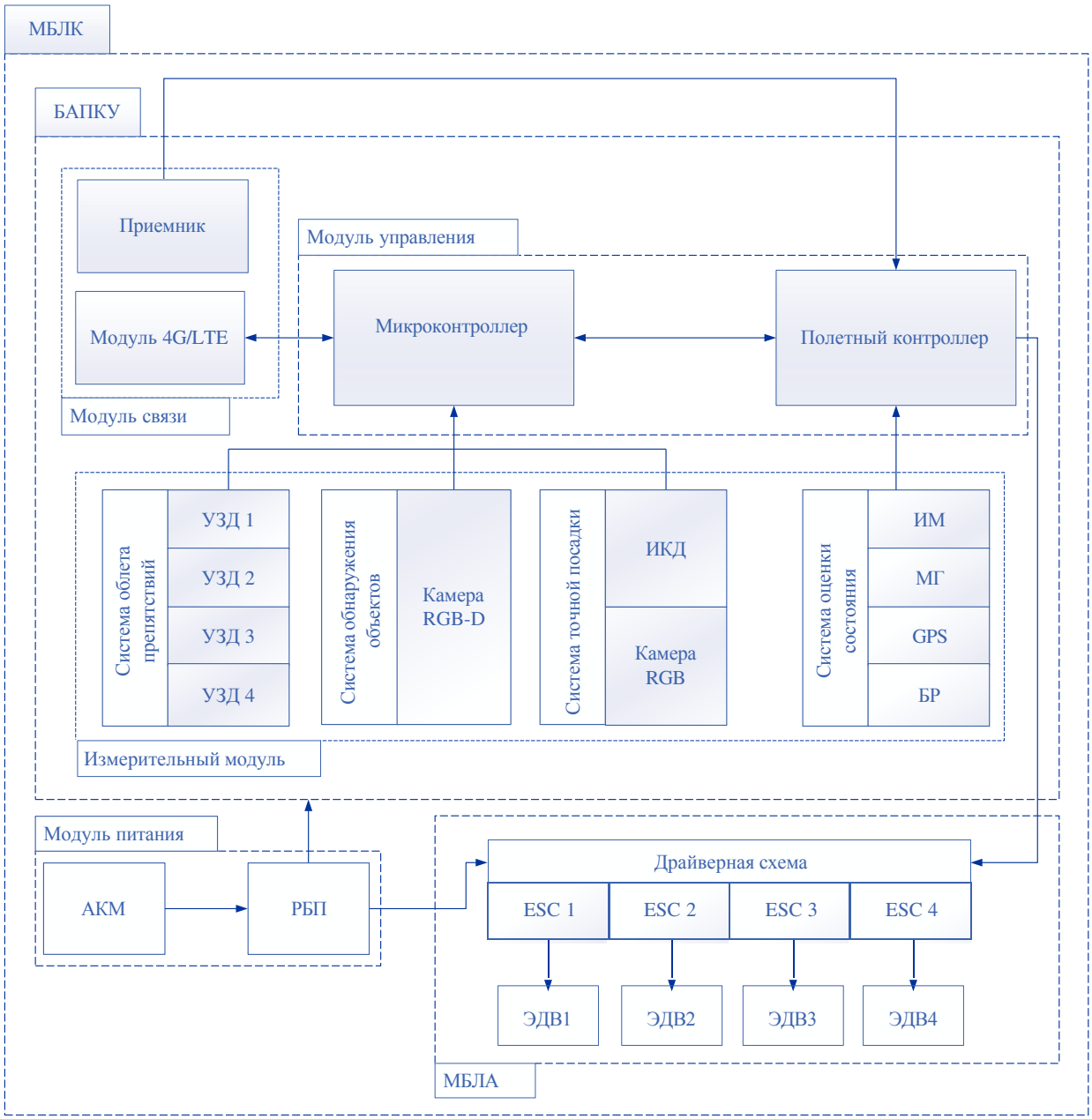


Рис.2.3. Общая структура МБЛК

2.3. Алгоритм планирования движения МБЛК

Движение МБЛК при выполнении задач мониторинга прибрежных территорий происходит с учетом свойств окружающей среды и средств локальной навигации, позволяющих планировать траекторию и зондировать пространство в заданных оператором точках в автономном режиме. Согласно рисунок 2.4. траектория состоит из отрезков прямых, где положение МБЛК в начальный момент времени определяется точкой A, а конечный пункт траектории – точкой B, заданными радиус-векторами r_A и $\bar{r}_B$ соответственно. Следовательно, задача управления заключается в том, чтобы переместиться из точки A в точку B. При этом, фактическое конечное положение МБЛК задается точкой B_1, определяемой радиус-вектором $\bar{r}_{B_1}$ и находящейся в пределах сферы радиуса $\bar{r}_C$. Отклонение фактического положения МБЛК от заданного определяется радиус-вектором $\bar{r}_{EB}$, значение которого должно находиться в пределах – $|\bar{r}_{EB}| < \varepsilon$, где ε – параметр, определяющий точность позиционирования МБЛК в пространстве. Кроме того, мониторинг водного транспорта вдоль береговой линии происходит в выбранных оператором точках траектории P_i. При этом, реальное положение МБЛК в этих точках должно находится в пределах - $|\bar{r}_{EP_i}| < \varepsilon$.

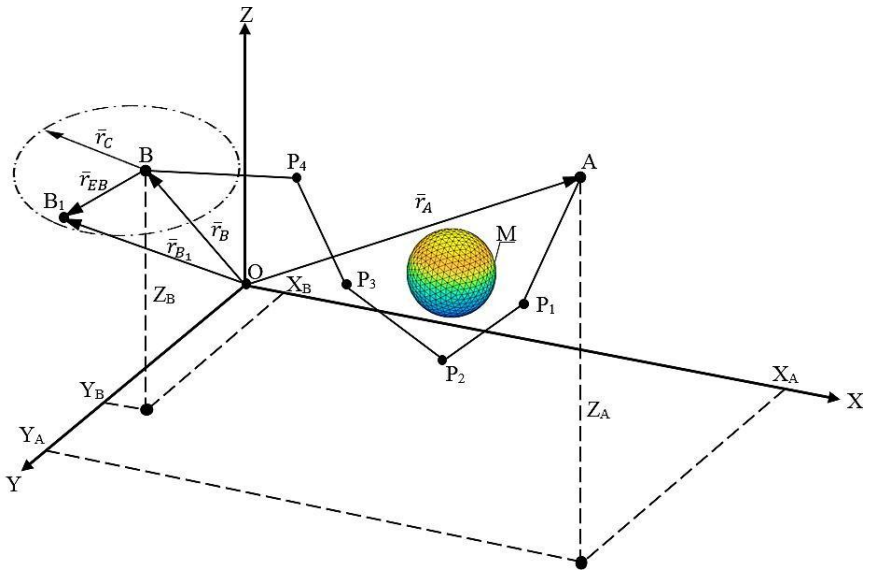


Рис. 2.4. Схема движения МБЛК при мониторинге прибрежных территорий: A – начальное положение; B – конечное положение; M – препятствие; P_i – точки мониторинга водного транспорта

В соответствии с рисунок 2.4. условием завершения процесса мониторинга является прилет МБЛК в точку B_1, положение которой определяется радиус- вектором $\bar{r}_{B_1} = \bar{r}_B + \bar{r}_{EB}$. При разработке стратегии определения, обхода препятствий и планирования оптимального пути во время движения МБЛК анализировались алгоритмы, такие как: RRT, RRT*, PFPP, VFH, VFF [90, 91]. Исходя из низкой вычислительной сложности и относительно высокой эффективности реализации в реальном масштабе времени, принято использовать стратегию на базе метода искусственных потенциальных полей (PFPP), принцип работы которого заключается в построении виртуального силового поля в результате сложения притягивающихся $E_{atr}(r_A)$ и отталкивающихся $E_{rep}(r_A)$ силовых полей, создаваемых целевой путевой

точкой и препятствиями соответственно [92].

$$E(r_A) = E_{atr}(r_A) + E_{rep}(r_A) \quad (2.1)$$

где, $E(r_A)$ – виртуальное силовое поле, зависящее от текущего положения МБЛК; $E_{atr}(r_A)$, $E_{rep}(r_A)$ – притягивающееся и отталкивающееся силовые поля соответственно.

В силу того, что движение МБЛК происходит по заранее заданной траектории, можно считать, что значение слагаемого $E_{atr} = 0$. Таким образом, результирующее потенциальное поле может определяться следующим образом [92, 93]:

$$E(\bar{r}_A) = E_{rep}(\bar{r}_A) = \frac{1}{2}\kappa\left(\frac{1}{dQ} - \frac{1}{d_{seg}}\right)^2 \quad (2.2)$$

где, r_A, $\bar{r}_{obs}$ – радиус-векторы, определяющие положение МБЛК и препятствия M в пространстве; $\kappa > 0$ – константа сглаживания кривизны пути обхода препятствия; $dQ = \sqrt{(\bar{r}_A - \bar{r}_{obs})^T(\bar{r}_A - \bar{r}_{obs})}$ – расстояние от МБЛК до препятствий; $d_{seg} = r_M + \varrho$ – расстояние безопасности, определяющееся суммой радиуса препятствия r_M и минимальное расстояние, при котором $E(r_A) \neq 0$.

На рисунке 2.5. представлена схема изменения траекторного движения МБЛК под действием потенциальной энергии, создаваемой виртуальным

электрическим полем E (r_A). Распределение электрического поля задается синими векторами, модуль и направление которых зависит от текущего положения МБЛК. Таким образом, при $dQ < d_{seg}$, движение МБЛК по заранее заданной траектории $T^{des}(t)$ из i-й точки P_i в P_{i+1} будет происходит по модифицированной траектории $T^{ev}(E)$, позволяющей МБЛК облететь препятствие на участках, где E $(r_A) \neq 0$.

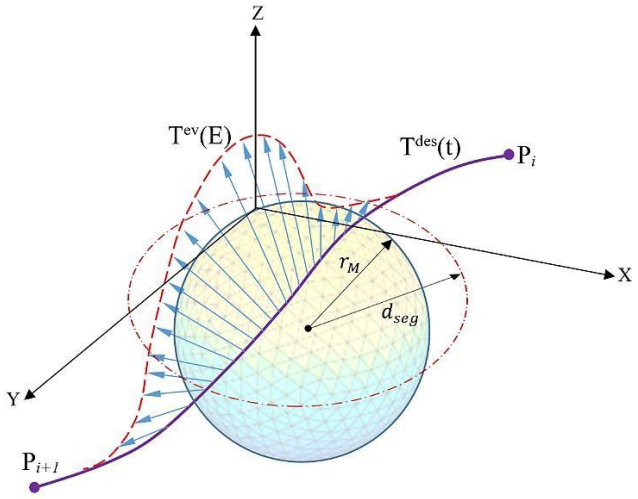


Рис.2.5. Схема изменения траекторного движения МБЛК

В общем случае, результирующее потенциальное поле E$^{res}(r_A)$ можно рассматривать как сумму отдельных потенциальных полей, создаваемых объектами, препятствующими движению МБЛК по заданной оператором траектории:

$$\mathrm{E}^{res}(\bar{r}_A) = \sum_{j=1}^{N} E_j(\bar{r}_A) \qquad (2.3)$$

где, $E_j(r_A) = E_{j_x} + E_{j_y} + E_{j_z}$ – потенциальное поле, создаваемое j-м препятствием в пространственной области, N – количество препятствий.

Облет препятствия МБЛК в зонах действия потенциального поля обеспечивается созданием дополнительных скоростей, которые возможно определить путем нахождения градиента потенциального поля ∇E [92, 93]:

$$\nabla \mathrm{E}\,(\bar{r}_A) = \frac{\partial \mathrm{E}\,(r_A)}{\partial x}\vec{\imath} + \frac{\partial \mathrm{E}\,(r_A)}{\partial y}\vec{\jmath} + \frac{\partial \mathrm{E}\,(r_A)}{\partial z}\vec{\vec{k}} \qquad (2.4)$$

где, $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$, $\vec{\vec{k}}$ – орты, представляющие собой единичные векторы декартовой системы координат.

2.4. Структура человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)

СМПТ представляет собой сложную неоднородную динамическую систему. Главную роль играет управление движением в процессе мониторинга, остальные функции СМПТ является вспомогательными, обеспечивающими решение основной задачи. Задача оператора состоит в передаче управляющих сигналов на бортовое вычислительное устройство, на основании которых осуществляется движение МБЛК в заданном направлении. Предполагается, что существует три режима управления движением.

1) Режим телеуправления. Контроль за движением МБЛК осуществляется оператором. Управляемые движения выполняются дистанционно для воспроизведения заданной траектории.

2) Автономный режим. Управляемое движение, необходимое для выполнения мониторинга водного транспорта в заданных точках происходить без прямого участия оператора. Управляющие сигналы вырабатываются на основе информации, поступающей из системы оценки состояния в исполнительные приводы, осуществляющие корректировку текущего положения МБЛК относительно заданного.

3) Гибридный (комбинированный) режим. МБЛК производит автономно заданную траекторию движения, а оператор имеет возможность периодического вмешательства для контроля и управления МБЛК. Эти действия имеют корректирующий характер и не препятствуют выполнению МБЛК, заданной программным способом траектории.

Последовательность действий оператора и бортового вычислительного устройства при движении МБЛК в режиме телеуправления:

1. Включение бортовых исполнительных приводов.
2. Вертикальный взлет и зависание на заданной высоте.
3. Настройка курсового угла МБЛА относительно заданной траектории.
4. Движение по прямой в заданном направлении и приближение к заданной точке в пространстве.

5. Контроль оператором за реальной траекторией движения МБЛК визуально, а также по системе глобального позиционирования GPS.

6. Корректировка текущего положения МБЛК относительно требуемой траектории.

7. Остановка и зависание МБЛК в заданной точке мониторинга.

8. Визуализация окружающей среды, обнаружение водного транспорта.

9. Изменение курсового угла и возврат в исходное положение по прямолинейной траектории.

10. Приземление и остановка МБЛК.

Последовательность действий оператора и бортового вычислителя при движении МБЛК в автономном режиме:

1. Подготовка к запуску МБЛК как с разведывательных катеров, так и с суши (произвольно в выбранном оператором месте).

2. Включение электрического питания и инициализация бортовых модулей.

3. Передача пакета данных в бортовое вычислительное устройство в виде массива точек GPS координат, соответствующих точкам проведения мониторинга водного транспорта.

4. Определение текущего положения МБЛК бортовым вычислительным устройством, основываясь на информации, поступающей с системы оценки состояния.

5. Построение траектории движения МБЛК, определение собственных координат и локализации на прибрежных территориях.

6. Нахождение точек интереса, дискретных точек на поверхности, определяющих желаемую траекторию движения МБЛК, включая возможные препятствия. Такими точками могут служить распознаваемые метки, встречающиеся на прибрежных территориях или окрестностях, природные возвышенности, строительные объекты (порты, причалы, башни, платформы) и т.п.

7. Полет МБЛК осуществляется согласно заданной оператором траектории и алгоритмам управления движением. В случае необходимости выполняется облет препятствий с последующей перестройкой траектории движения на основе алгоритма искусственных потенциальных полей.

8. Обнаружение и слеживание за водным транспортом, находящимся на обследуемой территории, проводится в реальном времени посредством бортовой системы технического зрения МБЛК, работа которой основывается на алгоритмах машинного обучения.

9. Автоматическая посадка МБЛК на ограниченных площадках, расположенных на служебно-разъездных катерах или на суше, осуществляется при помощи система точного позиционирования на основе визуальных данных и идентификационных маркеров класса ArUco.

10. Процессы приземления и завершения мониторинга происходят автоматически.

На рисунке 2.6 приведена структурная схема ЧМИ, обеспечивающего взаимодействие оператора и МБЛК в различных режимах функционирования.

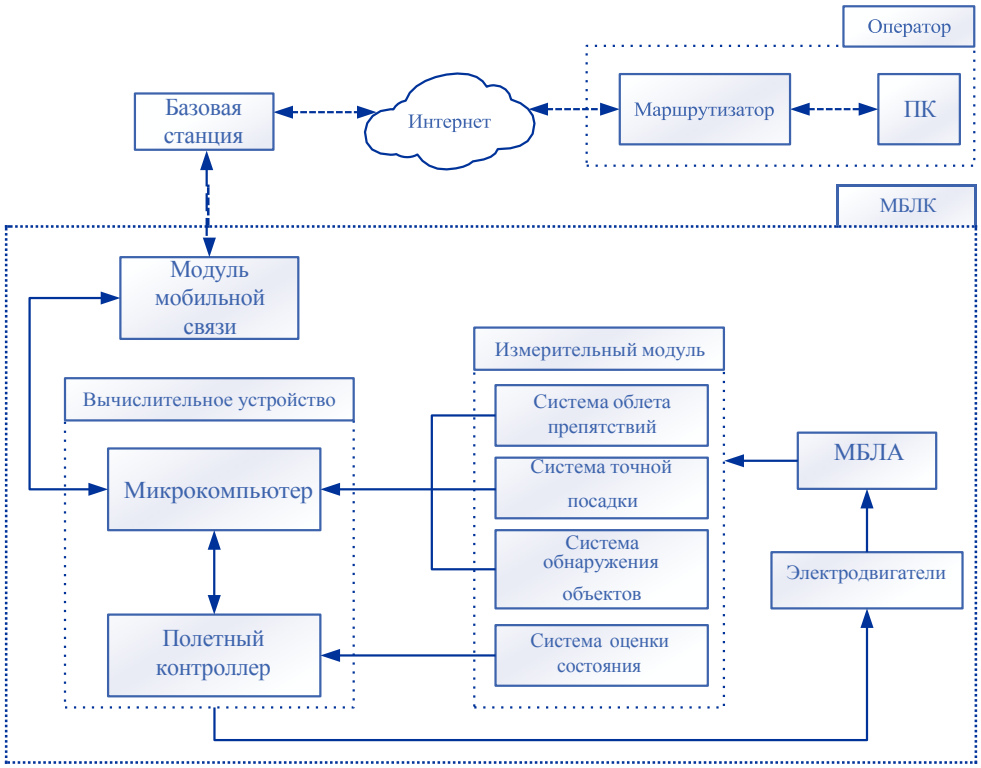


Рис.2.6. Структурная схема ЧМИ, обеспечивающего взаимодействия межу МБЛК и Оператором

Эффективность процесса мониторинга и слеживания за морским транспортом является результатом взаимосвязи между оператором и МБЛК посредством создания ЧМИ, который включает в себя бортовое вычислительное устройство, модуль измерительных приборов и мобильной связи. Планирование траектории движения МБЛК ведется на основании массива точек GPS координат обследуемой территории, заданного оператором. Оценка текущего состояния МБЛК и его элементной базы, входящей в состав модуля полезной нагрузки, осуществляется измерительным модулем через соответствующие каналы обратной связи. Согласно алгоритмам вычислительным устройством проводится обработка, принятие решений и формирование управляющих сигналов для обеспечения стабильного полета и выполнения МБЛК задач мониторинга. Процесс обмены информации осуществляется в реальном времени при помощи модуля мобильной связи, обеспечивающего расширение зоны радиопокрытия и увеличение пропускной способности информационного канала для потоковой передачи видео в реальном времени оператору, находящемуся на наземной станции управления. Предусматривается использование мобильных базовых станций, способствующих расширению покрытия сотовой связи и беспроводного интернет-соединения в отдаленных районах.

2.5. Математическая модель МБПК

Рассмотрим математическую модель пространственного движения МБЛК, определяющую его движение по заданной траектории. Особое внимание уделено вопросам разработки алгоритмов, обеспечивающих движение МБПК с учетом особенностей окружающей среды и наличия препятствий. В качестве основного критерия оценки качества управления в этом случае использована величина отклонения реального положения МБПК от заданного.

2.5.1. Кинематический анализ МБЛК

При проведении кинематического анализа принято считать, что МБЛК представляет собой симметричное твердое тело с известными аэродинамическими свойствами, состоящее из четырёх управляемых винтомоторных групп и фюзеляжа, на котором установлены блок питания и элементная база. Положение и ориентация МБЛК в пространстве определяется шестью обобщенными координатами. В соответствии с приведенной расчетной схемой (рисунок 2.7) рассмотрим схему движения МБЛК в неподвижной декартовой системе координат $OX_0Y_0Z_0$, тогда $CX_1Y_1Z_1$, $A_ix_iy_iz_i$ (i=*1-4*) – подвижные системы координат, проходящие через центр масс корпуса аппарата C и центра масс i-го ротора A_i соответственно. Ориентацию в пространстве задают самолетные углы рысканья ψ, тангажа θ и крена φ.

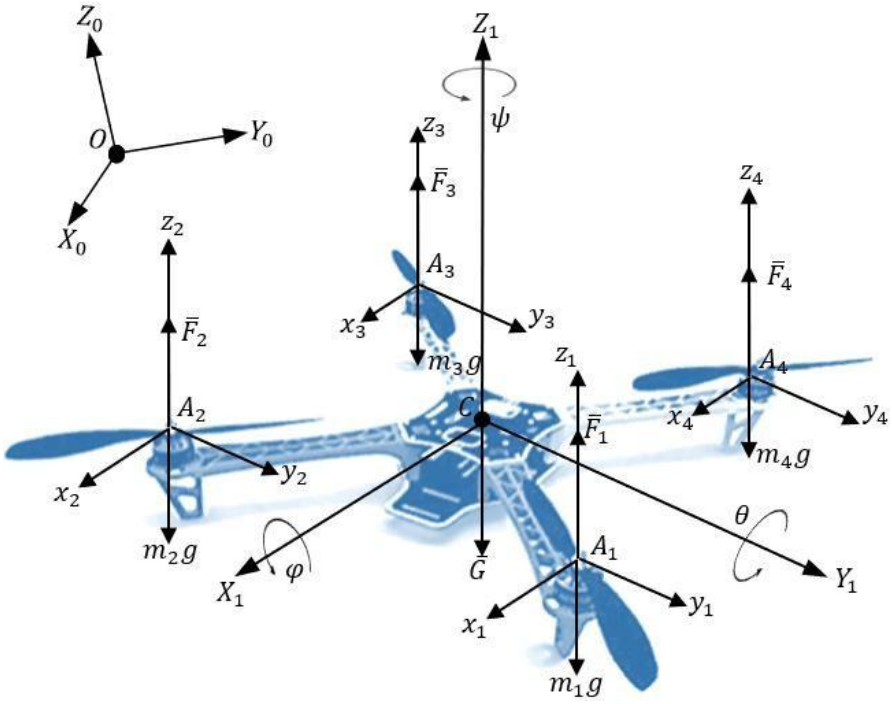


Рис. 2.7. Расчетная схема МБЛК

Описание положения МБЛК при его движении возможно путем использования самолетных углов: угол рыскания ψ указывает отклонение от горизонтальной плоскости продольной оси тела от некоторого выбранного направления, угол тангажа θ характеризует подъем продольной оси над

плоскостью горизонта, а угол крена φ равен углу поворота тела вокруг продольной оси. Эти углы соответствуют следующим поворотам[42]:

- поворот на угол ψ относительно вертикальной оси *OZ* (поворот определяется матрицей $R\,z,\psi$) – рыскание;
- поворот на угол θ относительно главной поперечной оси инерции *OY* (поворот определяется матрицей $R\,y,\theta$) – тангаж;
- поворот на угол φ вокруг продольной оси *OX* (поворот определяется матрицей $R\,x,\varphi$) – крен.

Таким образом, положение центра масс МБЛК определяют координаты вектора, связывающего точки *O* и *C* систем координат, $\bar{r}_{OC}=[X,Y,Z]^{\mathrm{T}}$.

Далее будем обозначать символами $^{(0)}$ и $^{(1)}$ векторы, определённые в системах координат $OX_0Y_0Z_0$ и $CX_1Y_1Z_1$, соответственно.

Результирующая матрица поворота системы координат $CX_1Y_1Z_1$ относительно $OX_0Y_0Z_0$ получается путем перемножения трёх основных матриц вращения и имеет следующий вид:

$$T_{10} = R(\psi,\theta,\varphi) = R(z,\psi)\times R(y,\theta)\times R(x,\varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\varphi\sin\theta - \cos\varphi\sin\psi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi\sin\theta & \cos\varphi\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \qquad (2.5)$$

Угловая скорость исследуемого тела может быть представлена в виде:

$$\omega = \dot{\psi} j + \dot{\Theta} k + \dot{\varphi} i,$$

где *j, k, i* являются ортами соответственно осей *y, z, x.*

Для получения проекций ω_{X_1} , ω_{Y_1} , ω_{Z_1} угловой скорости ω на оси связанной системы координат удобно представить вектор $\dot{\psi} j$ разложенным на его составляющие вдоль осей $x_1 = x``$ и $y``$ с ортами *i* и $j``$:

$$\dot{\psi} j = \dot{\psi}\sin\theta i + \dot{\psi}\cos\theta j``$$

а также соотношений: $j`` = \cos\varphi j - \sin\varphi k$, $k` = \sin\varphi j + \cos\varphi k$, следует, что

$$\begin{aligned} \omega_{X_1} &= \dot{\varphi} - \dot{\psi}sin\theta \\ \omega_{Y_1} &= \dot{\theta}cos\theta + \dot{\psi}cos\theta sin\varphi \\ \omega_{Z_1} &= \dot{\psi}cos\varphi cos\theta - \dot{\theta}sin\varphi \end{aligned} \tag{2.6}$$

Эти уравнения называются кинематическими уравнениями Эйлера, полученными для самолетных углов [42].

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega_{X_1} - \dot{\psi}sin\theta \\ \dot{\theta} = \omega_{Y_1}cos\varphi - \omega_{Z_1}sin\varphi \\ \dot{\psi} = \frac{1}{cos\theta}(\omega_{Z_1}cos\varphi + \omega_{Y_1}sin\varphi) \end{cases} \tag{2.7}$$

Проекции угловой скорости корпуса связаны с углами Эйлера с помощью кинематических уравнений.

Рассмотрев расчетную схему, запишем равенство:

$$r_{OA_i}^{(0)} = \bar{r}_{OC}^{(0)} + \bar{r}_{CA_i}^{(0)} \tag{2.8}$$

где $\bar{r}_{CA_i}^{(0)} = T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)}$.

Векторы $\bar{r}_{CA_i}^{(1)}$ для точек A_i имеют вид:

$$\bar{r}_{CA_1}^{(1)} = \begin{vmatrix} l.\cos 45^0 \\ l.\sin 45^0 \\ 0 \end{vmatrix}, \bar{r}_{CA_2}^{(1)} = \begin{vmatrix} l.\cos 45^0 \\ -l.\sin 45^0 \\ 0 \end{vmatrix}, \bar{r}_{CA_3}^{(1)} = \begin{vmatrix} -l.\cos 45^0 \\ -l.\sin 45^0 \\ 0 \end{vmatrix}, \bar{r}_{CA_4}^{(1)} = \begin{vmatrix} -l.\cos 45^0 \\ l.\sin 45^0 \\ 0 \end{vmatrix} \tag{2.9}$$

где с - центр масс, l – расстояние от центра квадрокоптера до центра масс *i-го* ротора МБЛК (рисунок 2.8).

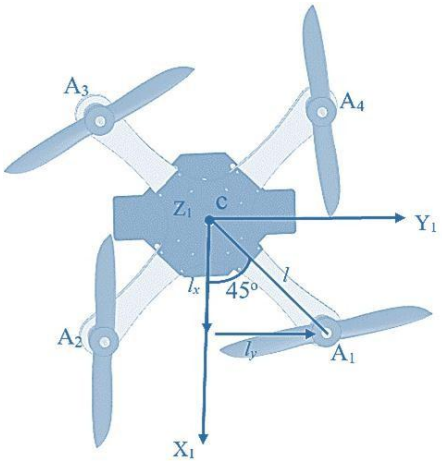


Рис. 2.8. Геометрические параметры квадрокоптера.

Скорости точек A_i определим, продифференцировав равенство (2.8) по времени:

$$\bar{v}_{A_i} = \frac{\bar{r}_{OA_i}^{(0)}}{dt} = \frac{\bar{r}_{OC}^{(0)}}{dt} + \frac{\bar{r}_{CA_i}^{(0)}}{dt} \tag{2.10}$$

где $\frac{\bar{r}_{OC}^{(0)}}{dt} = \bar{v}_C^{(0)}$ - скорость центра масс С.

Скорость точек A_i при вращательном движении корпуса относительно центра масс С определим как:

$$\frac{\bar{r}_{CA_i}^{(0)}}{dt} = \bar{v}_{CA_i}^{(0)} = T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)} \quad (2.11)$$

Таким образом в общем виде скорость A_i можно представить, как:

$$\bar{v}_{A_i}^{(0)} = \bar{v}_C^{(0)} + T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)} \quad (2.12)$$

2.5.2. Определение внешних сил, действующих на МБЛК

В соответствии с расчетной схемой 2.6 на МБЛК действуют аэродинамические силы тяги несущих винтов $\bar{F}_1$, $\bar{F}_2$, $\bar{F}_3$, $\bar{F}_4$ приложенные к их центрам масс роторов A_1, A_2, A_3, A_4 соответственно и силы тяжести корпуса $m_C g$ и винтов $m_i g$, силы сопротивления движению корпуса МБЛК в воздушной среде, а также силы возникающие в результате движения воздуха относительно корпуса аппарата.

Рассмотрим аэродинамические силы несущих винтов МБЛК. Подъемная сила, создаваемая со стороны электроприводов, появляется как результат вращения винтов. Винты МБЛК совершают вращательное движение (относительно втулки винта) и поступательное (в направлении, перпендикулярном плоскости вращения) движение. Результирующая сила тяги *i-го* ротора может быть определена согласно следующему выражению [34, 35]:

$$T_i = F_i = b\omega_i^2 \quad (2.13)$$

где T_i – результирующая сила тяги, b – аэродинамическая составляющая, ω_i – угловая скорость *i-го* ротора

Аэродинамическая составляющая b определяется следующим образом:

$$b = \frac{c_T \rho F_H R^2}{2} \quad (2.14)$$

где, c_T – коэффициент силы тяги, зависящий от кинематических параметров; ρ – плотность воздуха; R – радиус несущего винта; ω_i – угловая скорость винта; $F_H = 0{,}9\pi R^2$ – площадь, отметаемая несущим винтом.

Силы $\bar{F}_i$ параллельны оси CZ_1. Тогда векторы сил тяги в неподвижной системе координат определим по формуле:

$$F_i^{(0)} = T_{10} \cdot F_i^{(1)} \tag{2.15}$$

где T_{10} - матрица перехода из $^{(1)}$ в $^{(0)}$ систему координат.

Количество движения i-го элемента системы определим по формуле:

$$\bar{q}_i = m_i \bar{v}_{A_i} = m_i (\bar{v}_C + T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)}) \tag{2.16}$$

Изменение количества движения равно сумме сил, действующих на i-ю массу:

$$\frac{dq_i}{dt} = m_i \left(\frac{dv_C}{dt} + T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)}\right) = T_{10} F_i^{(1)} + m_i g \tag{2.17}$$

Вектор количества движения рассматриваемой системы, состоящей из корпуса и 4 винтов, определим по формуле:

$$Q = m_C \bar{v}_C + \sum_{i=1}^{4} m_i \bar{v}_{Ai} \tag{2.18}$$

Теорема об изменении количества движения механической системы в дифференциальной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= m_C \frac{dv_C}{dt} + \sum m_i \left(\frac{dv_C}{dt} + T_{10} \cdot \bar{r}_{CA_i}^{(1)}\right) = \\ &= (m_C + \sum m_i) \frac{d\bar{v}_C}{dt} + T_{10} \sum m_i \bar{r}_{CA_i}^{(1)} = \\ &= T_{10} \sum F_i + \sum m_i g \end{aligned} \tag{2.19}$$

где, $T_{10} \sum m_i r_{CA_i}^{(1)} = |T_{10}| \begin{vmatrix} m_1 . l . \cos 45^0 + m_2 . l . \cos 45^0 - m_3 . l . \cos 45^0 - m_4 . l . \cos 45^0 \\ m_1 . l . \sin 45^0 - m_2 . l . \sin 45^0 - m_3 . l . \sin 45^0 + m_4 . l . \sin 45^0 \\ 0 \end{vmatrix} = 0$

при условии симметричности конструкции, равенстве масс роторов $m_1=m_2=m_3=m_4=m_4$

Следовательно, сумма всех сил в первой системе координат:

$$\sum F_i^{(1)} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum F_{i=1}^{4} \end{vmatrix} \tag{2.20}$$

Сумма всех сил в нулевой системе координат определяется следующим образом:

$$\sum_i F_i^{(0)} = T_{10} \sum_i F_i^{(1)} = |T_{10}| \begin{matrix} \sum_i F_i^{(1)} \\ \sum_i F_i^{(1)} \end{matrix} = \begin{matrix} \sum_i F_i^{(1)} \\ (sin\psi\, sin\phi + cos\psi\, cos\phi\, sin\theta) \cdot \sum_i F_i^{(1)} \\ (cos\phi sin\psi\, sin\theta - cos\psi\, sin\phi) \cdot \sum_i F_i^{(1)} \\ (cos\phi cos\ \theta) \cdot \sum_i F_i^{(1)} \end{matrix} \quad (2.21)$$

Тогда уравнение (2.19) с учетом (2.20), (2.21) в проекциях на координатные оси неподвижной системы координат примет вид:

$$\begin{matrix} V_C^X \\ |V_C^Y| \\ V_C^Z \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{(sin\psi\, sin\phi + cos\psi\, cos\phi\, sin\theta) \cdot \sum_i F_i^{(1)}}{m} \\ \frac{(cos\phi\, sin\psi\, sin\theta - cos\psi\, sin\phi) \cdot \sum_i F_i^{(1)}}{m} \\ \frac{(cos\phi cos\ \theta) \cdot \sum_i F_i^{(1)}}{m} - g \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{(sin\psi\, sin\phi + cos\psi\, cos\phi\, sin\theta) \cdot U_1}{m} \\ \frac{(cos\phi\, sin\psi\, sin\theta - cos\psi\, sin\phi) \cdot U_1}{m} \\ \frac{(cos\phi cos\ \theta) \cdot U_1}{m} - g \end{matrix} \quad (2.22)$$

Представленная система дифференциальных уравнений (2.22) описывает изменение обобщенных координат, определяющих положение центра масс МБЛК в пространстве под действием сил тяги винтов и сил веса.

2.5.3. Определение моментов, действующих на МБЛК

Рассмотрено вращательное движение МБЛК относительно центра масс С. Для описания вращательного движения воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента.

Кинетический момент элементов механической системы определяется тензором инерции и угловой скоростью. Рассмотрим угловые скорости вращения роторов квадрокоптер. Для этого введена система координат $A_i x_i y_i z_i$, которая совпадает с центром масс m_i роторов (рисунок 2.9).

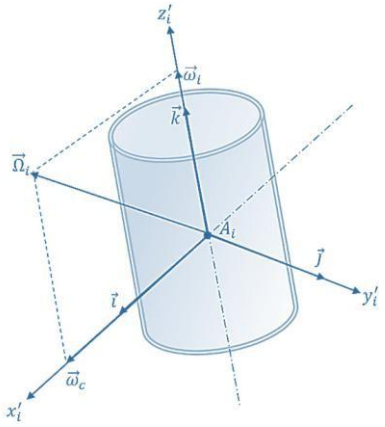


Рис. 2.9. Схема определения угловой скорости ротора в сложном движении

Абсолютная угловая скорость i-го ротора определяется как сумма угловой скорости собственного вращения и угловой скорости вращения корпуса.

$$\bar{\Omega}_i = \bar{\omega}_i + \bar{\omega}_C, \quad i = 1\ldots4 \tag{2.23}$$

где $\bar{\omega}_i = \bar{\imath}_i\omega_{ix} + \bar{\jmath}_i\omega_{iy} + \bar{k}_i\omega_{iz}$; $\bar{\omega}_C = \bar{\imath}_1\omega_{Cx} + \bar{\jmath}_1\omega_{Cy} + \bar{k}_1\omega_{Cz}$;

тогда,

$$\bar{\Omega}_i = \bar{\imath}_1\Omega_x + \bar{\jmath}_1\Omega_y + \bar{k}_1\Omega_z \tag{2.24}$$

откуда i_1, j_1, k_1 и i_i, j_i, k_i - единичные векторы системы координат $CX_1Y_1Z_1$ и $A_ix_iy_iz_i$; Ω_i - абсолютная угловая скорость вращения i-ого ротора в локальной системе координат; $\bar{\omega}_C$,$\bar{\omega}_i$ - векторы угловых скоростей вращения корпуса и i-ого ротора представим в виде:

$$\bar{\omega}_C = \begin{vmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_{Z_1} \end{vmatrix}, \quad \bar{\omega}_i = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_i \end{vmatrix} \tag{2.25}$$

Сумма угловых скоростей i-ого ротора:

$$\bar{\omega}_i = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^{4}\omega_i \end{vmatrix} \tag{2.26}$$

С учетом (2.23) абсолютная угловая скорость вращения роторов можно представить в следующем виде:

$$\overline{\Omega}_i = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^{4}\omega_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_{Z_1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_{Z_1} \end{vmatrix} \tag{2.27}$$

Момент количества движения рассматриваемой механической системы, состоящей из пяти звеньев:

$$\bar{L} = \bar{L}_C + \sum \bar{L}_i \tag{2.28}$$

где $\bar{L}_C = I_C \bar{\omega}_C$ – кинетический момент корпуса относительно центра масс МБЛК; $\bar{L}_i = \bar{I}_i \bar{\Omega}_i$ – кинетический момент i-го ротора относительно центра масс МБЛК.

Матрица тензора инерции относительно центра масс МБЛК имеет вид:

$$J_C = \begin{vmatrix} J_C^{X_1} & 0 & 0 \\ 0 & J_C^{Y_1} & 0 \\ 0 & 0 & J_C^{Z_1} \end{vmatrix} \tag{2.29}$$

Кинетический момент корпуса относительно центра масс МБЛК определяется таким образом:

$$\bar{L}_C = \begin{vmatrix} J_C^{X_1} & 0 & 0 \\ 0 & J_C^{Y_1} & 0 \\ 0 & 0 & J_C^{Z_1} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_{Z_1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} J_C^{X_1}\omega_{X_1} \\ J_C^{Y_1}\omega_{Y_1} \\ J_C^{Z_1}\omega_{Z_1} \end{vmatrix} \tag{2.30}$$

Определим момент количества движения ротора в системе координат $A_i x_i y_i z_i$. Матрица тензора инерции относительно центра масс i-го ротора имеет вид:

$$I_{A_i} = \begin{vmatrix} J_{Ai}^x & 0 & 0 \\ 0 & J_{Ai}^y & 0 \\ 0 & 0 & J_{Ai}^z \end{vmatrix} \tag{2.31}$$

В соответствии с геометрическим параметрами МБЛК (рисунок 2.10) следует, что: расстояние от центра масс конвертоплана C до центра масс i-го ротора l одинаково.

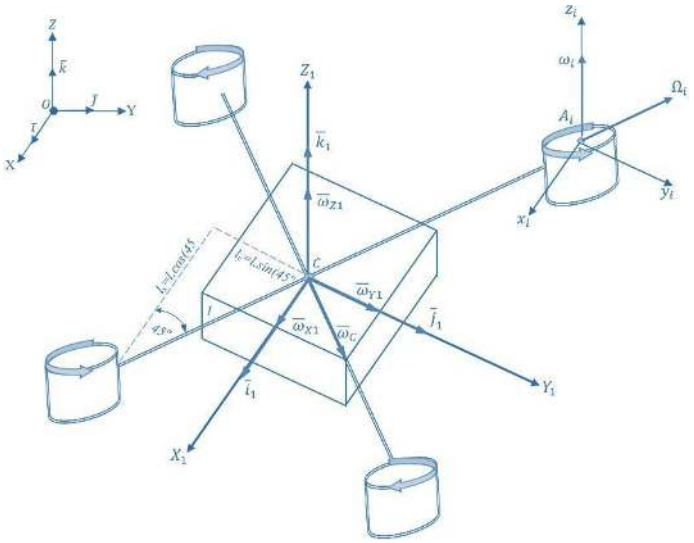


Рис. 2.10. Схема определения угловой скорости ротора в сложном движении

Кинетический момент роторов i-го ротора относительно центра масс МБЛК C можно представить следующим образом:

$$L_{A_i} = \begin{bmatrix} J^x_{A_i} + m_i.\, l^2_x & 0 & 0 \\ 0 & J^y_{A_i} + m_i.\, l^2_y & 0 \\ 0 & 0 & J^z_{A_i} + m_i.\, l^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_i + \omega_{Z_1} \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} J^x_{A_i} + m_i.\, l^2 cos^2 45^\circ & 0 & 0 \\ 0 & J^y_{A_i} + m_i.\, l^2 sin^2 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & J^z_{A_i} + m_i.\, l^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{X_1} \\ \omega_{Y_1} \\ \omega_i + \omega_{Z_1} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

С учетом (2.30), (2.32) выражение (2.28) примет вид:

$$L = \begin{vmatrix} J^X_C \omega_{X_1} \\ J^Y_C \omega_{Y_1} \\ J^Z_C \omega_{Z_1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (J^x_{Ai} + m_i.\, l^2 cos^2 45^\circ)\omega_{X_1} \\ (J^y_{Ai} + m_i.\, l^2 sin^2 45^\circ)\omega_{Y_1} \\ (J^z_{Ai} + m_i l^2)(\omega_i + \omega_{Z_1}) \end{vmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} J^X_C \omega_{X_1} + \sum J^x_{A_i} \omega_{X_1} + \sum m_i l^2 cos^2 45^\circ \omega_{X_1} \\ J^Y_C \omega_{Y_1} + \sum J^y_{Ai} \omega_{Y_1} + \sum m_i l^2 sin^2 45^\circ \omega_{Y_1} \\ J^Z_C \omega_{Z_1} + \sum J^z_{Ai} \omega_i + \sum J^z_{Ai} \omega_{Z_1} + \sum m_i l^2 \omega_i + \sum m_i l^2 \omega_{Z_1} \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{vmatrix} (J^X_C + \sum J^x_{A_i} + \sum m_i l^2 cos^2 45^\circ)\omega_{X_1} \\ (J^Y_C + \sum J^y_{Ai} + \sum m_i l^2 sin^2 45^\circ)\omega_{Y_1} \\ [(J^Z_C + \sum J^z_{Ai} + \sum m_i l^2)\omega_{Z_1} + (\sum J^z_{Ai} + \sum m_i l^2)\omega_i] \end{vmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} J^x \omega_{X_1} \\ J^y \omega_{Y_1} \\ J^z \omega_{Z_1} + \sum_i J^z_i \omega_i \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

где, $J^x = J^X_C + \sum J^x_{A_i} + \sum m_i l^2 cos^2 45^\circ$, $J^y = J^Y_C + \sum J^y_{Ai} + \sum m_i l^2 sin^2 45^\circ$, $J^z = J^Z_C + \sum J^z_{Ai} + \sum m_i l^2$, $\sum J^z_i = \sum J^z_{Ai} + \sum m_i l^2$ – приведенные осевые моменты инерции.

Теорему об изменении кинетического момента рассматриваемой механической системы запишем в виде [42, 74]:

$$\frac{d\overline{L}}{dt} = \sum \overline{M}^e_C \quad (2.34)$$

Так как вектор L является подвижным, то производная по времени определится следующим образом:

$$\frac{dL^{\rightarrow\rightarrow}}{dt} = \frac{d\bar{L}}{dt} + \sum(\omega^{\rightarrow\rightarrow}{}_0 \times L^{\rightarrow\rightarrow}) = \sum^{(e)} M^{\rightarrow\rightarrow}{}_C \tag{2.35}$$

Подставляя (2.23) в (2.25) получим:

$$\frac{dL^{\rightarrow\rightarrow}}{dt} = \begin{vmatrix} J^x\dot{\omega}_{X_1} \\ J^y\dot{\omega}_{Y_1} \\ J^z\dot{\omega}_{Z_1} + \sum J_i^z\dot{\omega}_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{\imath} & \vec{J} & \vec{k} \\ \omega_{X_1} & \omega_{Y_1} & \omega_{Z_1} \\ J^x\omega_{X_1} & J^y\omega_{Y_1} & J^z\omega_{Z_1} + \sum J_i^z\omega_i \end{vmatrix} \tag{2.36}$$

После соответствующих преобразований получим:

$$\frac{dL^{\rightarrow\rightarrow}}{dt} = \begin{vmatrix} J^x\dot{\omega}_{X_1} \\ J^y\dot{\omega}_{Y_1} \\ J^z\dot{\omega}_{Z_1} + \sum J_i^z\dot{\omega}_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} J^z\omega_{Y_1}\omega_{Z_1} - J^y\omega_{Y_1}\omega_{Z_1} + \omega_{Y_1}\sum J_i^Z\omega_i \\ J^x\omega_{X_1}\omega_{Z_1} - J^z\omega_{X_1}\omega_{Z_1} - \omega_{X_1}\sum J_i^Z\omega_i \\ J^y\omega_{X_1}\omega_{Y_1} - J^x\omega_{X_1}\omega_{Y_1} \end{vmatrix} \tag{2.37}$$

Подставляя (2.37) в (2.35) определяются соответствующие соотношения, отражающие теорему об изменении кинетического момента в проекциях на связанную систему координат:

$$\frac{dL^{\rightarrow\rightarrow}}{dt} = \begin{vmatrix} J^x\dot{\omega}_{X_1} \\ J^y\dot{\omega}_{Y_1} \\ J^z\dot{\omega}_{Z_1} + \sum J_i^z\dot{\omega}_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \omega_{Y_1}\omega_{Z_1}(J^z - J^y) + \omega_{Y_1}\sum J_i^Z\omega_i \\ |\omega_{X_1}\omega_{Z_1}(J^x - J^z) - \omega_{X_1}\sum J_i^Z\omega_i| \\ \omega_{X_1}\omega_{Y_1}(J^y - J^x) \end{vmatrix} = \begin{matrix} M_{X_1}^e \\ M_{Y_1}^e \\ M_{Z_1}^e \end{matrix} \tag{2.38}$$

Определение осевых моментов, действующих на корпус МБЛК, определены в соответствии со схемой 2.11.

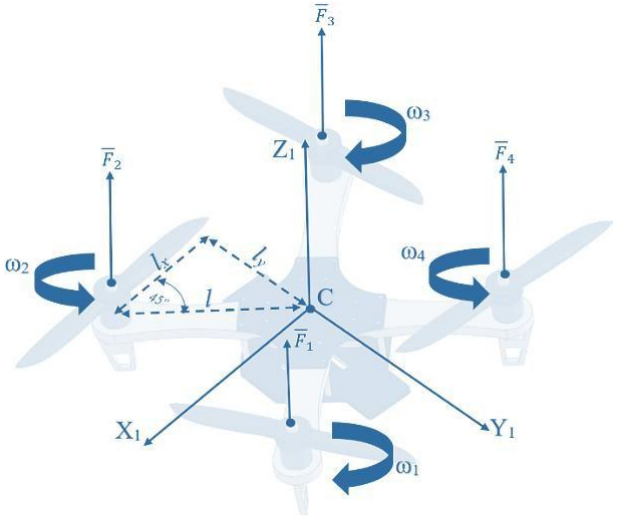


Рис.2.11. Схема определения сил и моментов, действующих на МБЛК

Осевые моменты, действующие на МБЛК примут вид:

$$M_i = \begin{vmatrix} (F_1 - F_2 - F_3 + F_4) \cdot l_x \\ (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \cdot l_y \\ \sum_{i=1} M_{C_i} \end{vmatrix} = \begin{matrix} k_T \cdot l_x(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ [k_T \cdot l_y(-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)] \\ k_M(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{matrix} \quad (2.39)$$

где, k_T, k_M– аэродинамические составляющие, l_x – расстояние от $A_i x_i y_i z_i$ до оси X_1, l_y – расстояние от $A_i x_i y_i z_i$ до оси Y_1.

Выражения (2.7), (2.22), (2.37), (2.39) представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение МБЛК:

$$\begin{cases} V_C^x = \dfrac{U_1[\sin\psi \sin\phi + \cos\psi \cos\phi])}{m} \\ V_C^y = \dfrac{U_1[\cos\phi \sin\psi \sin\theta - \cos\psi \sin\phi]}{m} \\ V_C^y = \dfrac{U_1[\cos\phi\cos\theta]}{m} - g \\ \dot{\omega}_{X_1} = [U_2 - \omega_{Y_1}\omega_{Z_1}(J^z - J^y) - \omega_{Y_1}\sum J_i^z\omega_i]/J^x \\ \dot{\omega}_{Y_1} = [U_3 - \omega_{X_1}\omega_{Z_1}(J^x - J^z) + \omega_{X_1}\sum J_i^z\omega_i]/J^y \\ \dot{\omega}_{Z_1} = [U_4 - \omega_{X_1}\omega_{Y_1}(J^y - J^x) - \sum J_i^z\dot{\omega}_i]/J^z \\ \dot{\varphi} = \omega_{X_1} - \dot{\psi}\sin\theta \\ \theta = \omega_{Y_1}\cos\varphi - \omega_{Z_1}\sin\varphi \\ \dot{\psi} = \dfrac{1}{\cos\theta}(\omega_{Z_1}\cos\varphi + \omega_{Y_1}\sin\varphi) \end{cases} \quad (2.40)$$

В этих уравнениях: $m = m_C + \sum m_i$ – общая масса МБЛК; v_C^X, v_C^Y, v_C^Z – проекции скоростей центра масс МБЛК на оси OX_1, OY_1, OZ_1 соответственно; ω_{X_1}, ω_{Y_1}, ω_{Z_1} – проекции угловой скорости МБЛК на оси подвижной системе координат; J^x, J^y, J^z – осевые моменты инерции, ϕ, ψ, θ - самолетные углы крена, рысканья и тангажа, U_1, U_2, U_3, U_4 – управляющие сигналы, обеспечивающие режимы движения МБЛК.

2.5.4. Математические модели электромеханической системы электроприводов МБЛК

Систему дифференциальных уравнений (2.40), необходимо дополнить уравнениями, описывающими вращение винтов с учетом ограниченной мощности электроприводов. Рассмотрим электромеханическую систему приводов винтов МБЛК (рисунок 2.12).

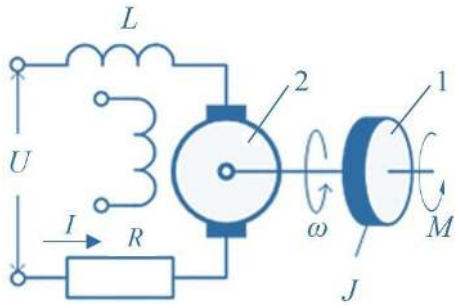


Рис.2.12. Схема бесколлекторного электродвигателя: *1* – винт; *2* – электродвигатель; *U* – управляющее напряжение; *J* – осевой момент инерции; ω(t) – частота вращения электродвигателя, *L, R* –индуктивность и активное сопротивление обмотки ротора, M - вращательный момент

Входное напряжение *U* и ток *I* представляют входную мощность $P_{вх}$, крутящий момент *M* и угловая скорость вращения ротора ω, выходную мощность$P_{вых}$ [42,75].

$$P_{вх} = I.R, P_{вых} = \omega.M \tag{2.41}$$

В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.11, напряжение системы u может быть представлено следующим образом [75]:

$$u = L\frac{\omega}{dt} + R \cdot I + K_E \cdot \omega \tag{2.42}$$

где, u – управляющее напряжение, *L, R* –индуктивность и активное сопротивление обмотки ротора, *I* – ток в обмотке электромагнита, K_E - коэффициент пропорциональности, называемый постоянной ЭДС двигателя; *J* - приведенный осевой момент инерции

При вращении ротора, регулятор коммутирует обмотки электродвигателя для получения постоянного крутящего момента. В электродвигателе создаваемый крутящий момент является линейной

функцией потребляемого тока. Общий вращательный момент системы может быть представлен следующим образом [42,76]:

$$M_T = M_R - M_L \tag{2.43}$$

где M_T – общий вращательный момент системы; M_R – вращательный момент, создаваемый электроприводом; M_L – момент сопротивления вращению, создаваемый нагрузкой.

Вращательный момент, создаваемый электродвигателем M_R определяется по формуле:

$$M_R = K_M \cdot I \tag{2.44}$$

где K_M – постоянная момента электродвигателя, I – ток в обмотке электромагнита.

Момент сопротивления вращению, создаваемый нагрузкой определяется согласно выражению:

$$M_L = \frac{\mu\, \boldsymbol{\Omega}_i^2}{N\, \eta} \tag{2.45}$$

где μ - коэффициент нагрузки, приведенный к валу двигателя, η– КПД электродвигателя, связывающий механическую энергию оси двигателя и пропеллера, Ω – угловая скорость пропеллера.

Связь между угловой скоростью вала электродвигателя ω и скоростью вращения пропеллера Ω может быть представлена следующим образом:

$$N = \frac{\omega}{\boldsymbol{\Omega}} \tag{2.46}$$

где N – передаточное отношение редуктора.

Динамика электродвигателя может быть представлена следующим выражением:

$$J\frac{\omega\omega}{dt} = M_T \tag{2.47}$$

С учетом (2.42) и (2.44) система дифференциальных уравнений, описывающая взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы в электромеханической системе приводов МБЛК, имеет вид [42]:

$$\begin{cases} J\dfrac{d\omega}{dt} = M_T \\ L\dfrac{dI}{dt} + R \cdot I + K_E \cdot \omega = u \end{cases} \quad (2.48)$$

Система дифференциальных уравнений, связывающая угловую скорость роторов пропеллеров и управляющие напряжения, поступающие на электродвигатели МБЛК, может быть решена при помощи использования численных методов.

2.6. Имитационная модель движения МБЛК

Основной целью реализации имитационной модели движения МБЛК является исследование закономерности его режимов движения для последующего формирования законов управления, обеспечивающих автономный полет МБЛК. Численное моделирование движения МБЛК проводится согласно алгоритму, представленному на рисунке 2.13.

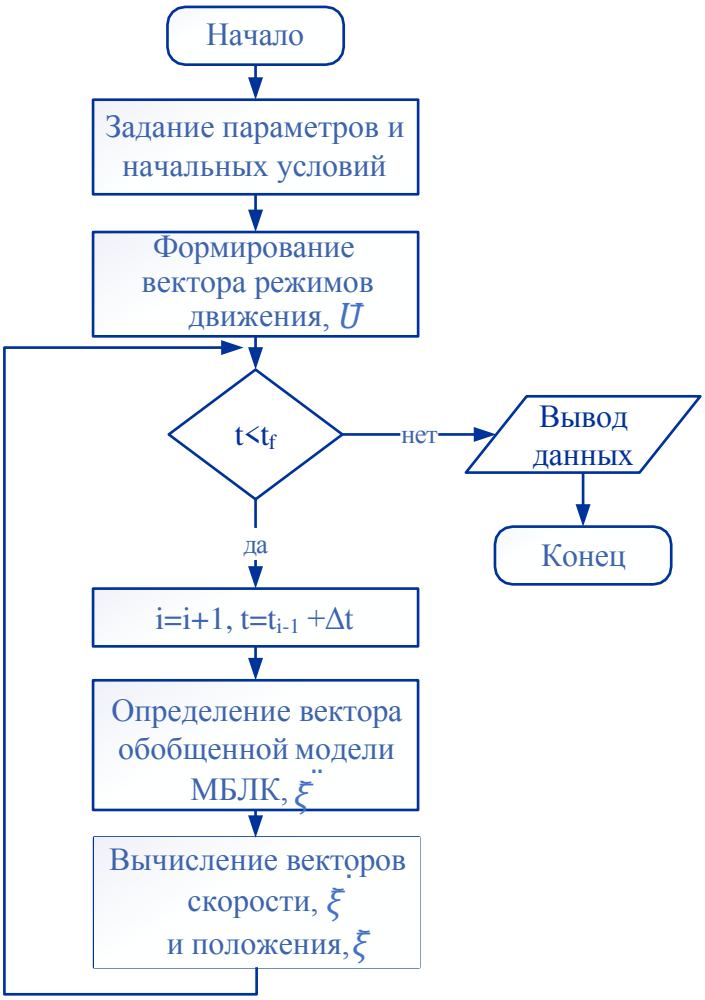


Рис.2.13. Алгоритм моделирования движения МБЛК по заданной траектории

МБЛК является нелинейным объектом, имеющим шесть обобщенных координат и оснащенным четырьмя несущими винтами, что усложняет достижение его основных режимов движения, описанных вектором $\bar{U} = [U_1 \quad U_2 \quad U_3 \quad U_4]^T$ для всех степеней свободы системы. Данные режимы движения моделируют телеуправляемое движение МБЛК на основании команд, заданных оператором:

- U_1 – вертикальное перемещение МБЛК вдоль оси *OZ* синхронным изменением угловых скоростей роторов, обеспечивающим системе необходимую подъемную силу;
- U_2, U_3 – горизонтальное перемещение МБЛК попарным изменением угловых скоростей роторов, создающим необходимые моменты для отклонения корпуса на углы тангажа и крена, а также проецирующим на плоскости суммарный вектор тяги для обеспечения движения МБЛК вдоль осей OX и OY соответственно;
- U_4 – изменение ориентации МБЛК вокруг собственной оси дифференцированным управлением угловой скоростью диагонально противоположенных роторов, создающим необходимый момент для вращения корпуса на угол рыскания.

Имитационное моделирование режимов движения МБЛК осуществляется с учетом дифференциальных уравнений (2.40) и (2.48). Для построения алгоритма интегрирования удобно представить систему (2.40) в матрично-векторной форме:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \bar{A}(\xi) + \bar{B}(\xi) \tag{2.49}$$

где, $\bar{\xi}$ –вектор скоростей центра масс МБЛК; $\bar{A}(\xi) = \begin{bmatrix} \bar{G} \\ J^{-1}(-J\bar{\omega} \times \bar{\omega}) \end{bmatrix}$ – матрица, содержащая вектор гравитационной составляющей $\bar{G} = [0 \quad 0 \quad -g]^T$ и вектор проекций изменения кинетического момента на связанную систему координат; $\bar{B}(\xi) = \begin{bmatrix} U_1/m \\ J^{-1}\bar{M}_i \end{bmatrix}$ – матрица, содержащая

векторы проекций результирующей подъемной силы U_1 и внешних осевых моментов $M_i = [U_2 \quad U_3 \quad U_4]^T$.

Таким образом, многомерный вектор $\xi = [\vec{\alpha} \quad \vec{\gamma}]^T$ включает в себя векторы изменения линейной $\vec{\alpha}$ и угловой $\vec{\gamma}$ ускорений центра масс МБЛК, принимающий в дискретной форме следующий вид:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\xi^k - \xi^{k-1}}{\Delta t} \tag{2.50}$$

где, k – номер шага, Δt – интервал дискретизации.

Процедура вычисления векторов изменения скорости ξ и положения ξ центра масс МБЛК проводится методами Эйлера и Рунге-Кутты. В результате анализа значений абсолютных и относительных погрешностей вычислений дифференциальных уравнений на k-м шагу интегрирования выявлено, что наиболее точным является методом Рунге-Кутты четвертого порядка, однако путем уменьшения интервала дискретизации, полученные результаты вычислений методом Эйлера представляются сопоставимыми по критериям быстродействия, точности и вычислительных ресурсов.

Определение векторов скорости и положения (состояния) МБЛК является последовательной операцией. Таким образом, определив текущее значение ξ возможно перейти к нахождению в следующий момент времени вектора ξ:

$$\xi(t + \Delta t) \approx \xi(t) + \frac{d\xi}{dt}\Delta t \tag{2.51}$$

Программная реализация алгоритма моделирования движения МБЛК (рисунок 2.13) осуществляется в математическом программном пакете MATLAB с учетом выражений (2.48), (2.49), а также габаритных, массо-инерционных и электромеханических характеристик системы (табл.2.1).

Табл. 2.1.

Основные параметры МБЛК

Параметр	Символ	Значение	Ед. измерения
Масса квадрокоптера	m	1.5	[кг]
Сила тяжести	g	9,8	[м/с^2]
Аэродинамическая постоянная	K_T	8.04x10^{-6}	[Нс^2]
Коэффициент сопротивления	K_M	2.42x10^{-7}	[Нс^2]
Плотность воздуха	ρ	1,204	[кг/м^3]
Момент инерции вокруг оси *x*	J_X	2,24 *x10*$^{-3}$	[кг.м^2]
Момент инерции вокруг оси *y*	J_Y	2,98 *x10*$^{-3}$	[кг.м^2]
Момент инерции вокруг оси *z*	J_Z	14,2 *x10*$^{-3}$	[кг.м^2]

На рисунках 2.14 - 2.18 приведен результат моделирования режима движения U_1, обеспечивающий вертикальное перемещение МБЛК вдоль оси OZ.

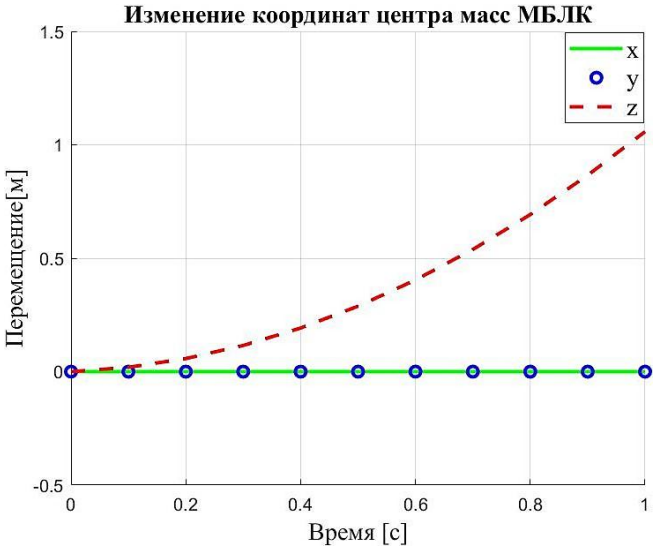


Рис.2.14. График зависимости перемещения центра масс МБЛК от времени t

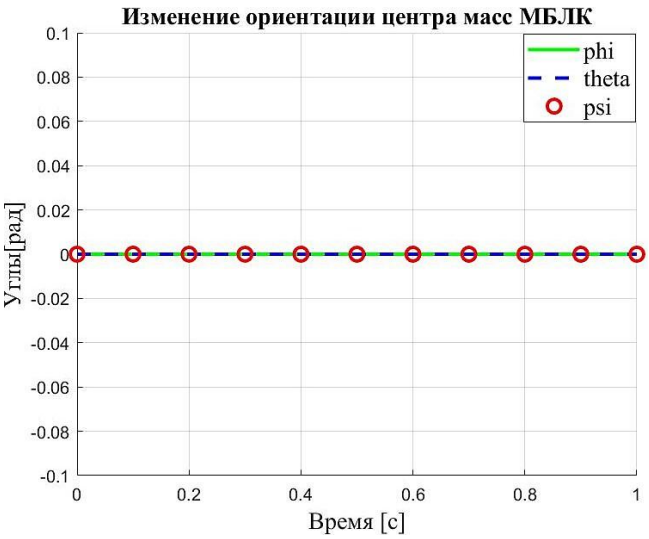


Рис.2.15. График изменения ориентации центра масс МБЛК от времени t

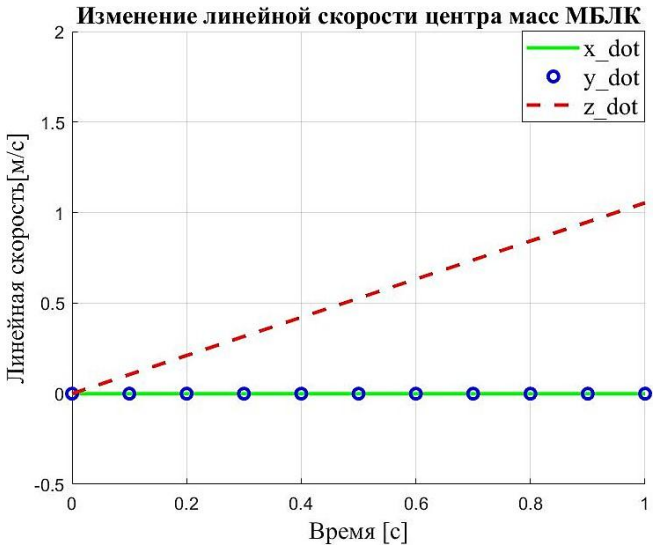


Рис.2.16. График зависимости линейной скорости центра масс МБЛК от времени t

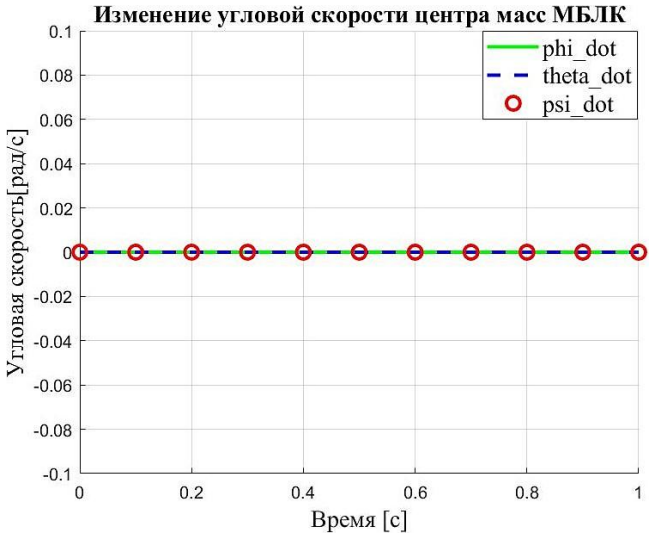


Рис.2.17. График зависимости угловой скорости центра масс МБЛК от времени t

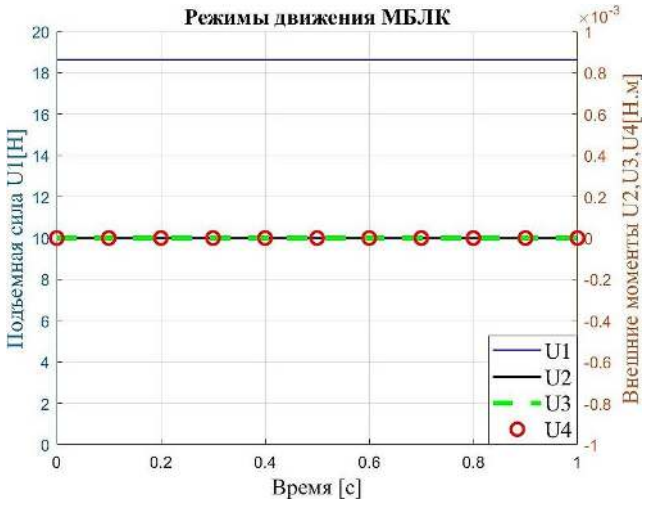


Рис.2.18 Графики формирования режимов движения МБЛК

Из результатов моделирования режима вертикального перемещения выявлено, что отрыв МБЛК от земли происходит со скоростью 1,2 м/с при постоянной частоте вращения несущих винтов – 6208 об/мин, обеспечивающих результирующую подъемную силу (U_1) – 18,6 Н.

На рисунках 2.19 – 2.23 представлен результат моделирования режима движения U_2, обеспечивающий изменение ориентации МБЛК вокруг оси OX на угол крена (φ), а также его горизонтальное перемещение вдоль оси OY.

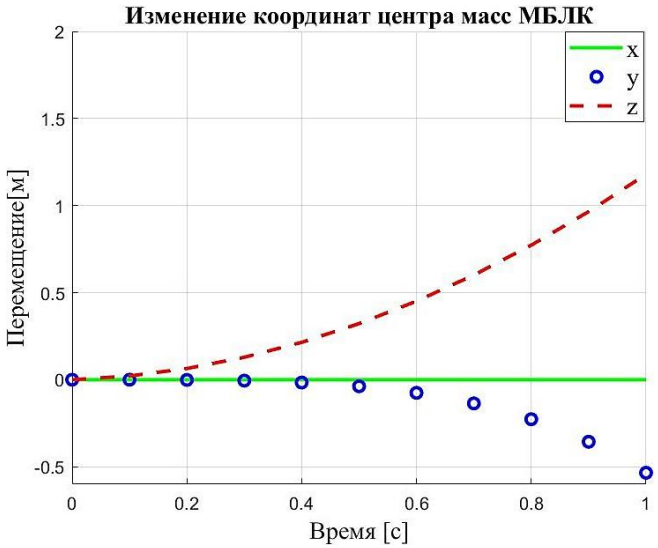


Рис.2.19. График зависимости перемещения центра масс МБЛК от времени t

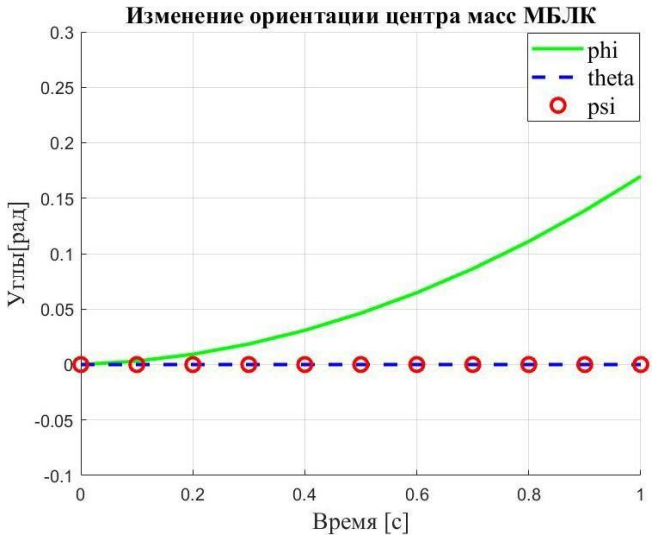


Рис.2.20. График изменения ориентации центра масс МБЛК от времени t

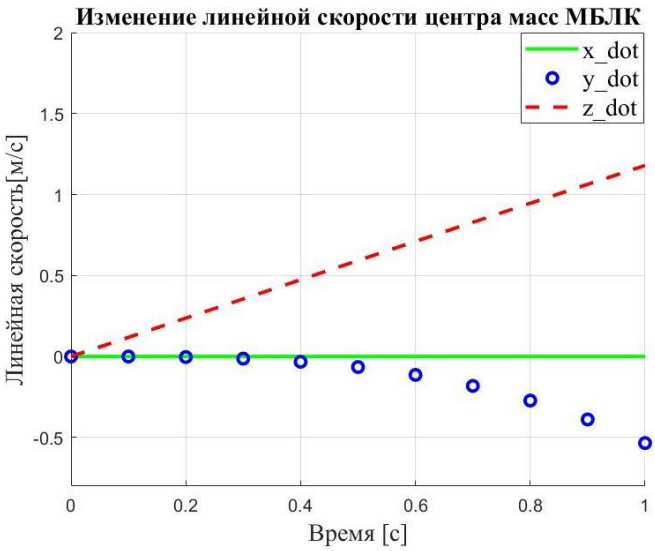


Рис.2.21. График зависимости линейной скорости центра масс МБЛК от времени t

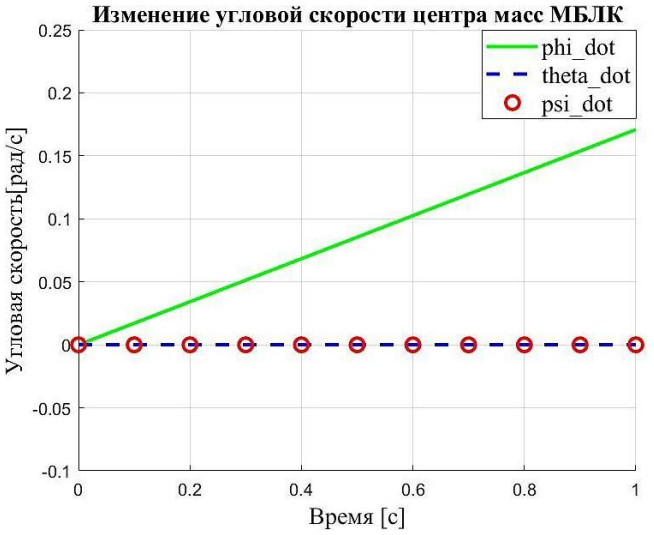


Рис.2.22. График зависимости угловой скорости центра масс МБЛК от времени t

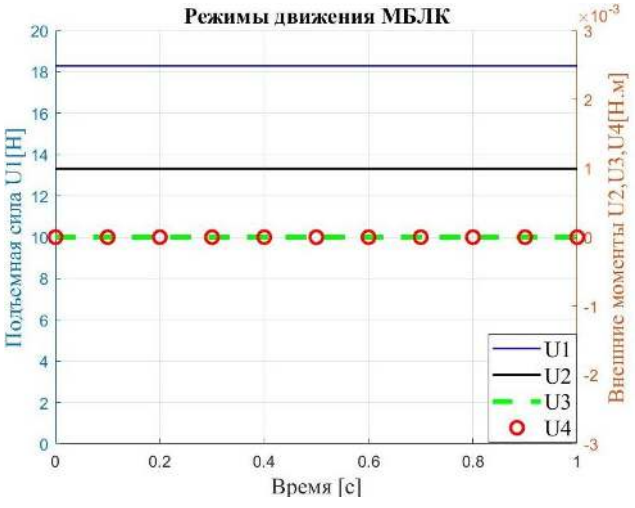


Рис.2.23 Графики формирования режимов движения МБЛК

Из результатов моделирования режима движения U_2 выявлено, что отрыв МБЛК от земли происходит со скоростью 1,17 м/с при постоянной частоте вращения несущих винтов $\omega_1 = \omega_4 = 6208$ об/мин и уменьшением значений ω_2 и ω_3 на 1,62%. Таким образом, центр масс МБЛК отклоняется относительно оси *OX* на угол $\varphi=10^o$ и перемещается вдоль отрицательного направления оси *OY* на расстояние 0,53 м за 1 секунду.

Аналогичным образом проводится моделирование режима движения U_3, в результате которого установлено, что при увеличении частоты вращения несущих винтов ω_3 и ω_4 на 1,62%, центр масс МБЛК отклоняется относительно оси *OY* на угол $\theta = -10^o$ и перемещается вдоль положительного направления оси OX со скоростью 0,53 м/с.

На рисунках 2.24 – 2.28 представлен результат моделирования режима движения U_4, обеспечивающий изменение ориентации МБЛК вокруг собственной оси *OZ* на угол рыскание $\psi = 45^o$ посредством увеличения частоты вращения диагонально противоположенных несущих винтов ω_2 и ω_4 на 5%, что позволяет МБЛК переместиться вдоль положительного направления оси *OZ* со скоростью 1,24 м/с.

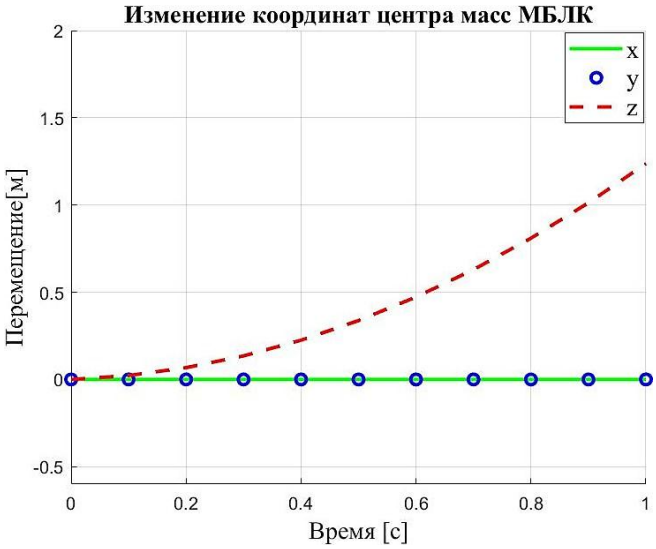


Рис.2.24. График зависимости перемещения центра масс МБЛК от времени t

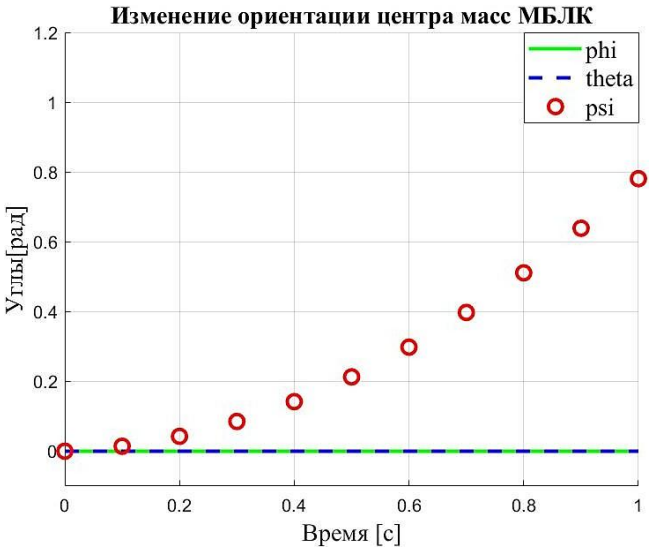


Рис.2.25. График изменения ориентации центра масс МБЛК от времени t

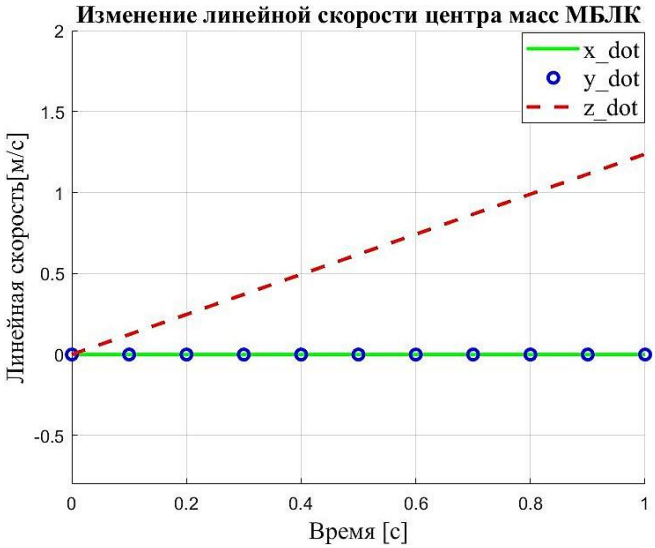


Рис.2.26. График зависимости линейной скорости центра масс МБЛК от времени t

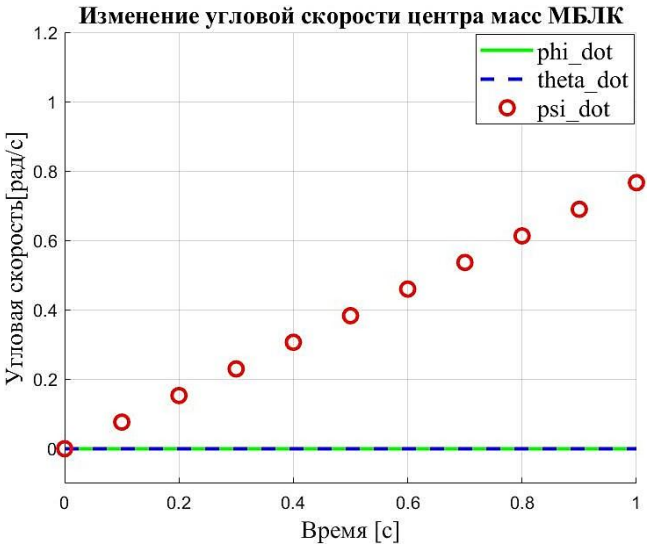


Рис.2.27. График зависимости угловой скорости центра масс МБЛК от времени t

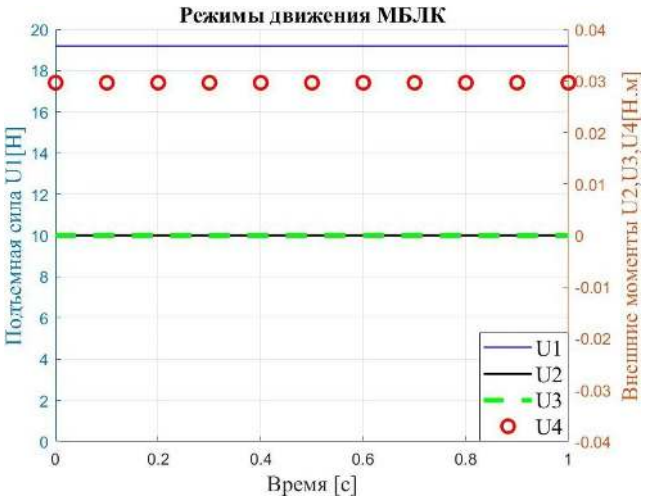


Рис.2.28 Графики формирования режимов движения МБЛК

Выводы по второй главе

1. Разработана структура системы мониторинга прибрежных территорий роботизированного типа, включающая оператора, человеко-машинный интерфейс и малогабаритный беспилотный летательный комплекс.

2. Разработана математическая модель пространственного движения МБЛК на основе кинематического и динамического анализов, позволяющих определить систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение системы в пространстве с учетом гироскопических эффектов, вращающихся винтов и элементов электроприводов, кинематических связей, свойств электроприводов и возмущающих воздействий.

3. Разработан алгоритм и методика решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для численного моделирования основных режимов движения МБЛК, формирующих телеуправляемое движение МБЛК на основании команд, заданных оператором.

4. Разработана имитационная модель МБЛК, позволяющая провести оценку адекватности предложенной математической модели, исследование закономерности движения МБЛК и формирование основных законов управления.

Глава 3. ИЗУЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МБПК

3.1. Планирование траектории движения

Рассмотрим движение МБЛК вдоль кусочно-линейной траектории, состоящей из отрезков прямой, представленной на рис.3.1. Задача траекторного управления сводится к тому, что необходимо обеспечить движение точки P, принадлежащей МБЛК вдоль отрезка прямой линии $P_{i-1}P_i$. При этом, учитывается возможность МБЛК выполнять как разомкнутую (вдоль береговой линии с последующей посадкой в промежуточный пункт управления или подзарядки), так и замкнутую (для локального обследования местности с возвратом в пункт взлета) траектории.

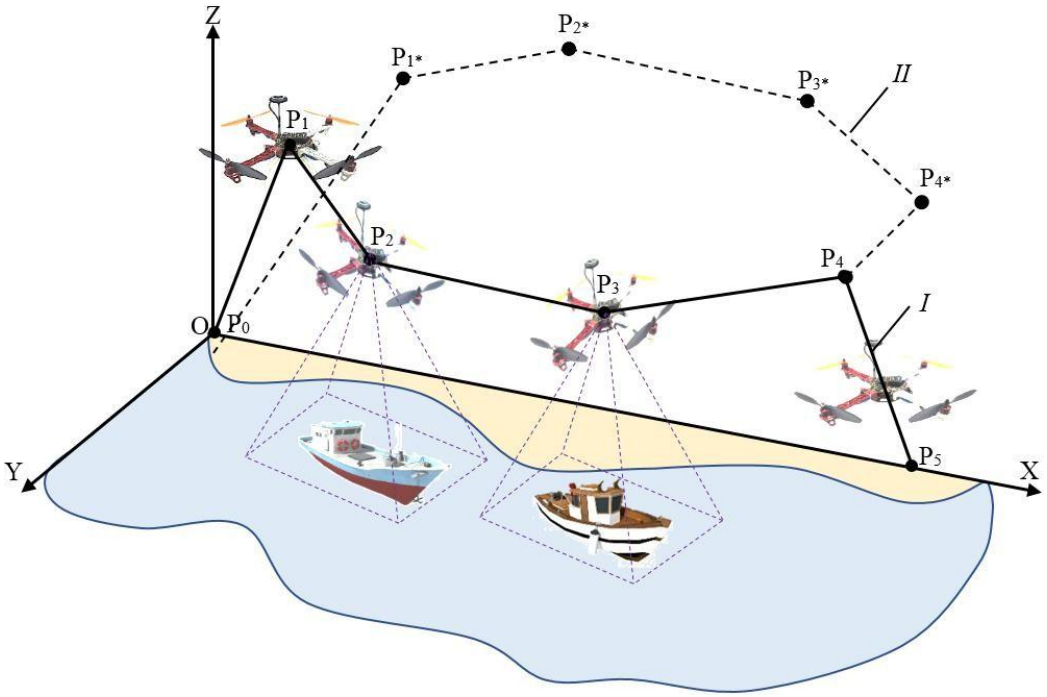


Рис.3.1 Планируемая траектория движения МБЛК: *I*, *II* – разомкнутый и замкнутый виды траектории

Построение *i-го* сегмента траектории представляет собой двухточечную задачу, решение которой зависит от имеющейся информации о соседних путевых точках P_i, выступающей в качестве граничных условий: координаты, скорости и ускорения в начальный и конечный момент времени на каждом сегменте. Из этого следует, что закон пространственного движения МБЛК представляется тремя параметризированными полиномами 5-го порядка, зависящими от времени t:

$$\bar{p}(t) = \left(\sum_{i=0}^{5} cx_i \cdot t^i,\ \sum_{i=0}^{5} cy_i \cdot t^i,\ \sum_{i=0}^{5} cz_i \cdot t^i\right)^T \quad (3.1)$$

где, cx_i, cy_i, cz_i – коэффициенты, определяющихся из граничных условий.

Управление движением МБЛК на каждом сегменте траектории скоростью и ускорением осуществляется путем дифференцирования выражения (3.1). Следовательно, обобщенная система уравнений, представляющая собой закон траектории движения МБЛК, состоящая из i-го количества сегментов прямых:

$$P(t) = \begin{bmatrix} P_i^d(t) \\ P_i^d(t) \\ P_i^d(t) \\ P_{i+1}^d(t) \\ P_{i+1}^d(t) \\ [P_{i+1}^d(t)] \end{bmatrix} = \begin{cases} c_5 \cdot t_i^5 + c_4 \cdot t_i^4 + c_3 \cdot t_i^3 + c_2 \cdot t_i^2 + c_1 \cdot t_i + c_0 \\ 5c_5 \cdot t_i^4 + 4c_4 \cdot t_i^3 + 3c_3 \cdot t_i^2 + 2c_2 \cdot t_i + c_1 \\ 20c_5 \cdot t_i^3 + 12c_4 \cdot t_i^2 + 6c_3 \cdot t_i + 2c_2 \\ c_5 \cdot t_{i+1}^5 + c_4 \cdot t_{i+1}^4 + c_3 \cdot t_{i+1}^3 + c_2 \cdot t_{i+1}^2 + c_1 \cdot t_{i+1} + c_0 \\ 5c_5 \cdot t_{i+1}^4 + 4c_4 \cdot t_{i+1}^3 + 3c_3 \cdot t_{i+1}^2 + 2c_2 \cdot t_{i+1} + c_1 \\ 20c_5 \cdot t_{i+1}^3 + 12c_4 \cdot t_{i+1}^2 + 6c_3 \cdot t_{i+1} + 2c_2 \end{cases} \quad (3.2)$$

где, $P_i^d = [x_i^d, y_i^d, z_i^d]^T$ – вектор координат текущей путевой точки, P_i^d, P_i^d – векторы скоростей и ускорений, $c_i = [cx_i, cy_i, cz_i]^T$ – вектор коэффициентов, определяющихся из граничных условий.

В результате планирования траектории движения МБЛК получены векторы, соответствующие желаемым значениям по положению, скорости и ускорению на каждом сегменте траектории. Эти параметры необходимы для определения ошибок и выработки управляющих сигналов, поступающих на электроприводы МБЛК согласно разработанным алгоритмам управления.

Пусть разомкнутая траектория движения МБЛК будет состоять со следующих этапов: взлет, полет по горизонтальной плоскости и посадка (рисунок 3.1). Первый этап (взлет) происходит из точки $P_0(x_0,y_0,z_0)$ в $P_1(x_1,y_1,z_1)$. Второй этап (полет по горизонтальной плоскости) предполагает движение из точки $P_1(x_1,y_1,z_1)$ в точку $P_4(x_4,y_4,z_4)$, проходя через промежуточные точки $P_2(x_2,y_2,z_2)$ и $P_3(x_3,y_3,z_3)$ соответственно. Последний этап движения (посадка) осуществляется из точки $P_4(x_4,y_4,z_4)$ в $P_5(x_5,y_5,z_5)$. В случае замкнутой

траектории движения, вводится дополнительный этап, начинающийся в точке P_4 и характеризующийся движением МБЛК по путевым точкам P_i^*, принадлежащим отрезку прямой линии $P_{i-1}^* P_i^*$ для того, чтобы обеспечить возврат МБЛК в пункт взлета. Таким образом, при замкнутой траектории, посадка осуществляется из точки $P_1^*(x_1^*, y_1^*, z_1^*)$ в $P_0(x_0,y_0,z_0)$.

Начало полета МБЛК от земли происходит в момент времени, когда нормальная реакция опорной поверхности $N = 0$, при этом выполняется условие: $U_1 > F_{mg}$, $\varphi = \theta \cong 0$. Ориентация МБЛК относительно заданной траектории является важной задачей, решение которой предполагает поворот центра масс аппарата на курсовой угол χ (угол между диаметральной плоскостью летательного аппарата и направлением на траекторию) путем вращения МБЛК вокруг его центра масс на угол рысканья ψ, а затем необходимо развернуть аппарат на угол β, который определяется как гиперболический тангенс угла наклона между прямой P и осью OY (рисунок 3.2.а). Таким образом, курсовой угол для МБЛК $\chi = \psi$ равен углу рысканья, и определяется выражением:

$$\chi = atan2\ \frac{Y_1}{X_1} \tag{3.3}$$

где X_1, Y_1 – направление подвижной системы координат.

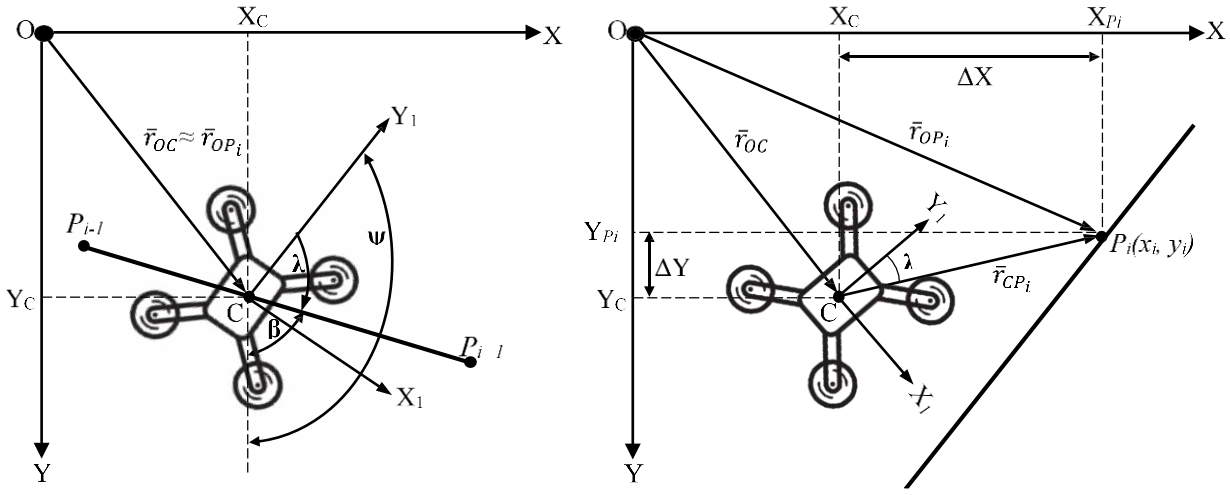


Рис.3.2. Схема следования траектории МБЛК: а) корректировка курсового угла λ, б) корректировка движения по горизонтальной плоскости

Внешние возмущения влияют на динамику полета МБЛК, что может привести к появлению отклонений от желаемой траектории движения (рисунок 3.2.б). Предлагается осуществить возвращение летательного аппарата на траекторию, поворачивая МБЛК на курсовой угол χ, а затем вычислить вектор отклонений пути ΔP по формуле:

$$\Delta \bar{P} = \begin{vmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{vmatrix} = T_{10}\ (\bar{r}_i^{CPi}) \tag{3.4}$$

где, $\bar{r}_i^{CPi} = \bar{r}_{OC} - \bar{r}_i^{OPi}$ – вектор, представляющий собой путь следования МБЛК в i-ую точку заданной траектории, $T_{10} = \begin{vmatrix} cos\,\chi & sin\,\chi & 0 \\ -sin\,\chi & cos\,\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица перехода из подвижной в инерциальную систему координат.

В результате устранения отклонений пути, МБЛК должен прилететь к заданной точке траектории $P_i(x_i,y_i)$, а затем необходимо аналогично сориентировать летательный аппарат относительно заданной траектории на курсовой угол χ. Кроме того, при построении различных видов траекторий, цикл движения МБЛК может быть представлен в виде отдельных этапов, связанных с поворотом и движением по прямой. Общее время цикла движения МБЛК по траектории выражается следующим образом:

$$T_{AB} = \sum_{i=1}^{N} T_i \tag{3.5}$$

где N- число циклов движения по траектории.

3.2 Обобщенная математическая модель движения МБЛК

Обобщенная математическая модель МБЛК является единым и компактным представлением исследуемого объекта, включающая в себя кинематическую, динамическую и электромеханическую составляющие системы. В общем виде данная модель может быть описана следующим выражением [22]:

$$D\dot{\bar{q}} + F(\bar{q}) = M \tag{3.6}$$

где, $D = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J^x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^z \end{bmatrix}$ – матрица инерции системы; m – масса МБЛК; $J^x,\ J^y,\ J^z$ – осевые моменты инерции; $\bar{q} = [\vec{V_c}\ \ \vec{\omega}]^T$ – многомерный вектор, включающий в себя векторы изменения абсолютной линейной скорости $\vec{V_c}$ и угловой скорости вращения МБЛК относительно центра масс; $\dot{\bar{q}} = [\vec{V_{\dot{c}}}\ \ \vec{\omega}]^T$ – вектор линейной и угловой ускорений центра масс МБЛК; $F(\bar{q}) = [F_X\ \ F_Y\ \ F_Z\ \ M_{CX1}\ \ M_{CY1}\ \ M_{CZ1}]^T$ – вектор внешних сил и моментов, действующих на МБЛК; $M = [\bar{\Phi}\ \ \vec{M}(\bar{\Phi})]^T$ – вектор сил и моментов внешних возмущений.

Таким образом, выражение (3.6) примет вид:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J^x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J^z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{CX} \\ V_{CY} \\ V_{CZ} \\ \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathrm{F}_X \\ \mathrm{F}_Y \\ \mathrm{F}_Z \\ M_{CX1} \\ M_{CY1} \\ M_{CZ1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_X \\ \Phi_Y \\ \Phi_Z \\ M_{CX1}(\bar{\Phi}) \\ M_{CY1}(\bar{\Phi}) \\ M_{CZ1}(\bar{\Phi}) \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Синтез автономной системы управления МБЛК характеризуется сложностью описания математической модели таких ветровых возмущений, как порывы или сдвиги ветра, имеющих сложный характер распределения в пространстве. В общем случае, вектор сил внешних возмущений $\bar{\Phi}$, описывающий воздействие ветрового потока на динамку и устойчивость полета МБЛК может быть представлен в следующем виде:

$$\bar{\Phi} = \bar{\nu}\mu\bar{\nu}^{\mathrm{T}} = [\Phi_X\ \ \Phi_Y\ \ \Phi_Z]^T \tag{3.8}$$

где, $\mu = diag(\mu_X,\ \mu_Y,\ \mu_Z)$ – матрица эмпирических коэффициентов сопротивления, зависящие от аэродинамических характеристик корпуса и угла атаки несущих винтов, $\bar{\nu}$ – вектор относительной скорости центра масс МБЛК.

Вектор относительной скорости центра масс МБЛК $\bar{v}$ является разностью между векторами абсолютной скорости центра масс $\bar{V}_C$ и скорости ветрового потока $\bar{V}_{\text{В}}$ [22]:

$$\bar{v} = \bar{V}_C - \bar{V}_{\text{В}} \tag{3.9}$$

При этом, скорость изменения ветрового потока является случайной величиной, которую можно представить в виде тригонометрических функций со случайными амплитудами, определяемыми коэффициентами порывистости и периодами пульсаций ветровой нагрузки.

Кроме того, выражение (3.6) может быть преобразована к виду:

$$\ddot{\bar{q}} = D^{-1}M(\bar{q}) + D^{-1}F(\bar{q}) = D^{-1}\left[\begin{bmatrix}\bar{\Phi}\\ M(\bar{\Phi})\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{4}\text{F}_{xi}\\ \sum_{i=1}^{4}\text{F}_{yi}\\ \sum_{i=1}^{4}\text{F}_{zi}\\ M^{e}(\bar{\Phi})\\ M^{e}_{CX1}(\bar{\Phi})\\ [M^{e}_{CZ1}(\bar{\Phi})]\end{bmatrix}\right] \tag{3.10}$$

где, $F(\bar{q}) = \begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{4}\text{F}_i\,(sin\,\psi\,sin\,\phi + cos\,\psi\,cos\,\phi)\\ \sum_{i=1}^{4}\text{F}_i\,(cos\,\phi\,sin\,\psi\,sin\,\theta - cos\,\psi\,sin\,\phi)\\ \sum_{i=1}^{4}\text{F}_i\,(cos\phi co\,s\,\theta) - g\\ (\text{F}_1 - \text{F}_2 - \text{F}_3 + \text{F}_4)l_x\\ (-\text{F}_1 - \text{F}_2 + \text{F}_3 + \text{F}_4)l_y\\ \sum_{i=1}^{4}M_{C_i}\end{bmatrix}$ – вектор управляющих воздействий; $M(\bar{q}) = [\Phi_X \quad \Phi_Y \quad \Phi_Z \quad M^{e}_{CX1}(\bar{\Phi}) \quad M^{e}_{CY1}(\bar{\Phi}) \quad M^{e}_{CZ1}(\bar{\Phi})]^T$ – вектор возмущающих воздействий; D^{-1} – обратная матрица инерции.

Таким образом, выражение (3.10) примет вид:

$$\ddot{\bar{q}} = A(\bar{q}) + B(\bar{q})\bar{U} \tag{3.11}$$

где, A, B – матрицы параметров МБЛК вида $A(\bar{q}) = [a_{i,j}(\bar{q})(i,j = 1,\bar{n})], n = 6$; $B(\bar{q}) = [b_{i,j}(\bar{q})(i,j = 1,\bar{m})], m = 6$; $\bar{U}$ – вектор управляемых сигналов, $\bar{U} \in R^m; m \leq n$.

Матрицы параметров и вектора управляемых сигналов МБЛК примут вид:

$$A = D^{-1}\begin{bmatrix}\Phi_X\\ \Phi_Y\\ \Phi_Z\\ \eta_{\varphi}\\ \eta_{\theta}\\ \eta_{\psi}\end{bmatrix}; \quad \vec{U} = \begin{bmatrix}U_1\\ U_1\\ U_1\\ U_2\\ U_3\\ U_4\end{bmatrix}; \tag{3.12}$$

$$B = D^{-1}\begin{bmatrix}\sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\sin\phi & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cos\phi\cos\theta & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}0\\ 0\\ g\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$

Полученная обобщенная математическая модель МБЛК основывается на методах декомпозиции, что упрощает сложность модели МБЛК и позволяет ее использование при разработке и отладке системы автоматического управления, создании алгоритмов и синтезе регуляторов, исследовании влияния внешних возмущающих воздействий на устойчивое движение МБЛК и др.

3.3. Модель возмущающих воздействий, действующих на МБЛК

Малогабаритные летательные аппараты достаточно чувствительны к внешним возмущениям (кратковременным перемещениям воздушных масс и водных течений) из-за относительно низких скоростей, моментов инерции, малого размера и веса. Кроме того, силы, относящиеся к внешним возмущениям, являются источником дополнительных сил и моментов, действующих на МБЛК, а также обладают сложным и непредсказуемым характером распределения в пространстве, что отрицательно сказывается на статической и динамической устойчивости системы. При движении МБЛК одними из основных внешних возмущений являются ветровые возмущения, которые могут быть направлены встречно, ортогонально или попутно. На рисунок 3.3. представлен частный случай воздействия на движение МБЛК ортогональное (боковое) ветровое возмущение, представляющееся вектором $\vec{V}_в = [V_{в\,x}^{x}, V_{в\,x}^{y}, V_{в\,x}^{z}]^T$, проекции которого располагаются в системе координат $OX_1Y_1Z_1$.

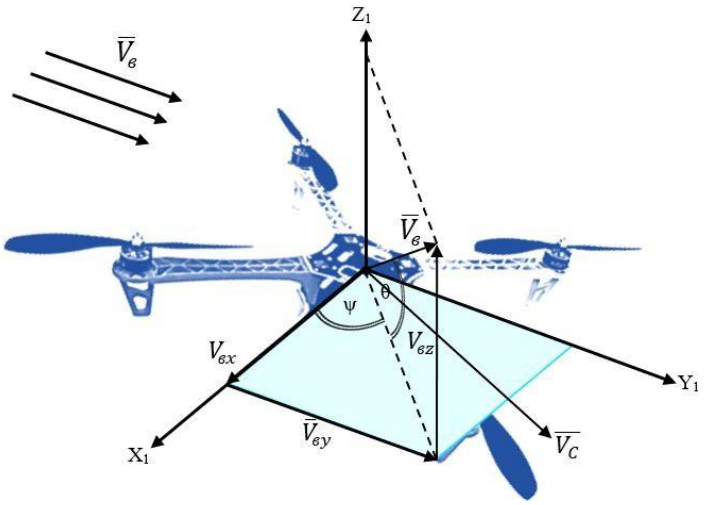


Рис.3.3. Схема ветрового возмущения, действующего на МБЛК

Кроме того, ветровые возмущения могут считаться процессами детерминированного или случайного характера, повторяющимися через определенный промежуток времени (периодические и непериодические) или возникающими на конкретном временном участке (импульсные) [22, 79, 80]. Случайные модели ветровых возмущений могут быть описаны аналитическим способом в виде стохастических функций, динамику которых невозможно предсказать. Совокупность подобных функций называются случайными процессами и образуют статистический ансамбль, представляющийся набором состояний системы, отвечающих определенным критериям [80, 81].

Рассмотрим случайную модель ветрового возмущения, описанную следующим выражением:

$$V_в(t) = V_0 + V_B \sin \Omega t \qquad (3.13)$$

где, V_B, Ω – случайные параметры амплитуды и частоты ветровой нагрузки.

Следовательно, выражение (3.13) представляет собой квазидетерминированный процесс, реализация которого описывается функцией, характеризующейся амплитудными и частотными параметрами, произвольно изменяющимися во времени. С другой стороны, детерминированные модели ветровых возмущений можно представить в виде сигналов:

- короткого импульсного характера (3.14), характеризующихся прямоугольной формой, возникающей за счет того, что амплитуда сигнала мгновенно возрастает от минимального до максимального ее значения, сохраняя постоянным данное состояние в течение некоторого времени с последующим возвращением к минимальному значению амплитуды.

$$V_{в}(t) = k_1(t)V_0 \tag{3.14}$$

где, $k_1(t) = \begin{cases} 0, & t_i < t_0^{имп} \\ 1, & t_f^{имп} \geq t_i \geq t_0^{имп} \end{cases}$ – функция, определенная в некотором интервале (от начального временного значения, соответствующего появлению импульсного сигнала $t_0^{имп}$ до его конечного значения $t_f^{имп}$, при котором амплитуда сигнала является максимальной); V_0 – максимальное допустимое значение ветровой нагрузки.

- скачкообразного характера (3.15), резко изменяющих амплитуду сигнала, значение которой поддерживается на постоянном уровне.

$$V_{в}(t) = k_2(t)V_0 \tag{3.15}$$

где, $k_2(t) = \begin{cases} 0, & t_i < t_0^{имп} \\ 1, & t_i \geq t_0^{имп} \end{cases}$ – функция, зависящая от времени, которая служит переключателем значения ветровой нагрузки, влияющей на движение МБЛК; V_0 – максимальное допустимое значение ветровой нагрузки.

3.3. Структура системы управления МБЛК

В общем виде, структурная схема системы автоматического управления МБЛК можно представить, как совокупность следующих модулей: оператор, человеко-машинный интерфейс и МБЛК. В свою очередь, человеко-машинный интерфейс включает в себя блоки планирования траектории, обработки данных и принятия решений. Кроме того, МБЛК состоит из блоков электроприводов и измерительных приборов. Одним из важнейших блоков системы управления является блок принятия решений, который согласно установленным алгоритмам в реальном масштабе времени выполняет ряд задач, включая стабилизацию ориентации в пространстве и управление

движением по заданной траектории путем выработки управляющих напряжений, поступающих на исполнительные приводы МБЛК.

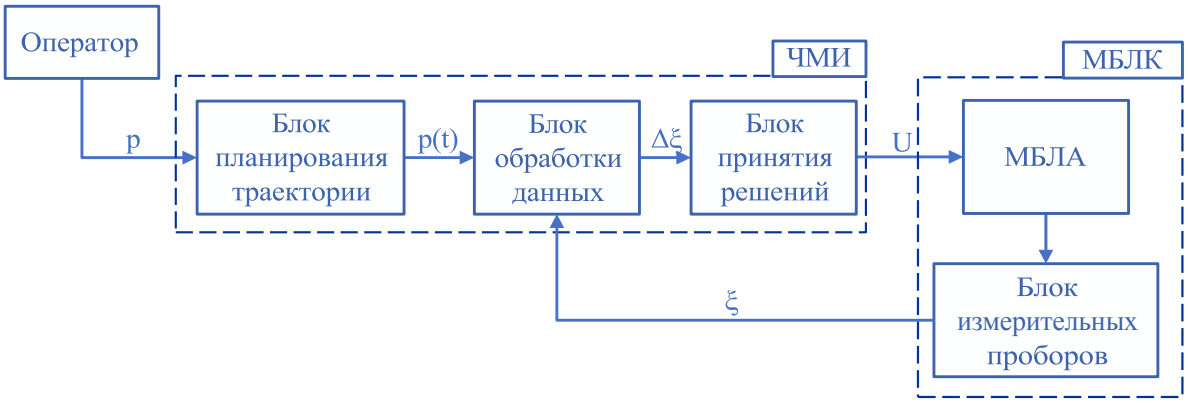


Рис.3.4. Структурная схема САУ движением МБЛК

Задача мониторинга проводится МБЛК по заранее заданной оператором траектории обследуемой территории массивом GPS координат $p = [p_1, p_2, \ldots p_i]$. Полученный массив данных поступает в блок планирования траектории, где формируется закон пространственного движения МБЛК, который представляет собой систему, состоящую из n-го количества отрезков прямых и определяется вектором $\bar{p}(t) = [x^d,\ y^d, z^d, \psi^d]^T$.

Кроме того, МБЛК оснащён блоком измерительных приборов, позволяющим осуществлять задачу оценки текущего состояния летательного аппарата через канал обратной связи системы управления. В качестве измерительных приборов используются: инерциальный модуль (углы крена φ и тангажа θ), магнитометр (угол рыскания ψ), GPS модуль (координаты x, y) и барометр (координата z). Полученные данные требуют обработки посредством использования наблюдателя (например, на основе нелинейного фильтра Калмана). Результирующий многомерный вектор состояний МБЛК $\bar{\xi}(t) = [\bar{\alpha},\ \bar{\gamma}]^T$ включает в себя векторы положения центра масс $\bar{\alpha} = [x,\ y,\ z]^T$ и ориентации $\bar{\gamma} = [\varphi,\ \theta,\ \psi]^T$ летательного аппарата в пространстве. Таким образом, в блок принятия решений поступает информация об оценке возникших отклонений системы в виде вектора $\Delta\xi(t) = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\psi]^T$.

Важной задачей системы управления является формирование вектора выходных управляющих состояний $U(t) = [U_1, U_2, U_3, U_4]^T$ на основании имеющейся информации о системе и заложенных в блоке принятия решений алгоритмов. Данный вектор определяет связь между электрическими исполнительными приводами и платформой МБЛК.

Следовательно, расчет вектора требуемых напряжений $\bar{u}(t) = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ проводится микроконтроллером по формулам опираясь на значения вектора управляющих состояний МБЛК. Вектор требуемых управляющих напряжений $\bar{u}$ зависит от величины $\Delta\xi$. В этой связи, угловая скорость, создаваемая электрическими приводами, может быть представлена следующим образом:

$$\omega_i = f\left(U(\Delta\xi)\right), \quad i = 1 - 4 \tag{3.16}$$

где, ω_i – угловая скорость *i-го* электродвигателя.

Выработка управляющих сигналов производится регулятором, общая работа которого может быть представлена следующим выражением [82, 83]:

$$U(\Delta\xi) = K_p \cdot \Delta\xi(t) + K_i \cdot \int_0^t \Delta\xi dt + K_d \cdot \frac{d\Delta\xi}{dt} \tag{3.17}$$

где, K_p, K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно.

Принято, что критические углы крена, тангажа и рыскания должны изменяться в диапазоне $-\pi/6 < \varphi < \pi/6$, $-\pi/6 < \theta < \pi/6$ и $-2\pi < \psi < 2\pi$ соответственно. При этом, курсовой угол λ, представляющий азимут, по которому необходимо МБЛК двигаться в ходе выполнения траектории можно определить согласно следующим условиям [35]:

$$\chi(t) = \begin{cases} \Delta\psi - 2\pi, & \Delta\psi > \pi \\ \Delta\psi + 2\pi, & \Delta\psi < -\pi \\ \Delta\psi, & -\pi < \Delta\psi < \pi \end{cases} \tag{3.18}$$

3.5 Синтез алгоритма системы управления МБЛК

С точки зрения теории управления МБЛК, выполненный по квадрокоптерной схеме является нелинейным объектом с перекрёстными связями, управление которым реализуется сложными и взаимосвязанными системами каскадного типа, представляющими последовательное соединение нескольких контуров управления. При синтезе многоканального регулятора и закона управления МБЛК основной проблемой представляется определение структуры и параметров регулятора, образующего вектор выходных управляющих воздействий в соответствии с установленным алгоритмом. Процедура синтеза алгоритма управления МБЛК осуществляется с учетом обобщенной математической модели МБЛК, описываемой выражением (3.11), представление которого может быть преобразовано к виду:

$$\begin{cases} \bar{\dot{q}} = f(\bar{Y}, \bar{q}, \bar{U}), \\ \bar{Y} = \chi(\xi) \end{cases} \tag{3.19}$$

где, $\bar{\dot{q}} = d\bar{\xi}/dt$ – вектор угловых ускорений центра масс МБЛК; $\bar{U}$ – вектор управляющих сигналов, $\bar{\xi} = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ – вектор состояний системы; $\bar{Y}$ – вектор выходных сигналов; χ – матрица фильтрации данных.

На рис.3.5 представлена структура каскадной системы управления МБЛК, которая состоит из двух контуров управления, основанных на использовании PID регулятора: внешний контур, отвечающий за управление координатами *x*, *y*; внутренний контур, обеспечивающий управление высотой *z* и самолётными углами φ, θ, ψ. Однако, неполнота информации о внешних воздействиях требует введения оптимальных критериев посредством использования метода управления с прогнозирующей моделью (MPC) для обеспечения робастного управления и увеличения точности позиционирования при движении МБЛК по заранее заданной оператором траектории.

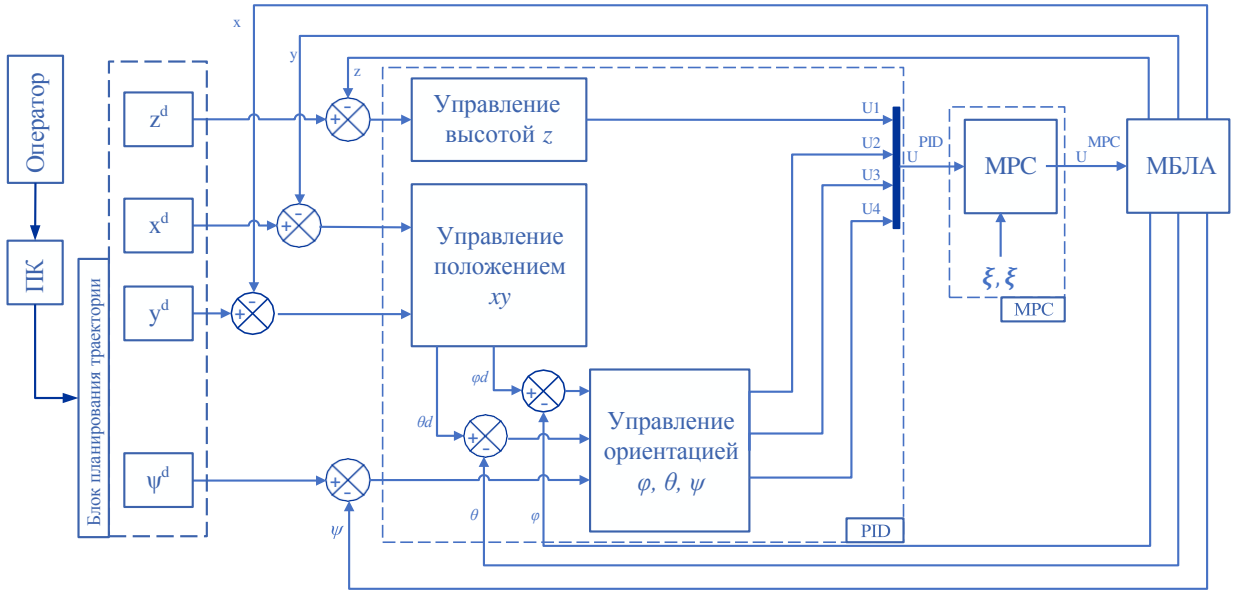


Рис.3.5 Структура многоконтурной САУ МБЛК

Внутренний контур обеспечивает управление высотой и ориентацией МБЛК. С учетом выражения (3.11), режимы управления, образующие вектор состояний U^{PID} могут быть представлены следующим образом:

$$U_1 = \frac{m}{\cos\varphi\cos\theta}\left[\left(K_p^z\,\Delta z(t) + K_i^z\int \Delta z(t)dt - K_d^z\frac{dZ}{dt}\right) + g\right] \qquad (3.20)$$

где, U_1 – режим движения МБЛК вдоль оси OZ, Δz – отклонение между желаемым и фактическим значением координаты z, K_p^z, K_d^z, K_i^z – коэффициенты регулятора к заданному режиму.

$$U_2 = J^X\left[\left(K_p^\varphi\,\Delta\varphi(t) + K_i^\varphi\int \Delta\varphi(t)dt - K_d^\varphi\frac{d\varphi}{dt}\right) - \frac{(J^Y - J^Z)\theta\psi}{J^X} - \theta\psi\right] \qquad (3.21)$$

где, U_2 – режим движения МБЛК вдоль оси OY, $\Delta\varphi$ – отклонение между желаемым и фактическим значением угла крена φ, $K_p^\varphi, K_d^\varphi, K_i^\varphi$ – коэффициенты регулятора к заданному режиму.

$$U_3 = J^Y\left[\left(K_p^\theta\Delta\theta(t) + K_i^\theta\int \Delta\theta(t)dt - K_d^\theta\frac{d\theta}{dt}\right) - \frac{(J^Z - J^X)\psi\dot{\varphi}}{J^Y} + \psi\dot{\varphi}\right] \qquad (3.22)$$

где, U_3 – режим движения МБЛК вдоль оси OX, $\Delta\theta$ – отклонение между желаемым и фактическим значением угла тангажа θ, $K_p^\theta, K_d^\theta, K_i^\theta$ – коэффициенты регулятора к заданному режиму.

$$U_4 = J^Z\left[\left(K_p^{\psi}\Delta\psi(t) + K_i^{\psi}\int \Delta\psi(t)dt - K_d^{\psi}\frac{d\psi}{dt}\right) - \frac{(J^X - J^Y)\theta\dot{\varphi}}{J^Z} - \theta\dot{\varphi}\right] \quad (3.23)$$

где, U_4 – режим движения МБЛК вокруг оси OZ, $\Delta\psi$ – отклонение, между желаемым и фактическим значением угла рыскания ψ, $K_p^{\psi}, K_d^{\psi}, K_i^{\psi}$ – коэффициенты регулятора к заданному режиму.

Внешний контур обеспечивает управление положением МБЛК на плоскости O*XY*. Согласно рис. 3.4, входными параметрами данного контура являются заданные оператором координаты x^d и y^d, а выходными параметрами – углы крена φ^d и тангажа θ^d. Процесс преобразования заданных координат в требуемые углы реализуется при помощи выражений из динамической модели, представляющих собой линейные ускорения МБЛК вдоль осей *X* и *Y* ссоответственно. При этом, необходимо рассматривать состояние МБЛК во время зависания, тогда: $\cos(\varphi) \approx 1, cos(\theta) \approx 1, \sin(\varphi) \approx \varphi, \sin(\theta) \approx \theta$.

Следовательно, с учетом принятых допущений уравнения, описывающие линейное ускорение объекта вдоль осей *X* и *Y*, примут вид:

$$V_x = \frac{U_1}{m}(\theta^d cos\psi + \varphi^d sin\psi) \quad (3.24)$$

$$V_y = \frac{U_1}{m}(\theta^d sin\psi - \varphi^d cos\psi) \quad (3.25)$$

Из выражений (3.24) и (3.25) следует, что желаемые углы крена φ^d и тангажа θ^d могут быть представлены следующим образом:

$$\varphi^d = (\ddot{x}_{cmd} cos\psi + \ddot{x}_{cmd} sin\psi) \quad (3.24)$$

$$\theta^d = (\ddot{y}_{cmd} sin\psi - \ddot{y}_{cmd} cos\psi) \quad (3.25)$$

Откуда $\ddot{x}_{cmd}$ и $\ddot{y}_{cmd}$ являются управляющими переменными, которые предлагается регулировать путем использования PID регулятора согласно следующим формулам:

$$\ddot{x}_{cmd} = \left(K_p^x e_x(t) + K_i^x \int e_x(t)dt - K_d^x \frac{dx}{dt}\right) \quad (3.26)$$

$$\ddot{y}_{cmd} = \left(K_p^y e_y(t) + K_i^y \int e_y(t)dt - K_d^y \frac{dy}{dt}\right) \quad (3.27)$$

На рис.3.6 представлена внутренняя структура блока, реализующего стратегию адаптивного управления с прогнозирующей моделью (MPC). При помощи данного блока формируются оптимальные параметры вектора $\bar{U}^{MPC}$, поступающие на электроприводы МБЛК.

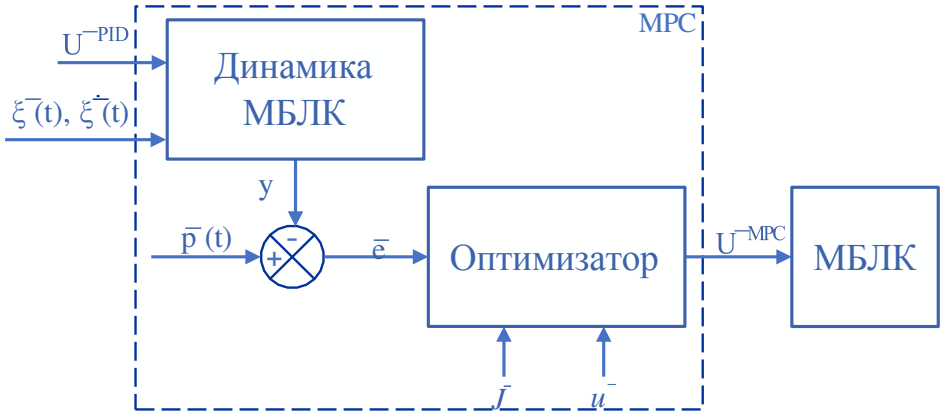


Рис.3.6. Структура блока, реализующего стратегию адаптивного управления с прогнозирующей моделью (MPC)

Адаптивное MPC-управление предсказывает выход системы $\bar{U}^{MPC}$путем решения задачи оптимизации в рамках некоторого горизонта прогнозирования N (интервала времени) [43, 45]. Нелинейная система, описывающая динамическую модель МБЛК, решается численным методом интегральной аппроксимации Эйлера и может быть представлен в виде:

$$\dot{\xi} = f[\xi, \bar{U}] \tag{3.28}$$

где, $\xi = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ – вектор состояний системы, $\bar{U} = [U_1^{PID}, U_2^{PID}, U_3^{PID}, U_4^{PID}]$ – вектор управляющих сигналов, требующих оптимизацию.

Математический смысл синтеза алгоритма адаптивного MPC-управления заключается в том, чтобы на основе идеальной динамической модели МБЛК сформировать вектор прогнозирующих выходных сигналов объекта управления на определенное количество итерации вперед в пределах заданного горизонта предсказывания.

$$\bar{y} = f(\xi) \tag{3.29}$$

где, $\bar{y} = [x, y, z, \psi]^T$ – вектор прогнозируемых выходных сигналов объекта управления.

Вектор ошибок между прогнозируемой и заданной оператором траекториями $\bar{e}$ можно определить следующим образом:

$$\bar{e} = \bar{y}_d - \bar{y} \tag{3.30}$$

Функционал качества J представляет собой квадратичная функция суммы накопленных ошибок выходных сигналов объекта управления $\bar{y}$.

$$J = \sum_{i=1}^{N} \|\bar{e}_{k+1}\|^2 \tag{3.31}$$

Задача оптимизации реализуется путем вычисления функционала качества по алгоритму квадратичного программирования на основе прогнозируемых моделей с учетом ограничений $\tau(\bar{k}) \in R^n$, что позволяет определить вектор оптимальных управляющих воздействий $U^{MPC} = [U_1^{MPC}, U_2^{MPC}, U_3^{MPC}, U_4^{MPC}]$. На рис. 3.7. представлен алгоритм, применяемый к реализации стратегии MPC-управления.

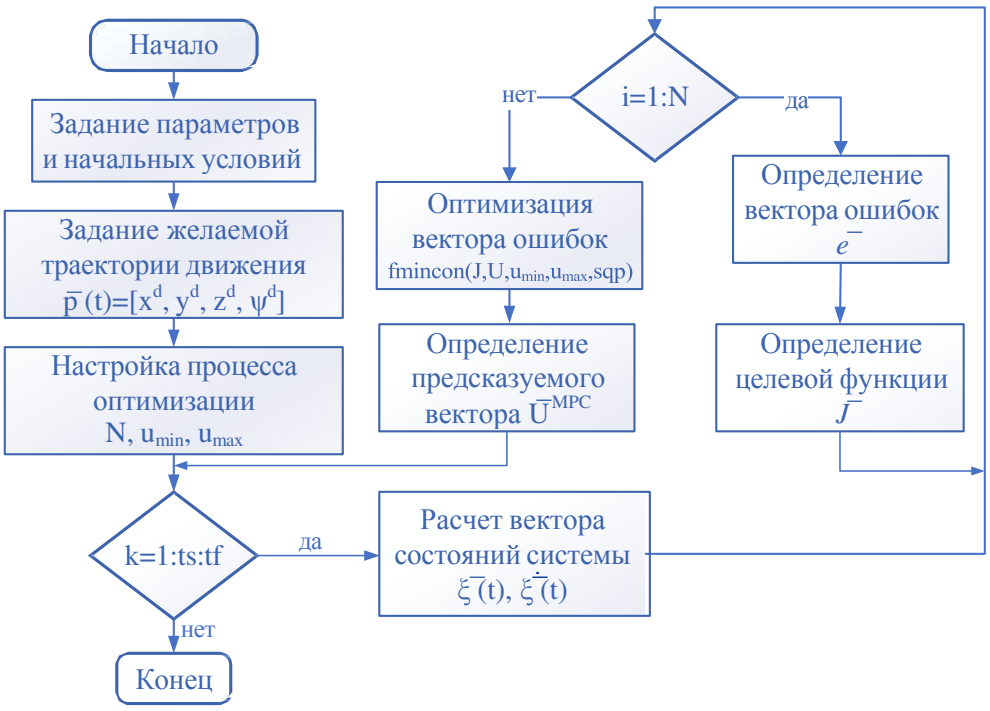


Рис.3.7. Алгоритм реализации адаптивной стратегии управления с прогнозирующей моделью (MPC)

Оптимизация вектора выходных управляющих состояний системы позволяет МБЛК адаптироваться к изменяющимся условиям, влияющим на качество САУ МБЛК при выполнении полетного задания.

3.6 Результаты моделирования автономного движения МБЛК

Виртуальное моделирование управляемого движения МБЛК по заданной кусочно- линейной траектории, приведенной на рис.3.1. проводится в математическом пакете MATLAB. Параметры разомкнутой кусочно-линейной траектории, представленные в табл.3.1. соответствуют координатам путевых точек P_i (i=1-5), временным интервалам и принятым граничным условиям.

Таб.3.1.

Параметры планирования траектории МБЛК

Этапы	**Условия**	**Временной интервал [с]**	**Координаты [м]**	**Промежуточные точки [м]**	**Скорость [м/с]**	**Ускорение [м/с^2]**
Взлет	Начальные	$t_0 = 0$	$P_o(0,0,0)$	-	$P_0 = 0$	$\ddot{P}_0 = 0$
	Конечные	$t_1 = 10$	$P_1(2,0,5)$		$P_1 = 0$	$\ddot{P}_1 = 0$
Горизонтальный полет	Начальные	$t_1 = 0$	$P_1(2,0,5)$	$P_2(6,4,5)$	$P_1 = 0$	$\ddot{P}_1 = 0$
	Конечные	$t_4 = 40$	$P_4(14,0,5)$	$P_3(10,4,5)$	$P_4 = 0$	$\ddot{P}_4 = 0$
Посадка	Начальные	$t_4 = 40$	$P_4(14,0,5)$	-	$P_4 = 0$	$\ddot{P}_4 = 0$
	Конечные	$t_5 = 50$	$P_5(16,0,0)$		$P_5 = 0$	$\ddot{P}_5 = 0$

На основании информации о граничных условиях образуется вектор коэффициентов $\bar{c}_i$ выражения 3.2, соответствующий желаемым значениям по положению $\bar{P}_i^d$, скорости $\dot{\bar{P}}_i^d$ и ускорению $\ddot{\bar{P}}_i^d$ на каждом сегменте траектории.

Определение векторов отклонений и управляющих сигналов производится на каждой итерации процесса моделирования путем интегрирования дифференциальных уравнений модели МБЛК, представленной выражением (3.19). В качестве метода численного интегрирования используется метод Эйлера с фиксированным шагом 0,001 с.

При выполнении процедуры виртуального моделировании учитываются габаритные, массо-инерционные и электромеханические характеристики МБЛК, представленные в табл.3.2.

Таб.3.2.
Основные параметры МБЛК

Параметр	**Значение**	**Единицы измерения**
Масса МБЛК	1,5	кг
Длина лучей рамы	0,225	м
Коэффициент подъемной силы	$8.048x10^{-6}$	Нмс^2
Коэффициент сопротивления	$2.423x10^{-7}$	Нмс^2
Матрица главных осевых моментов инерции *Ix*, *Iy*, *Iz*	$\begin{bmatrix} 0{,}0035 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0035 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}005 \end{bmatrix}$	кг.м^2

Экспериментально была произведена настройка коэффициентов PID регулятора. Основой служат параметры K_P, K_I, K_D аналоговых по геометрическим и тяговым характеристикам летательные аппараты. Наиболее оптимальные параметры PID регулятора представлены в табл.3.3.

Табл.3.3.
Параметры настройки PID регулятора

Управление контуром ориентации			
Параметр	**K_P**	**K_I**	**K_D**
Крен (φ)	200	0	25
Тангаж (θ)	200	0	25
Рыскание (ψ)	30	0	5
Управление контуром позиционирования			
Параметр	**K_P**	**K_I**	**K_D**
X	3	0.7	3
Y	3	0.7	3
Управление контуром высоты			
Параметр	**K_P**	**K_I**	**K_D**
Z	200	0	25

В ходе проведения виртуального моделирования автономного движения рассматривается: управляемое движение МБЛК по заданной траектории, возмущенное движение МБЛК в условиях неполноты информации и движение МБЛК с возможностью облета препятствий.

3.6.1. Управляемое движение МБЛК по заданной траектории

Рассмотрим основные результаты процесса моделирования управляемого движения МБЛК по заданной разомкнутой траектории без учета возмущающих воздействий (рисунки 3.8-3.12). На данном этапе проводится тестирование адекватности метода синтеза многоканального регулятора, работа которого основывается на использовании PID и MPC стратегий управления.

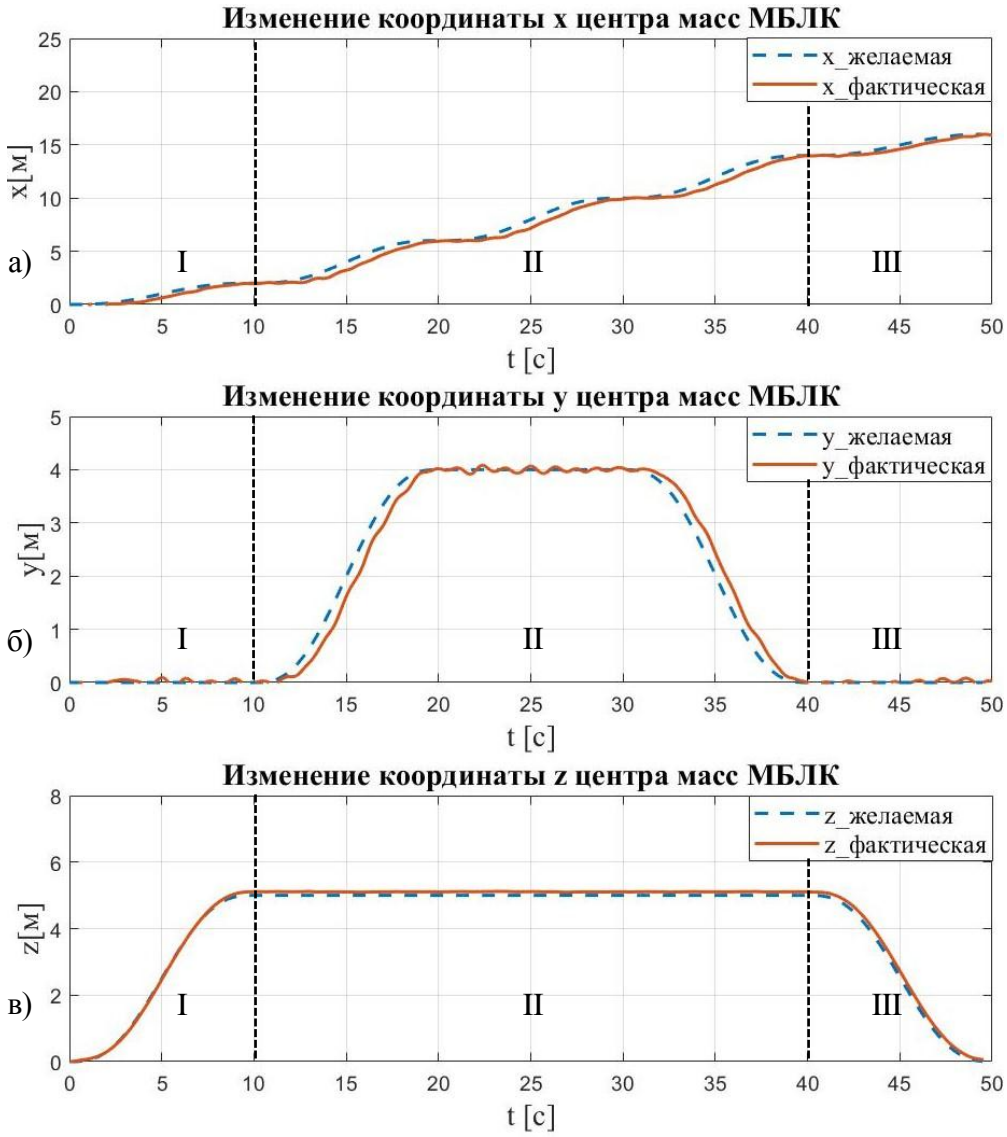


Рис. 3.8. Графики изменения координат центра масс МБЛК: а,б,в – движение МБЛК вдоль осей *OX*, *OY* и *OZ* соответственно; I – взлет летательного аппарата; II – полет по горизонтальной плоскости *OXY*; III – приземление

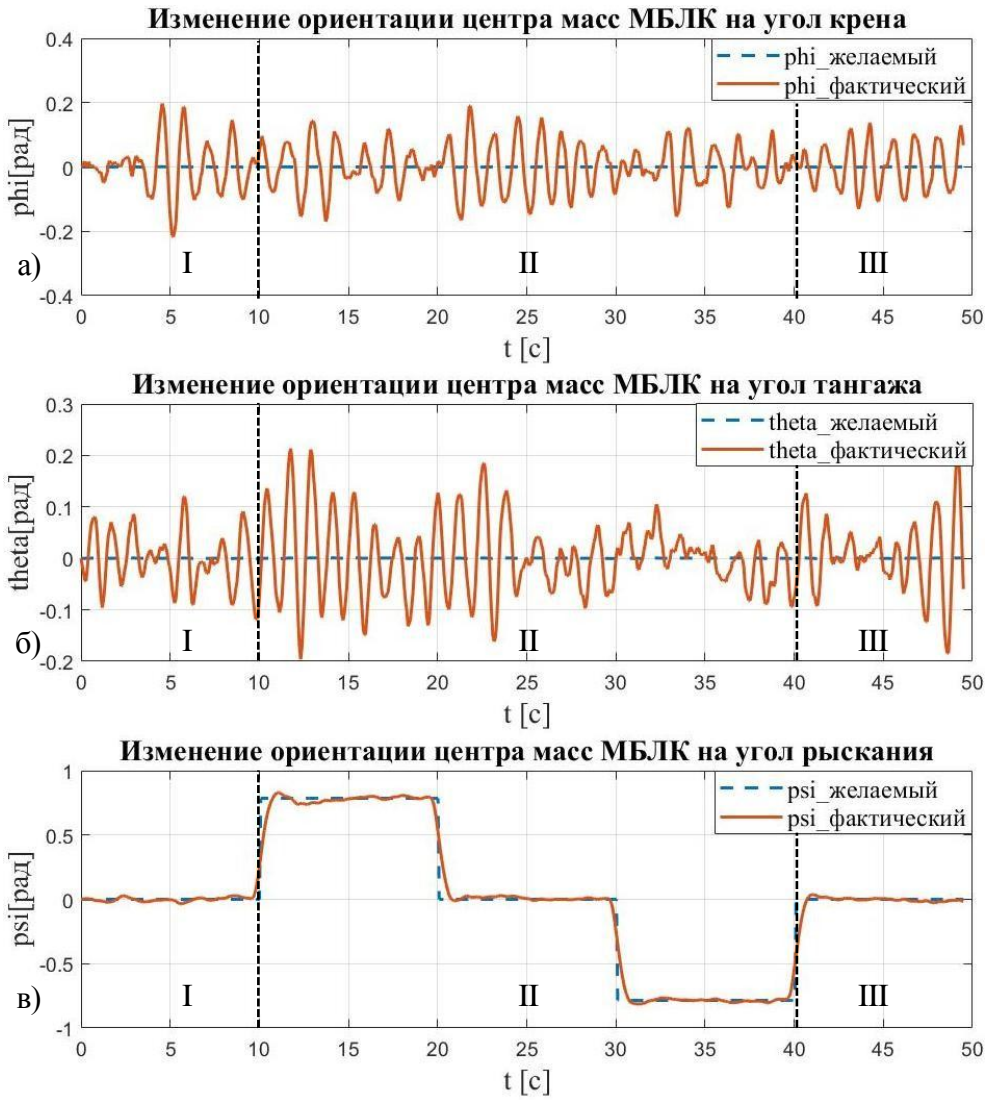


Рис.3.9. Графики изменения ориентации центра масс МБЛК: а,б,в – отклонение МБЛК относительно осей *OX*, *OY* и *OZ* на самолетные углы φ,θ,ψ соответственно; I – взлет летательного аппарата; II – полет по горизонтальной плоскости *OXY*; III – приземление

Результаты, представленные на рис. 3.8 – 3.9 показывают, что среднее отклонение значений координат центра масс МБЛК вдоль осей *OX*, *OY*, *OZ* составляет 0,025; 0,01 и 0,043 м соответственно. Кроме того, среднее отклонение значений самолетных углов составляет 0,08 рад (относительно осей OX, OY) и 0,06 рад (относительно оси OZ). Следовательно, предложенная стратегия управления способна обеспечить высокую точность позиционирования центра масс МБЛК относительно заданной траектории посредством оптимизации вектора управляющих сигналов. На рис. 3.10.

приводится сравнительный анализ характера изменения управляющих сигналов, входящих в векторы U^{PID} и U^{MPC} , на основании которых формируются угловые скорости винтомоторных групп МБЛК (рис.3.11).

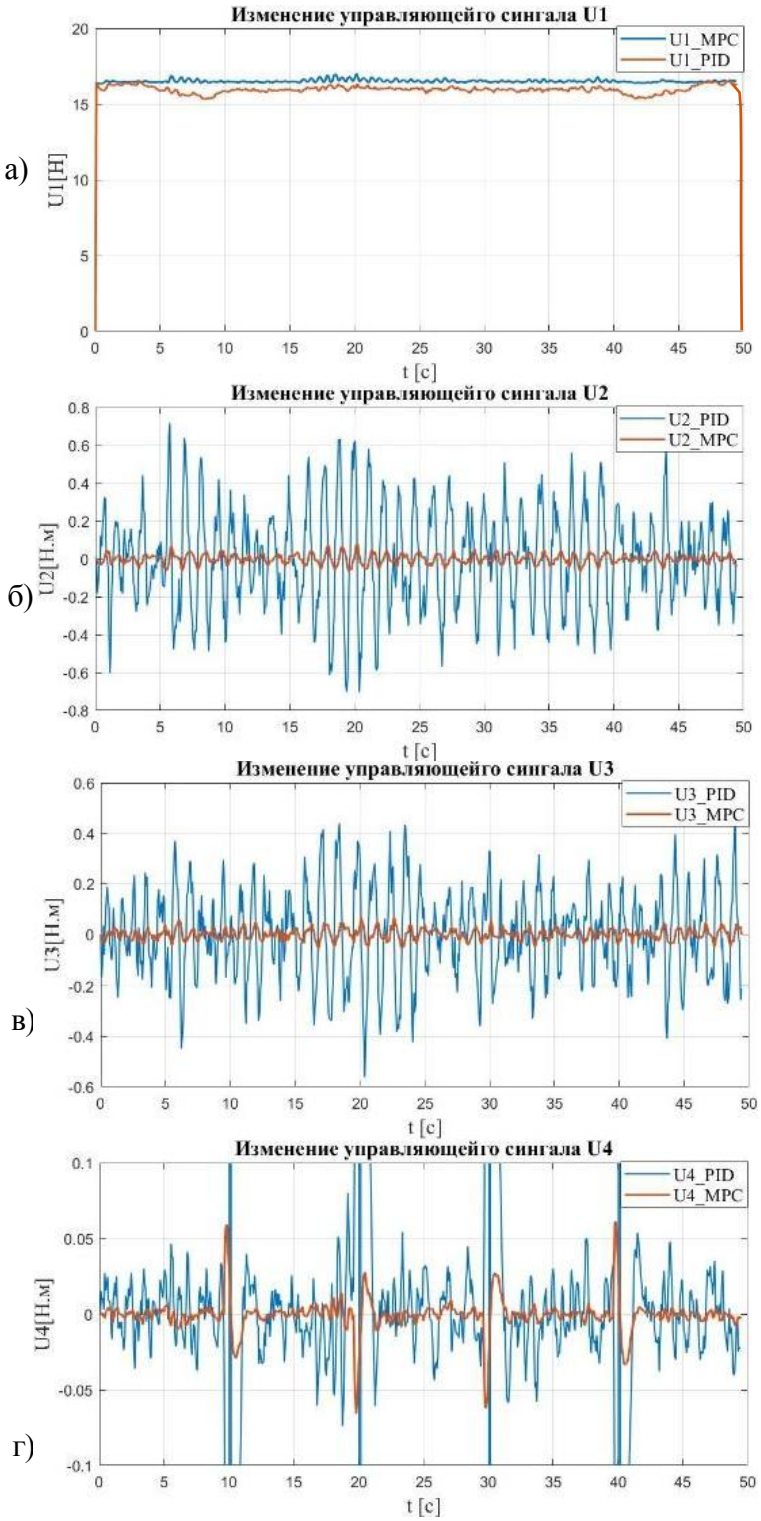


Рис.3.10. Графики формирования управляющих режимов МБЛК: а – график зависимости подъемной силы U_1 от времени t; б,в,г – графики зависимости внешних моментов MX, MY, MZ от времени t.

Из результатов, представленных на рис. 3.10. выявлено, что введение MPC стратегии, позволяет подавлять скачки изменения параметров U^{PID} и обеспечивает более плавные характеристики переходного процесса посредством оптимизации параметров многоканального регулятора.

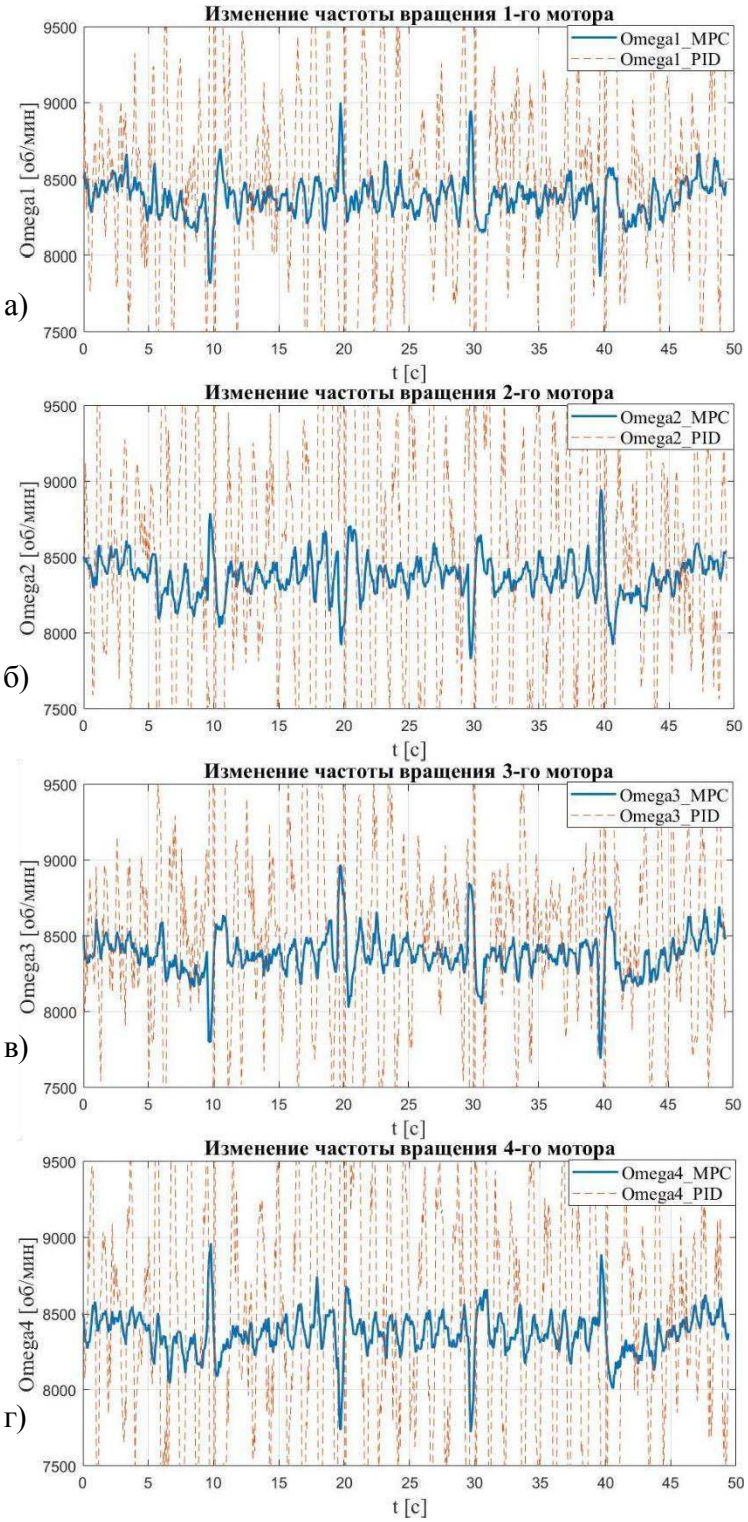


Рис. 3.11. Графики формирования частоты вращения винтомоторных групп МБЛК: а,б,в,г – графики зависимости ω_i от времени t

Из рис.3.10 и 3.11 следует, что среднее значение результирующей подъемной силы U_1 составляет 18,43 Н при изменении значений создаваемой угловой скорости *i*-го ротора в пределах от 5042 до 5077 об/мин в зависимости от участка траектории и выполняемой маневры МБЛК. Кроме того, среднее значение управляющих сигналов U_2, U_3 составляет 0.03 Н.м, а значение управляющего сигнала U_4 варьируется в диапазоне до 0.06 Н.м.

На рис.3.12. представлен результат моделирования пространственного движения МБЛК, отражающий работоспособность системы выполнять полетную миссию по заданной разомкнутой траектории, как с использованием PID-стратегии, так и с оптимизацией параметров многоканального регулятора на основе адаптивной стратегии управления (MPC).

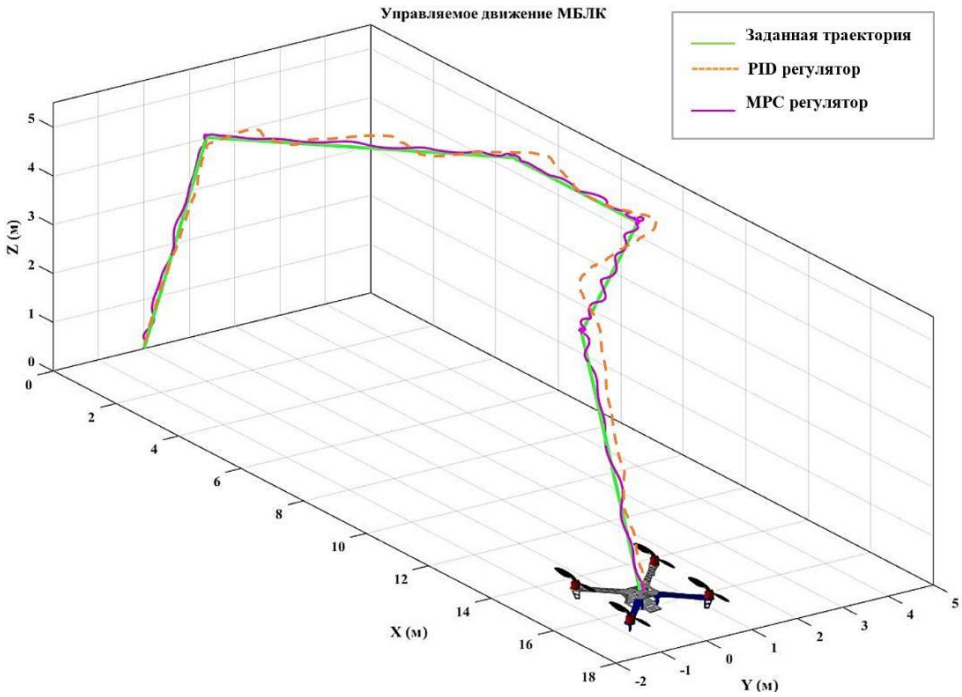


Рис.3.12. Пространственное движение МБЛК

Разработанная имитационная модель движения МБЛК подтверждает адекватность алгоритма решения системы дифференциальных уравнений, синтеза алгоритмов функционирования и откладки многоканальной системы управления. Таким образом, имитационная модель может быть использована в качестве виртуального тренажера для исследования работы СМПТ при выполнении задач охранного мониторинга прибрежных территорий в условиях неполноты информации об окружающей среде.

3.6.2. Возмущенное движение МБЛК

Движение МБЛК вдоль прибрежных территорий характеризуется непредсказуемостью поведения воздушной и водной среды, являющейся источником дополнительных возмущающих сил и моментов неопределенного характера, которые отрицательно сказываются на стабилизацию и точность позиционирования МБЛК. Согласно п.3.3. ветровые возмущения могут считаться процессами детерминированного или случайного характера, повторяющимся через некоторые промежуток времени или возникающими на определенном участке.

Рассмотрим движение МБЛК по разомкнутой траектории (рис.3.1) под действием ветровой нагрузки случайного характера, модель которой описывается выражением (3.13), характеризующимся амплитудными и частотными параметрами, произвольно изменяющимися во времени.

Моделирования движения МБЛК под действием ветровой нагрузки проводится двумя способами согласно параметрам, указанным в табл.3.4:

1. генерация равномерно распределенной случайной функций посредством встроенной функции *rand* [81, 84];
2. генерация непрерывной случайной функции с нормальным (гауссовским) распределением [81, 85].

Табл.3.4.
Параметры моделирования случайной функции

Модель ветровой нагрузки	**Характер воздействия внешних сил, Ф[Н]**	**Временной интервал, t [с]**	**Диапазон ветровой нагрузки, Vв [м/с]**
$V_в(t) = V_0 + V_B \sin \Omega t$	$\Phi(t) = [0\ \Phi^Y\ 0]^T$	$0<t<t_1$, $t_4<t<t_5$	$V_B^X = 0$; $V_B^Y = 0,\ldots 3$; $V_B^Z = 0$
	$\Phi(t) = [\Phi^X\ \Phi^Y\ 0]^T$	$t_1<t<t_2$, $t_3<t<t_4$	$V_B^X = 0,\ldots 2$; $V_B^Y = 0,\ldots 1$; $V_B^Z = 0$
	$\Phi(t) = [0\ 0\ \Phi^Z]^T$	$t_2<t<t_3$	$V_B^X = 0$; $V_B^Y = 0$ $V_B^Z = 0,\ldots 5$;

На рис. 3.13 – 3.16. приведены основные результаты воздействия на динамику полета МБЛК ветровой нагрузки случайного типа, модель которой воспроизводится функцией *rand*. Представленные результаты отражают характер изменения отклонения центра масс МБЛК, а также быстродействие, и робастность системы управления.

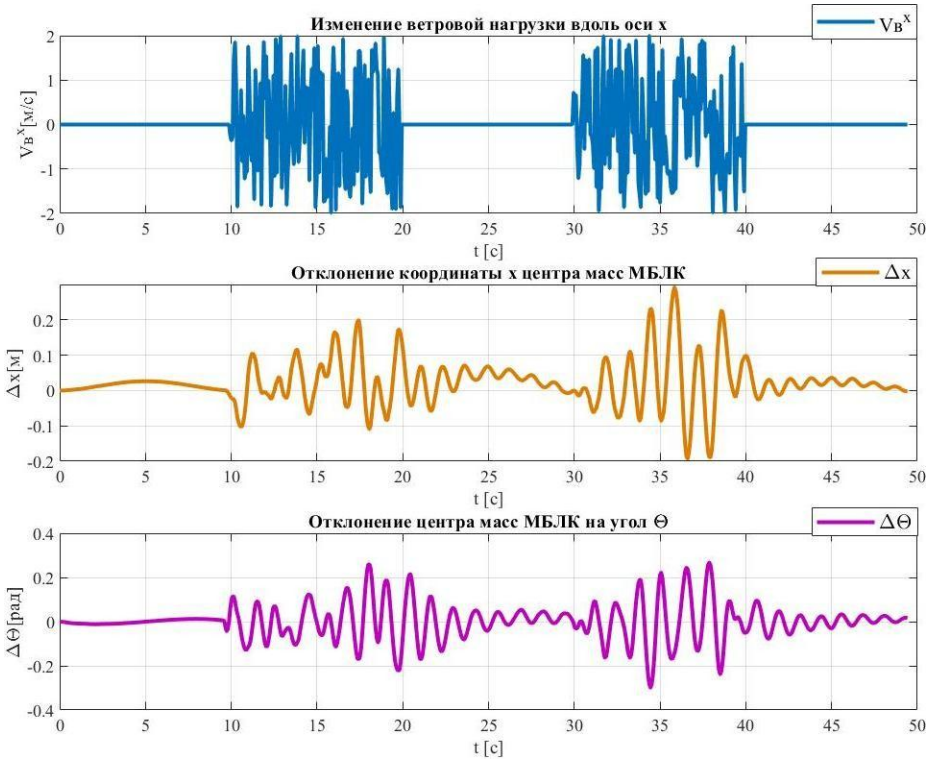


Рис.3.13. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *X*: а – динамика изменения проекции ветровой нагрузки на ось *X*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *X*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол θ, обеспечивающий перемещение МБЛК вдоль оси *X*

Из результатов, представленных на рис.3.13 следует, что при случайном воздействии ветровой нагрузки на ось X, среднее значение отклонения координаты *x* составляет 0,06 м, а динамическая погрешность в участках действия возмущающего воздействия – в диапазонах до 0,29 м. Кроме того, среднее значение отклонения центра масс на угол рыскание θ, возрастает от 0,08 до 0,26 рад с появлением возмущающего воздействия.

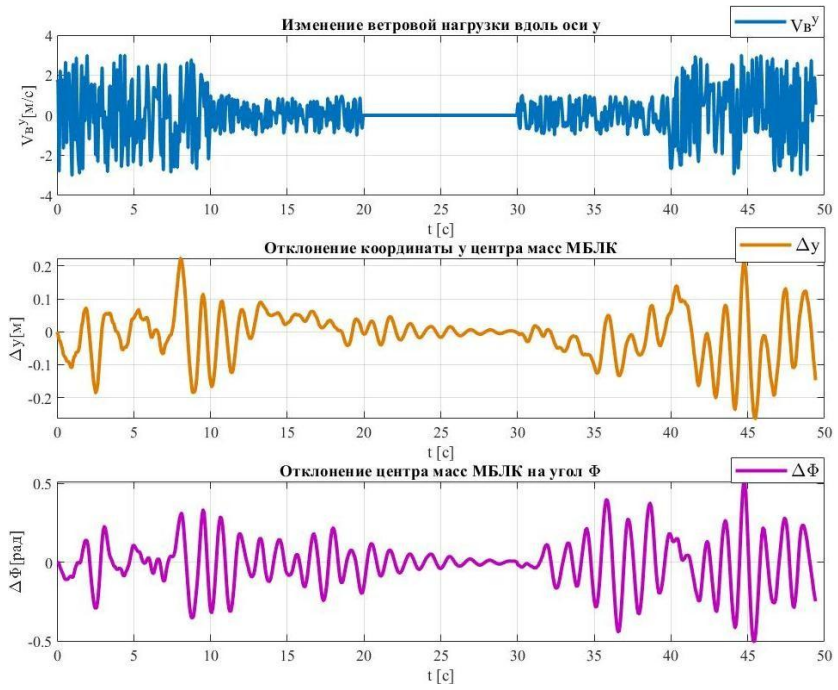


Рис.3.14. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Y*: а – динамика изменения проекции ветровой нагрузки на ось *Y*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Y*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол φ, обеспечивающий перемещение МБЛК вдоль оси *Y*

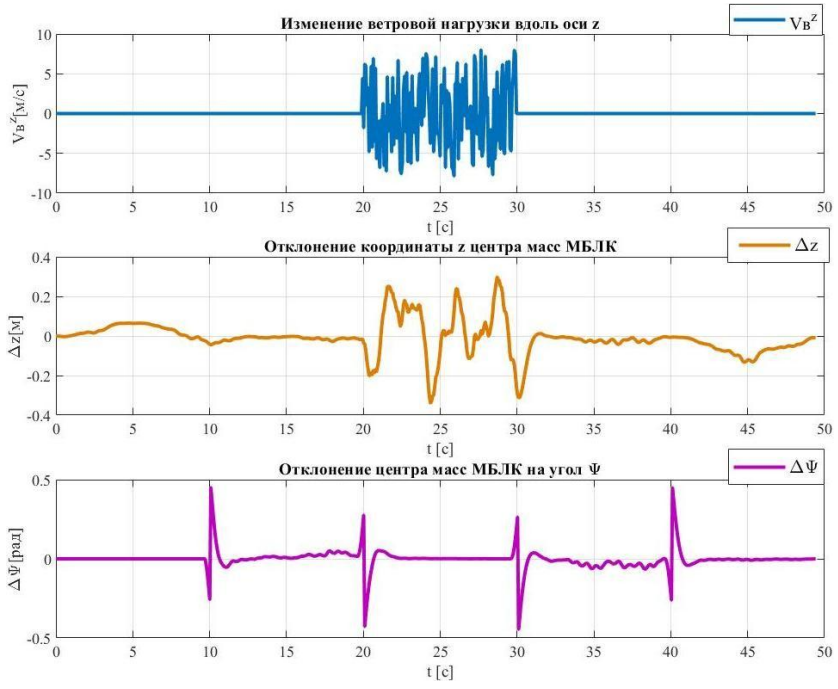


Рис.3.15. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Z*: а – динамика изменения проекции ветровой нагрузки на ось *Z*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Z*; в – отклонение изменения ориентации центра масс МБЛК вокруг оси Z на угол ψ.

Согласно рис.3.14, 3.15 среднее значение отклонения координат y и z центра масс МБЛК составляет 0,07 и 0,08 м соответственно, в то время как значение динамической ошибки в участках воздействия ветровой нагрузки находится в диапазонах до 0,22 и 0,29 м по каждой оси. При этом, проекции ветровой нагрузки на оси Y и Z изменяют характер отклонения углов крена φ и рыскания ψ, что отражается в возрастании их значении кратковременными скачками в пределах 0,51 и 0,45 рад.

На рис.3.16. представлен результат моделирования пространственного движения МБЛК, отражающий эффективность системы управления при влиянии на динамику полета МБЛК ветровой нагрузки посредством адаптации параметров регулятора к внешним воздействиям.

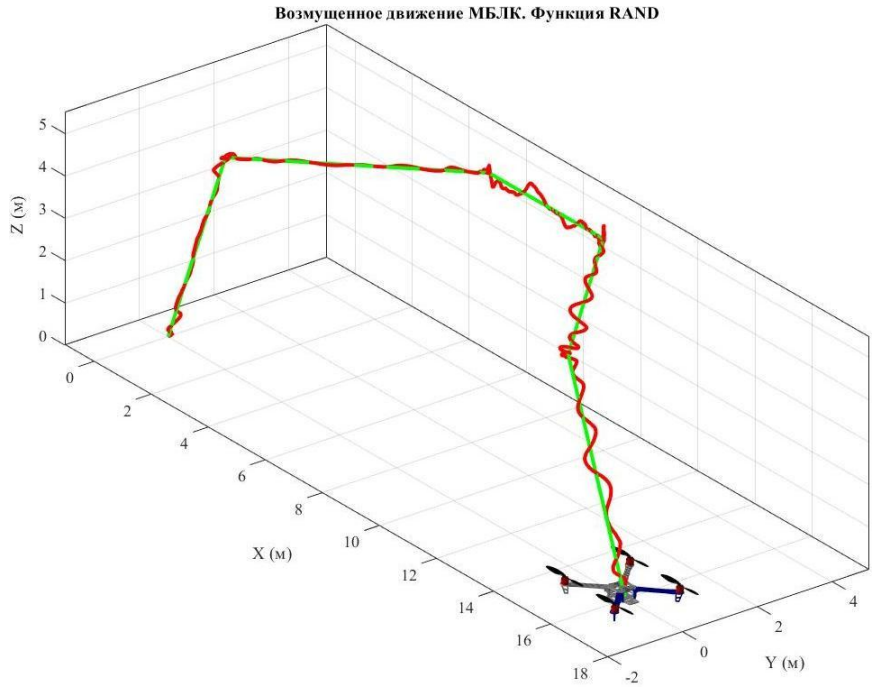


Рис.3.16. Пространственное движение МБЛК под действием ветровой нагрузки случайного характера, смоделированной функцией rand.

Распределение ветровой нагрузки является сложной задачей, реализация которой требует наличия совокупности наблюдений, соответствующих определенному временному интервалу, климатическим и географическим особенностям местности. В целях повышения достоверности результатов моделирования ветровой нагрузки, а также тестирования адекватности

системы управления, проводится исследование возмущенного движения МБЛК с учетом выборки наблюдений за изменением ветровой нагрузки прибрежных территорий Эквадора, изъятой из базы данных метеорологических станций океанографического и антарктического института ВМФ страны [86].

Процедура распределения ветровой нагрузки осуществляется функцией с нормальным (гауссовским) распределением [85]:

$$f(V_{\text{в}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{V_{\text{в}} - \langle V_{\text{в}} \rangle}{2\sigma}} \tag{3.32}$$

где, $\langle V_{\text{в}} \rangle$ – среднее значение скорости ветра (математическое ожидание), σ – среднее квадратическое отклонение ветра (дисперсия).

Основные результаты воздействия на динамику полета МБЛК ветровой нагрузки, смоделированной случайной гауссовской функцией приведены на рис.3.17 – 3.20.

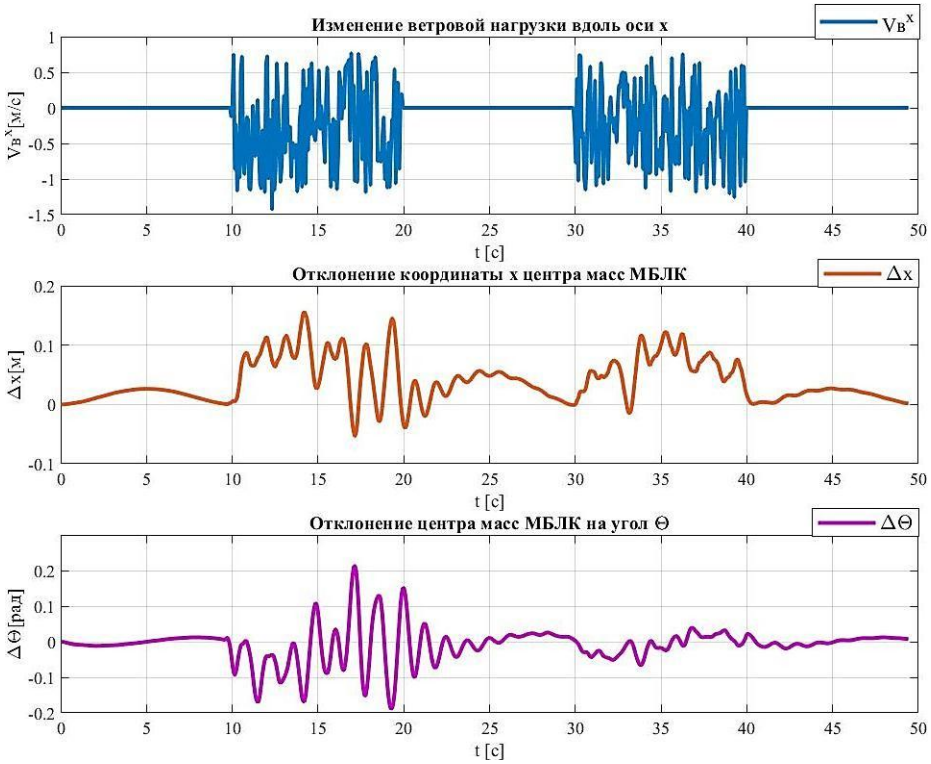


Рис.3.17. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *X*: а – распределение ветровой нагрузки на оси *X*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *X*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол тангажа θ.

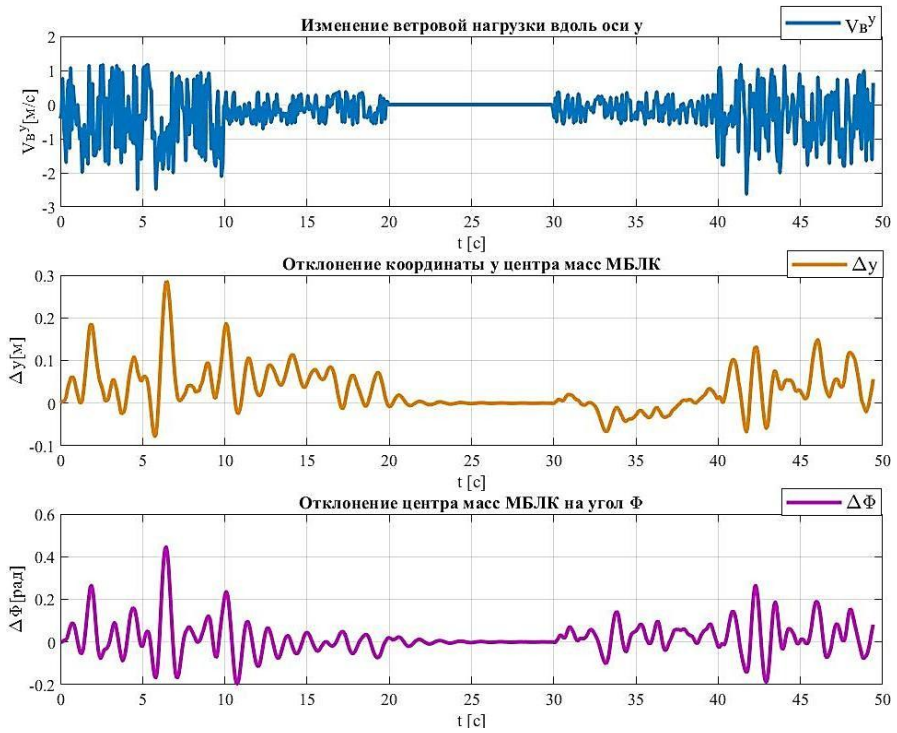


Рис.3.18. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Y*: а – распределение ветровой нагрузки на оси *Y*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Y*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол крена φ.

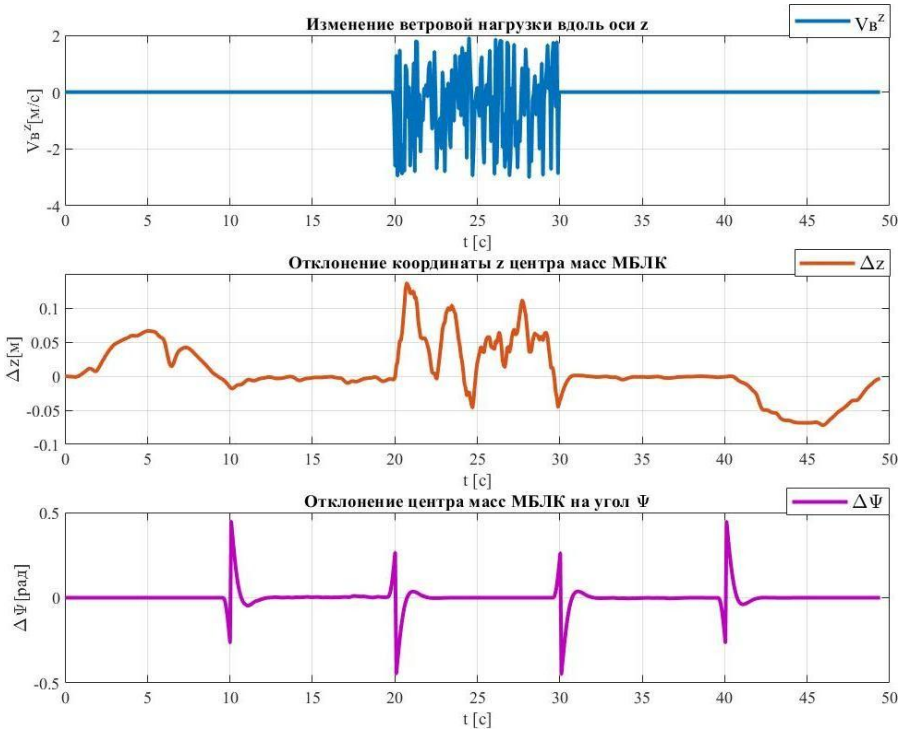


Рис.3.19. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Z*: а – распределение ветровой нагрузки на оси *Z*; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Z*; в – отклонение изменения ориентации центра масс МБЛК вокруг оси *Z* на угол ψ.

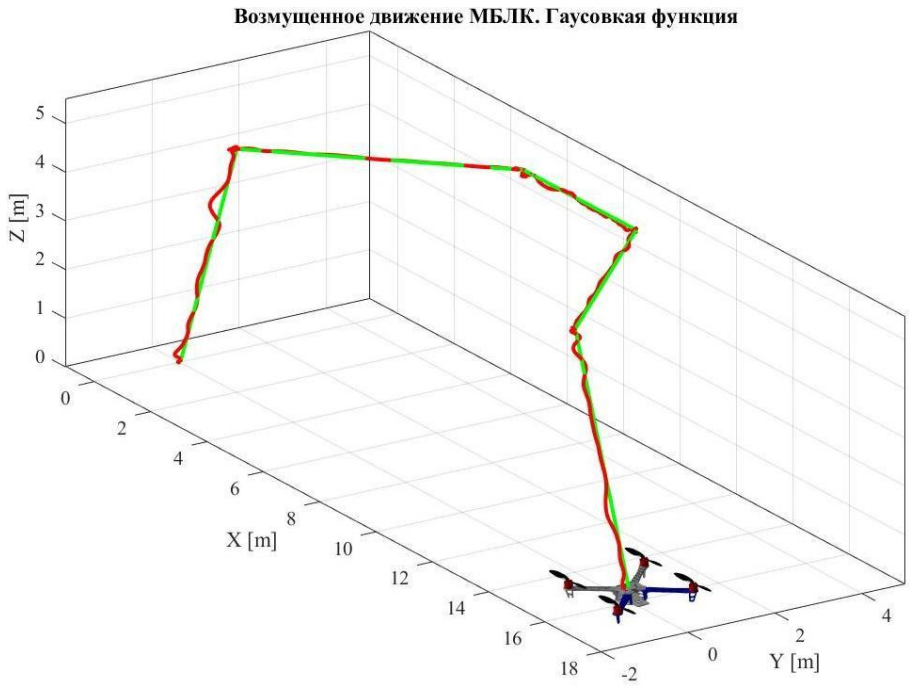


Рис.3.20. Пространственное движение МБЛК под действием ветровой нагрузки, равномерно распределенной гауссовской функцией

Согласно результатам, представленным на рис.3.17 – 3.19 распределение ветровой нагрузки на заданных временных участках приводит к изменению характера отклонения самолетных углов φ,θ,ψ в пределах до 0,2; 0,45 и 0,44 рад. соответственно, что влияет на точность позиционирования МБЛК, значения которой соответствуют 0,1; 0,28 и 0,13 м по каждой оси в указанных интервалах.

Исходя из проведенного исследования влияния ветровой нагрузки случайного типа на характер движения МБЛК, выявлено, что полученные двумя методами результаты представляются схожими. Однако, использование метода нормального распределения изменения ветровой нагрузки посредством применения гауссовской функцией является наиболее достоверным способом, позволяющим имитировать реальную динамику перемещения воздушных масс определенной местности, опираясь на априорной информации большой выборки наблюдений, фиксированной метеорологическими службами.

Кроме того, ветровые возмущения могут считаться детерминированными процессами импульсного или периодического характера. Таким образом, рассмотрим возмущенное движение МБЛК, учитывающее воздействие ветровой нагрузки в виде коротких (3.14), скачкообразных (3.15) и периодических сигналов детерминированного типа.

Периодическую функцию, описывающую ветровую нагрузку может быть смоделирована методом разложения в ряд Фурье вида [81, 87]:

$$V_{в}(t) = \frac{V_0}{2} + \sum_{n=0}^{N} V_n \sin(n\omega_0 t) \qquad (3.33)$$

где V_0 – постоянная возмущающего воздействия; V_n – амплитуда *n-го* колебания; $n\omega_0$ – циклическая частота гармонического колебания.

Моделирование движения МБЛК под действием ветровой нагрузки детерминированного типа (рис.3.21 – 3.24) проводится с учетом моделей, описанных выражениями 3.14, 3.15 и 3.33 согласно параметрам, указанным в табл.3.5:

Табл.3.5.
Параметры моделирования детерминированной функции

Модель ветровой нагрузки	**Воздействие внешних сил Ф[Н]**	**Период Т [с]**	**Цикл %**	**Скорость Vв [м/с]**
$V_{в}(t) = k_1(t)V_0$	$\Phi(t)= [0\ \Phi^X\ 0]^T$	$t_1<t<t_2$, $t_3<t<t_4$	40%, 60%	$V_B^X = 1$; $V_B^Y = 0$; $V_B^Z = 0$
$V_{в}(t) = k_2(t)V_0$	$\Phi(t) = [0\ \Phi^Y\ 0]^T$	$t_4<t<t_5$,	100%	$V_B^X = 0$; $V_B^Y = 2$; $V_B^Z = 0$
$V_{в}(t) = \frac{V_0}{2} + \sum_{n=0}^{N} V_n \sin(n\omega_0 t)$	$\Phi(t) = [0\ \Phi^Y\ \Phi^Z]^T$	$t_0<t<t_1$, $t_2<t<t_3$	10%	$V_B^X = 0$; $V_B^Y = 1.5$; $V_B^Z = 2$

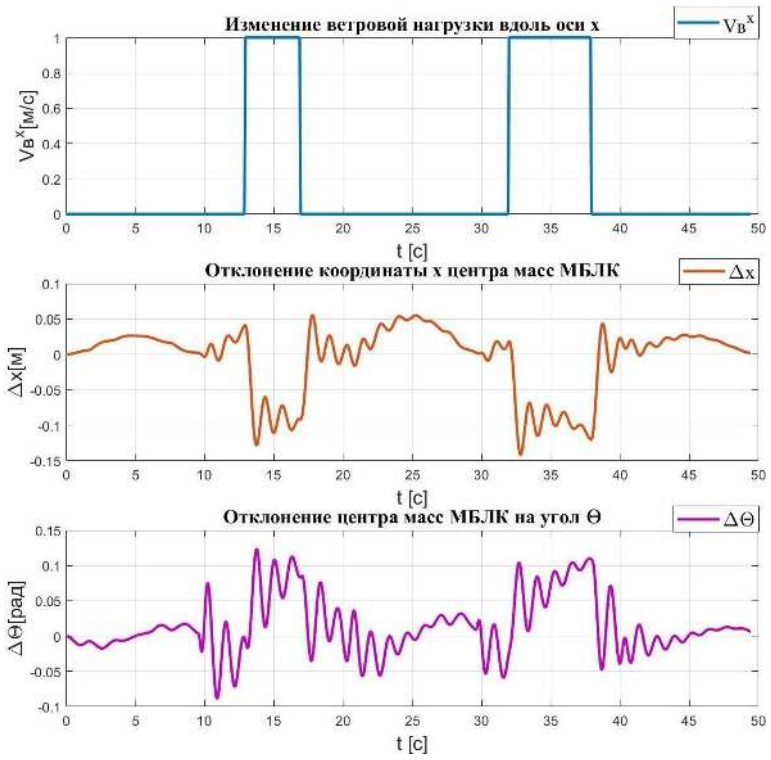


Рис.3.21. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *X*: а – ступенчатое воздействие ветровой нагрузки; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *X*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол θ.

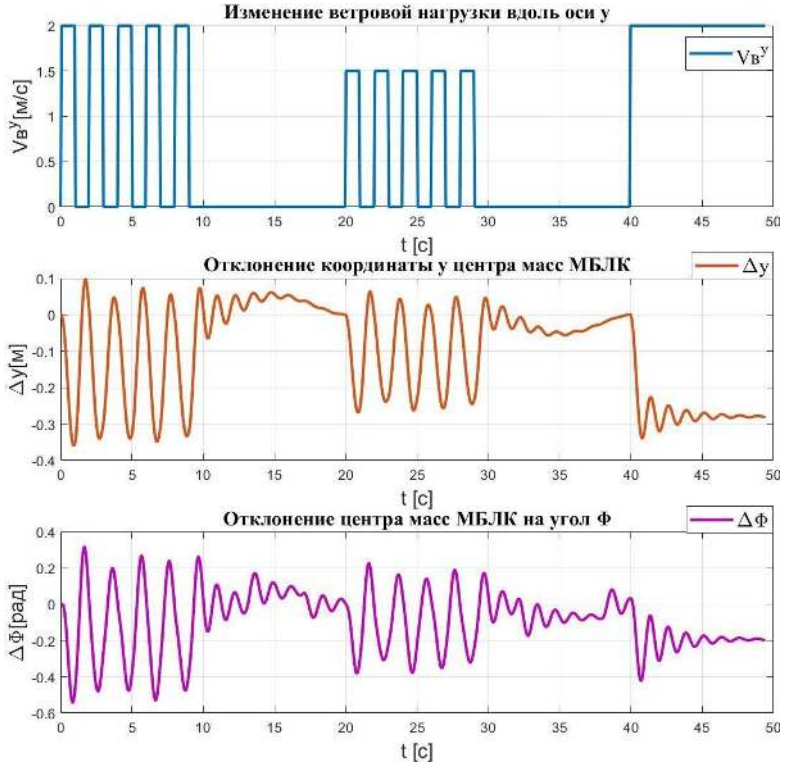


Рис.3.22. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Y*: а – ступенчатое воздействие ветровой нагрузки; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Y*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол φ.

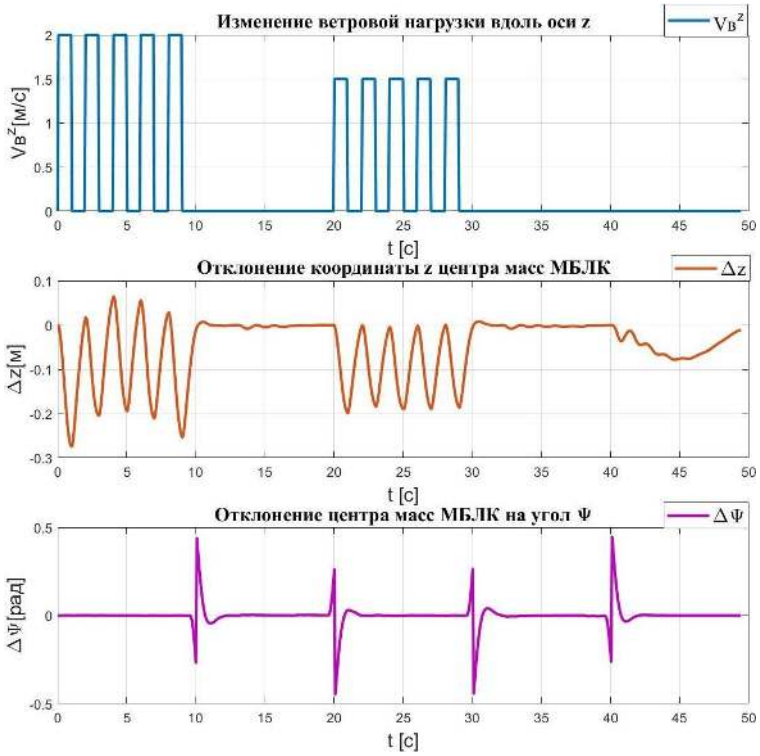


Рис.3.23. График изменения отклонения центра масс МБЛК вдоль оси *Z*: а – ступенчатое воздействие ветровой нагрузки; б – отклонение перемещения МБЛК вдоль оси *Z*; в – отклонение центра масс МБЛК на угол ψ.

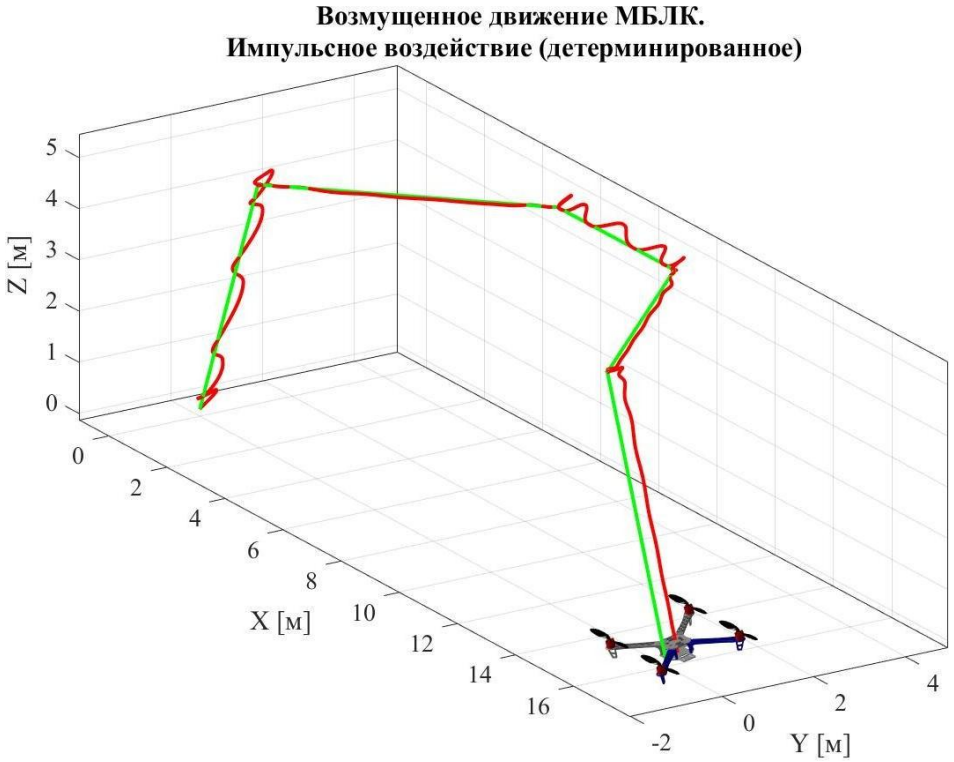


Рис. 3.24. Пространственное движение МБЛК под действием ветровой нагрузки детерминированного типа

В соответствии с результатами, представленными на рис.3.21 – 3.24, при воздействии различных моделей ветровой нагрузки детерминированного типа на динамику полета МБЛК, система автоматического управления способна обеспечить точность позиционирования центра масс МБЛК относительно заданной траектории в пределах 0,056; 0,36; 0,27 м. по осям *OX*, *OY*, *OZ* соответственно. Кроме того, выявлено запаздывание реакции системы управления на внешние возмущающие воздействия импульсного типа, при значениях переходного процесса до 5 с.

3.6.3. Движение МБЛК с возможностью облета препятствий

Рассмотрим пространственное движение МБЛК в среде с препятствиями. Согласно п. 2.3, движение МБЛК происходит по заданной оператором траектории, где положения робота и препятствий определяются средствами глобальной и локальной навигации соответственно. Стратегия облета препятствий основывается на методе построения искусственных потенциальных полей [89-92]. Данный метод заключается в наделении МБЛК и препятствий некоторыми виртуальными полями, позволяющим избегать их сближения и столкновения.

На рис.3.25 представлен алгоритм реализации стратегии обнаружения и облета препятствий МБЛК, движение которого происходит по заданной траектории $\bar{p}(t) = [x^d \;\; y^d \;\; z^d \;\; \psi^d]^T$. В соответствии с предложенным алгоритмом, расчет расстояния от МБЛК до препятствий *dQ*, позволяет определить значение действующего на *k*-м временном участке потенциального поля, рассчитанного выражением 2.2, а также установить условия изменения траекторного движения МБЛК:

$$\bar{p}(t) = \begin{cases} \bar{p}(t) + \bar{p}_{EV}(t), & dQ \le dseg \\ \bar{p}(t), & dQ > dseg \end{cases} \tag{3.34}$$

где, $\bar{p}(t)$ – заданная траектория движения МБЛК; $\bar{p}_{EV}(t)$ – траектория облета препятствий; *dQ* – евклидово расстояние межу МБЛК и препятствиями; $dseg$ – расстояние безопасности.

При этом, изменение траекторного движения МБЛК в зонах действия потенциального поля обеспечивается созданием управляющего вектора дополнительных скоростей $\vec{p}_{EV}$, формирующегося на основании метода функций Ляпунова [88, 93]:

$$\vec{p}_{EV}(t) = J^{-1} \cdot k_{EV} \cdot (-E_{rep}) \qquad (3.35)$$

где, J – матрица Якоби, составленная из частных производных потенциального поля (градиента), создаваемого препятствиями в пространственной области; $k_{EV} > 0$ – коэффициент усиления; E_{rep} – потенциальное поле.

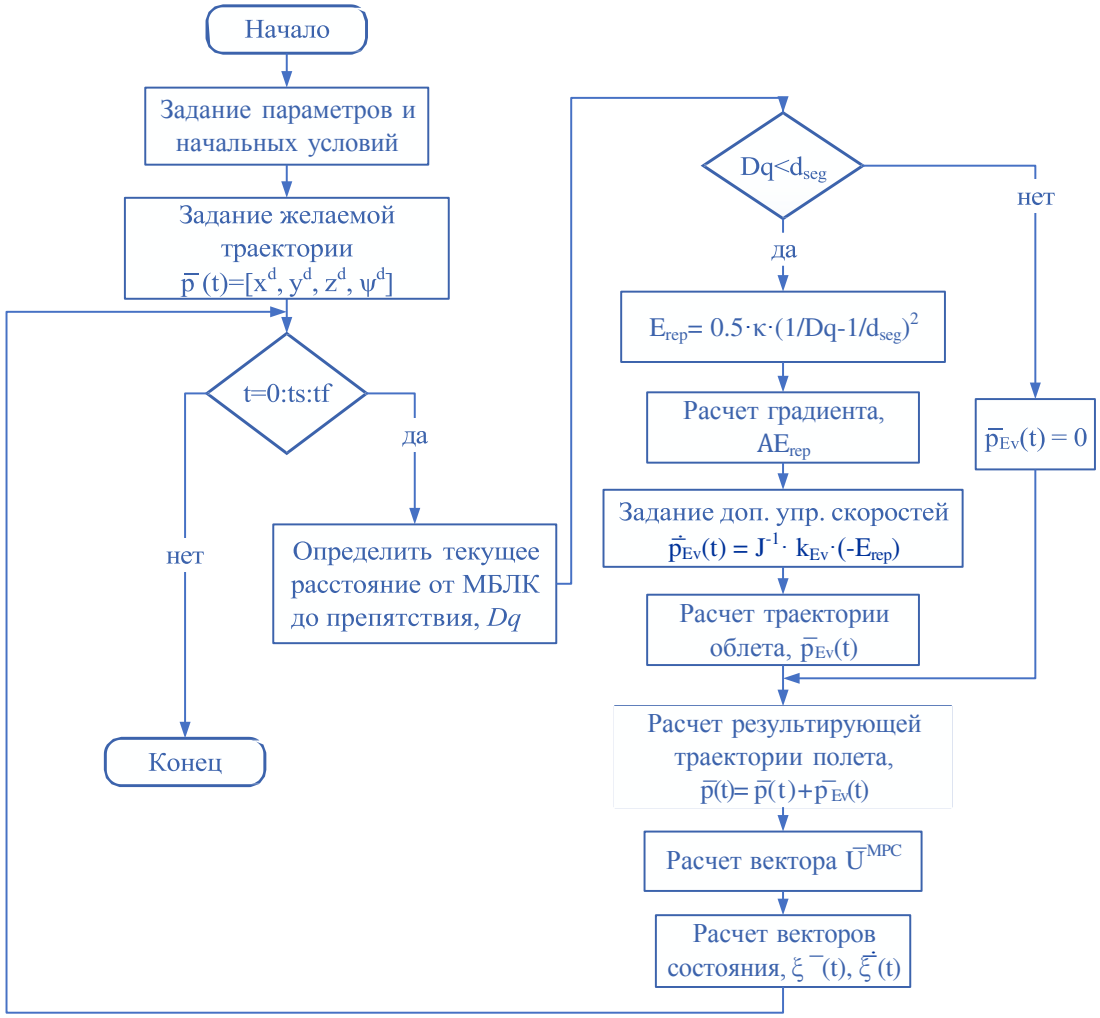


Рис.3.25. Алгоритм обнаружения и облета препятствий МБЛК

Таким образом, расчет вектора оптимальных управляющих сигналов $\bar{U}^{MPC}$ осуществляется блоком, реализующим стратегию управления с прогнозирующей моделью (рис.3.6), внутренняя структура которого может быть модифицирована следующим образом:

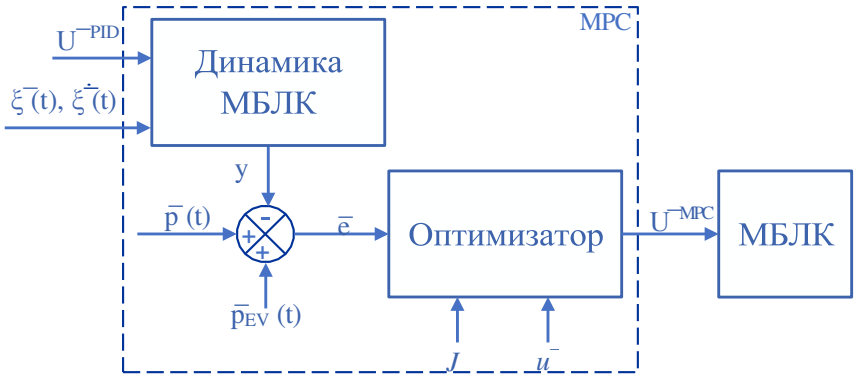


Рис.3.26. Структура блока формирования вектора оптимальных управляющих сигналов U^{MPC}

На основании вектора U^{MPC} производится расчет векторов состояния системы $\xi, \dot{\xi}$, определяющих на основе динамической модели системы последующие значения положения и скорости центра масс МБЛК.

Процесс моделирования пространственного движения МБЛК в среде с препятствиями проводится с учетом вышеописанного алгоритма (рис.3.25). Предполагается, что движение МБЛК происходит по разомкнутой траектории (рис. 3.1.), выполняя в каждой точке мониторинга движение по окружности, центром которой является P_i. При этом, радиус окружностей в точках P_1, P_4 составляет 1.5 м, а в точках P_2, P_3 – 1 м. Основные результаты моделирования представлены на рис. 3.27-3.31.

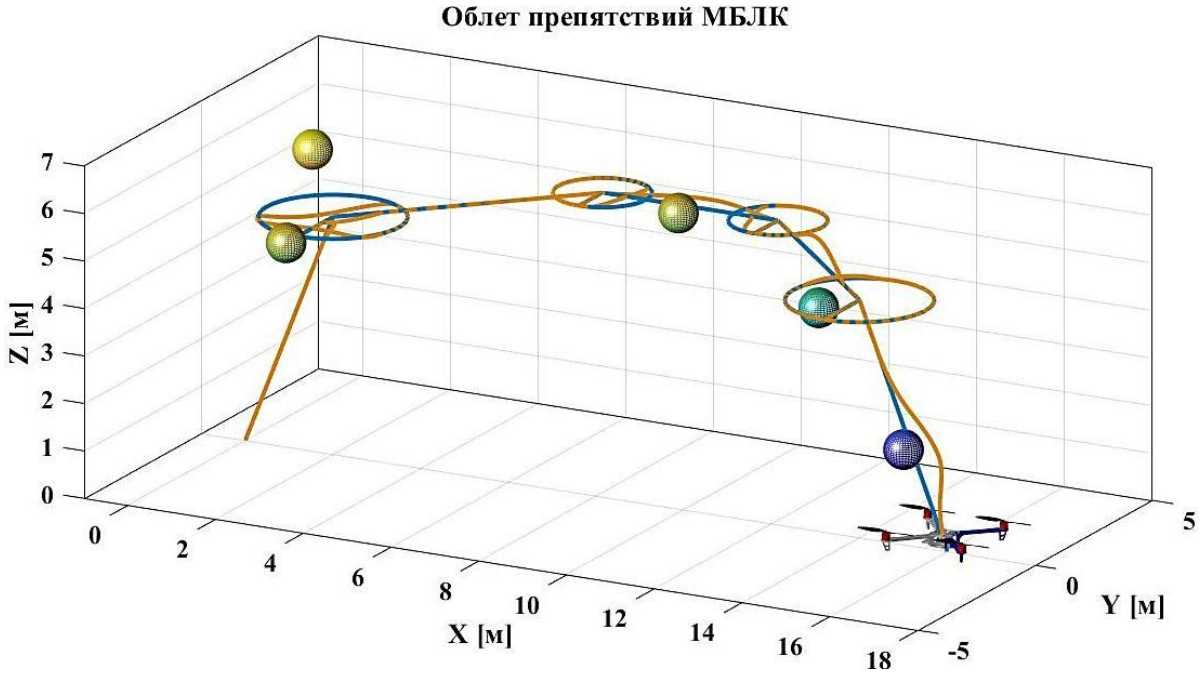


Рис. 3.27. Пространственное движение МБЛК в среде с препятствиями

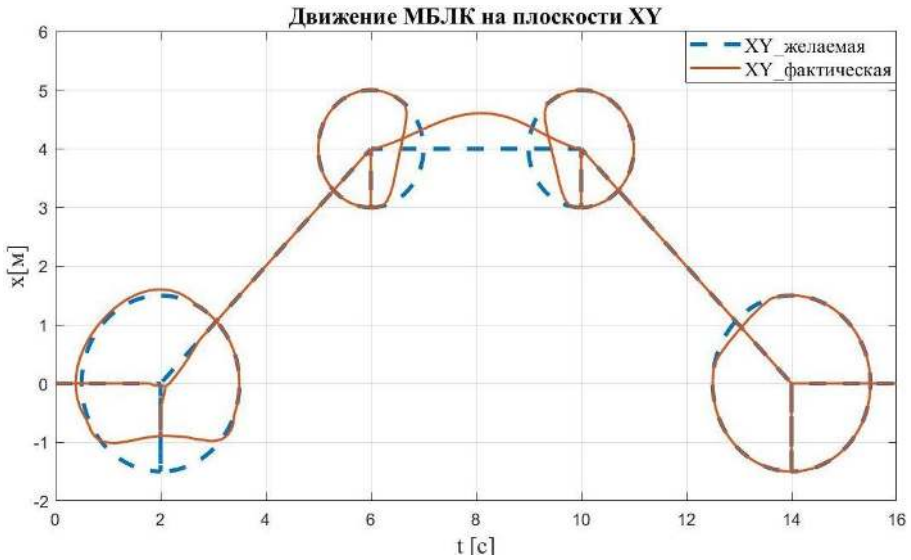


Рис. 3.28. Движение МБЛК на плоскости OXY

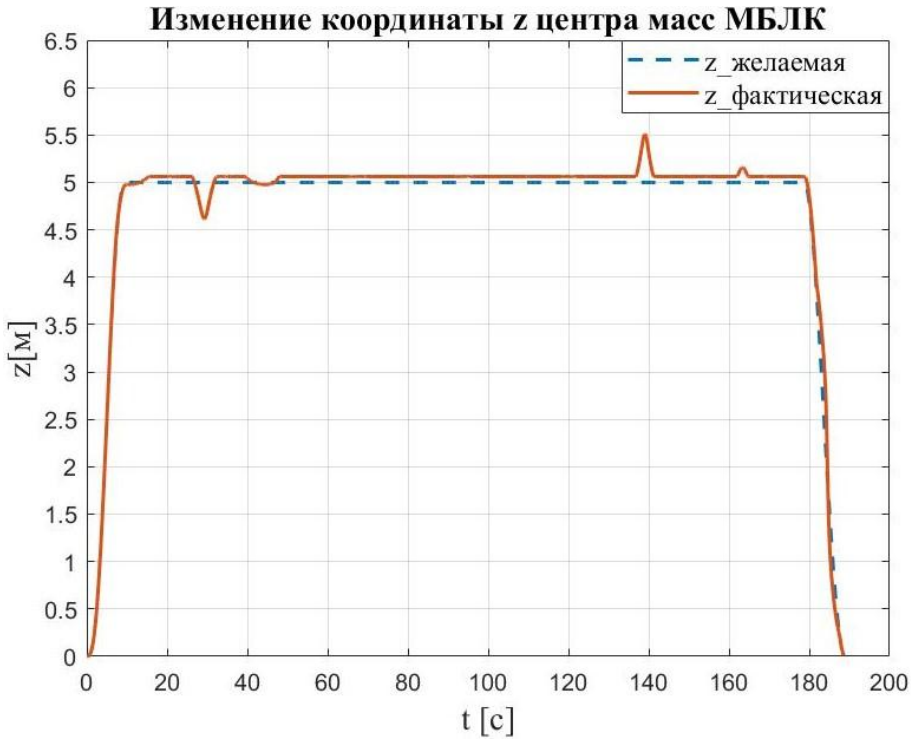


Рис. 3.29. График зависимости от времени изменения высоты центра масс МБЛК

Результаты, представленные на рис. 3.27 – 3.29 отражают работоспособность предложенного алгоритма, позволяющего МБЛК автономно избегать его приближения на расстояние $dQ \leq d_{seg}$ к препятствиям M_i радиусом 0.4 м, где установленное расстояние безопасности d_{seg} составляет 2 м.

Кроме того, на рис. 3.30 – 3.31 приведены результаты создаваемого потенциального поля и изменения проекций линейной скорости центра масс МБЛК на оси *OX*, *OY*, *OZ*.

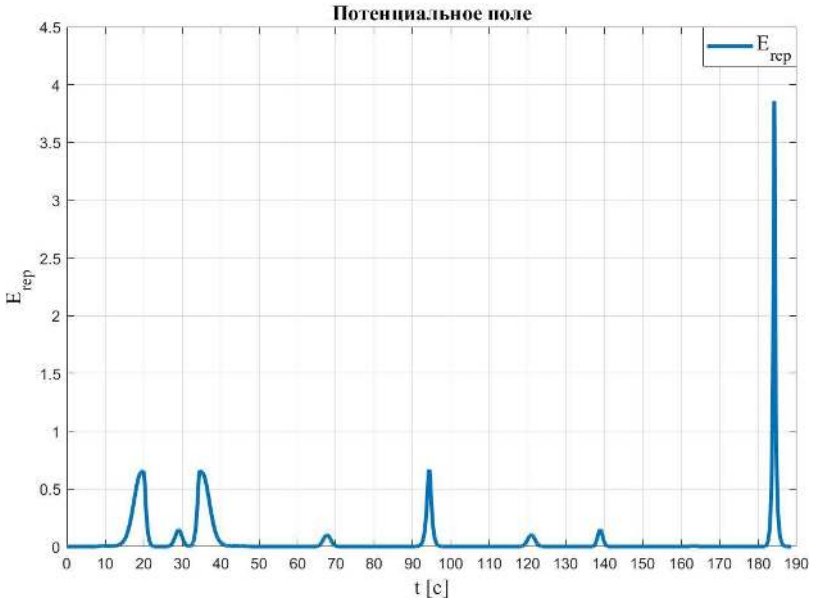


Рис. 3.30. График зависимости от времени изменения потенциального поля

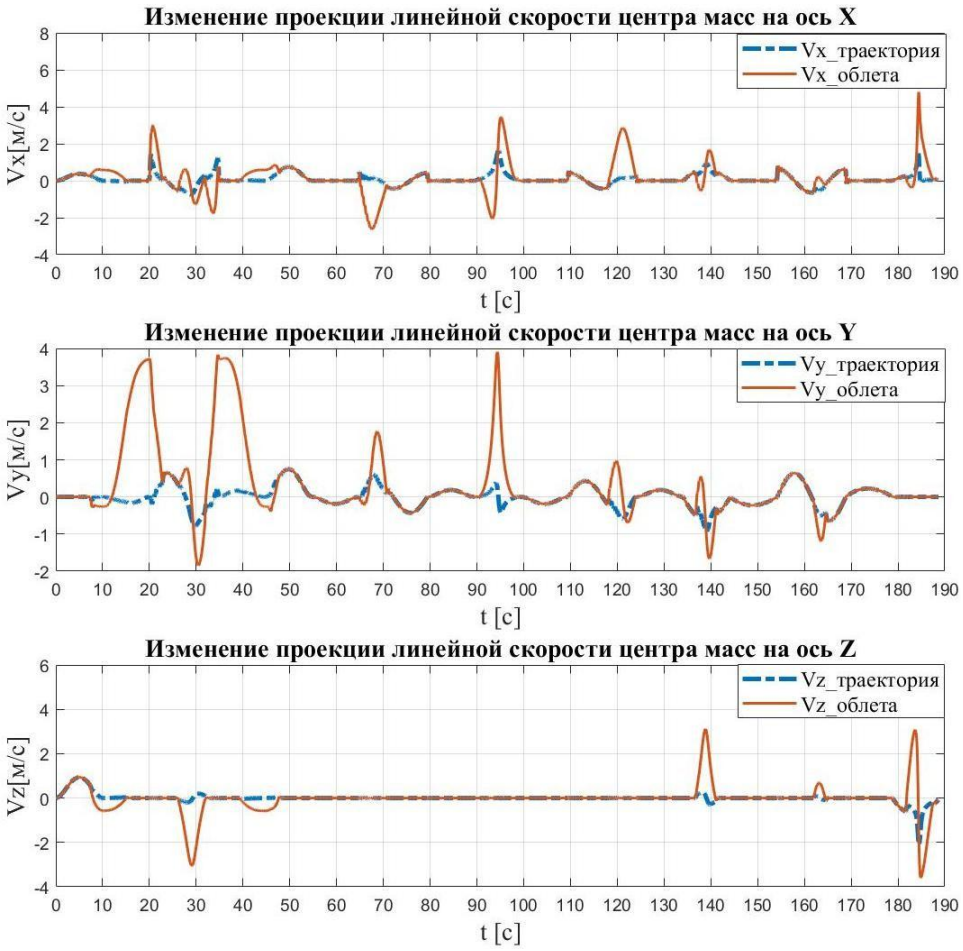


Рис. 3.31. График зависимости от времени изменения проекций линейной скорости центра масс МБЛК на оси: а) OX, б) OY, в) OZ.

Из результатов, представленных на рис.3.30 – 3.31 выявлено, что изменение искусственного потенциального поля носит информационный характер, в зависимости от которого осуществляется управление движением МБЛК путем регулирования его скорости и направления движения по заданной траектории с возможностью облета препятствий на пути следования.

Выводы по третьей главе

1. Разработан метод планирования траектории движения на основе модульного принципа, описан цикл движения, состоящий из четырех базовых движений вращение и движение по прямой.

2. Разработана обобщенная математическая модель управляемого движения МБЛК в абсолютной системе координат, которая представлена дифференциальными уравнениями в векторно-матричной форме с учетом неопределенностей.

3. Разработана схема движения МБЛК в относительной системе координат. Сформулированы задачи траекторного управления. Построена математическая модель возмущенного движения МБЛК.

4. Рассмотрены модели возмущающих воздействий для случайного и импульсного типов возмущений. Промоделировано пространственное движение МБЛК с учетом влияния возмущений на движение МБЛК для случайного возмущения с нормальным законом распределения и импульсным.

5. Разработан метод пространственного движения МБЛК с возможностью обнаружения и облета стационарных препятствий на основе алгоритма потенциальных полей.

Глава 4. АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МБЛК ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

4.1. Описание аппаратно-программного комплекса

Бортовой программно-аппаратный комплекс управления должен обеспечить автономное выполнение МБЛК заверенных оператором задач. При этом, необходимо разработать архитектуру, состоящую из двух уровней управления:

- низкий уровень, отвечающий за управление исполнительными электрическими приводами и взаимодействующими с полетным контроллером измерительными приборами с целью обеспечения пространственного движения МБЛК по заданной траектории;
- верхний уровень, отвечающий за выполнение МБЛК интеллектуальной работы по облету препятствий, точной посадки и обнаружения водного транспорта посредством использования микрокомпьютера, обеспечивающего гибкую и расширенную по функциональным возможностям систему.

Одной из важнейших задач в процессе разработки архитектуры программно-аппаратного комплекса является правильный выбор электронной базы для проектирования МБЛК. Применяемые электронные компоненты выбираются исходя из: 1 - анализа работы устройства можно определить его функциональное назначение и требования к физическим параметрам, обеспечивающим значения основных рассчитанных параметров; 2 - условий эксплуатации, определяющих необходимое конструктивное исполнение электронных компонентов и их стойкость к внешним факторам [60].

В настоящее время существует ряд полётных контроллеров, обладающих разными техническими характеристиками. Оптимальным является выбор полетного контроллера, имеющего исходный код, программное обеспечение и протокол обмена данными в открытом доступе, что позволяет расширить функциональные возможности МБЛК в целях выполнения узконаправленных задач, предусмотренных в рамках научно-

исследовательского или инженерного проекта. Предлагается использовать полетный микроконтроллер Pixhawk 2.4.8 (рисунок 4.1), работа которого базируется на микропроцессоре Cortex M4F (32-битный) с частотой 168 МГц. Архитектура полетного контроллера Pixhawk состоит из набора отдельных модулей, взаимодействующих посредством обмена сообщениями типа uORB и выполняющих функции навигации и связи МБЛК по протоколу MAVLink [73] с наземной станцией управления. Основные характеристики устройства представлены в табл. 4.1.



Рис.4.1. Полетный контроллер Pixhawk 2.4.8.

Табл. 4.1.

Характеристики микроконтроллера Pixhawk

Процессор	Cortex M4F
Рабочее напряжение	5В
Цифровые входы/выходы PWM	14
Энергонезависимая память	256 Кб
Объем флэш-памяти	2 Мб
Интерфейсы подключения	UART, SPI, I2C, CAN, USB

Микроконтроллер Pixhawk [95] оснащен встроенными измерительными приборами, такими как: гироскоп, акселерометр, магнитометр, инерциальный модуль, барометр. Определение ориентации МБЛК в пространстве осуществляется при помощи гироскопа L3GD20H, который представляет собой 16-битный трехосевой микромеханический датчик, использующий интерфейс I2C и низкочастотный фильтр (50 Гц) для обработки информации. При этом, частота дискретизации модуля составляет 760 Гц с чувствительностью 2000 ^{o}/с.

Ориентация МБЛК в пространстве также определяется путем измерения проекций ускорения и направления азимута системы посредством использования модуля LSM303D, состоящего из трехосевых акселерометра и магнитометра. Диапазон измерения акселерометром проекций ускорения составляет ±16g с максимальной чувствительностью ±2g. При этом, измерение магнитометром отклонения робота от линий магнитного поля осуществляется в диапазонах до ±12 Гаусс. Пропускная способность модуля LSM303D составляет 100 – 400 кГц при использовании последовательного интерфейса I2C. Кроме того, в качестве вторичного отказоустойчивого модуля для определения положения и решения задачи стабилизации МБЛК используется инерциальный модуль MPU6000, включающий в себя трехосевые гироскоп и акселерометр, совместная работа которых позволяет снизить погрешность при расчетах гироскопа и уменьшить чувствительность акселерометра к внешним воздействиям. Обработка данных проводиться посредством применения расширенного фильтра Кальмана. Связь модуля с полетным контроллером обеспечивается интерфейсом I2C (400 кГц). Оценка положения МБЛК относительно Земли проводится высокоточным барометрическим датчиком MS5611 (24-битный), принцип работы которого основывается на определение высоты полета робота исходя из изменений в атмосферном давлении и температуре. Данный модуль связывается с полетным контроллером интерфейсом I2C (20 МГц). Диапазон измерения давления составляет 10 - 1200 гПа, а точность измерения находится в пределах до 10 см.

К полетному контроллеру Pixhawk могут подключится различные внешние измерительные приборы, такие как GPS-модуль (рисунок 4.2), позволяющий позиционировать МБЛК в пространстве, осуществлять полет по указанным оператором путевым точкам, а также возвращаться на точку взлета. Предлагается использовать GPS модуль M8N [96], который обладает высокой чувствительностью, скоростью обновления навигационной информации, а также точностью позиционирования. Основные характеристики данного модуля представлены в табл. 4.2.



Рис. 4.2. GPS-модуль M8N

Табл. 4.2.

Характеристики GPS-модуля M8N

Поддерживаемые навигационные системы	GPS, ГЛОНАСС, Galileo
Точность позиционирования	до 2,5 м
Чувствительность (при навигации)	167 дБм
Скорость обновления данных навигации	до 18ГГц
Встроенные модули	магнитометр (HMC5983)
Интерфейсы подключения	UART, I2C

При выполнении МБЛК полетных заданий на небольших высотах, решении задач автономной посадки, определении и облете препятствий необходимо дополнить набор внешних измерительных приборов СМПТ оптическим дальномером (рисунок 4.3), обеспечивающим приемлемую точность измерения расстояния МБЛК до поверхности Земли и препятствующими объектами на пути следования всенаправленной системой на базе инфракрасных датчиков TFMINI PLUS [97], основные характеристики которых представлены в табл.4.3.



Рис. 4.3. Оптический дальномер TFMINI PLUS

Табл. 4.3.
Характеристики TFMINI PLUS

Диапазон измерений	0,1 – 12 м
Точность измерения	1 – 5 см
Рабочее напряжение	5 В
Частота обновления данных	до 1000 Гц
Интерфейсы подключения	UART, I2C

На основе алгоритмов управления и полученных данных из блока измерительных приборов полетным контроллером Pixhawk посредством регуляторов скоростей (ESC) формируется управляющие ШИМ-сигналы, поступающие в электроприводы МБЛК для выполнения на низком уровне установленного оператором полетного задания. При этом, задача выбора винтомоторной группы МБЛК заключается в том, чтобы обеспечить необходимую подъемную силу, сохраняя баланс между энергопотреблением, временем полета и весом конструкции системы. Данную задачу решается путем использования инструмента моделирования параметров мультироторных систем eCalc [94] согласно следующему алгоритму (рисунок 4.4).

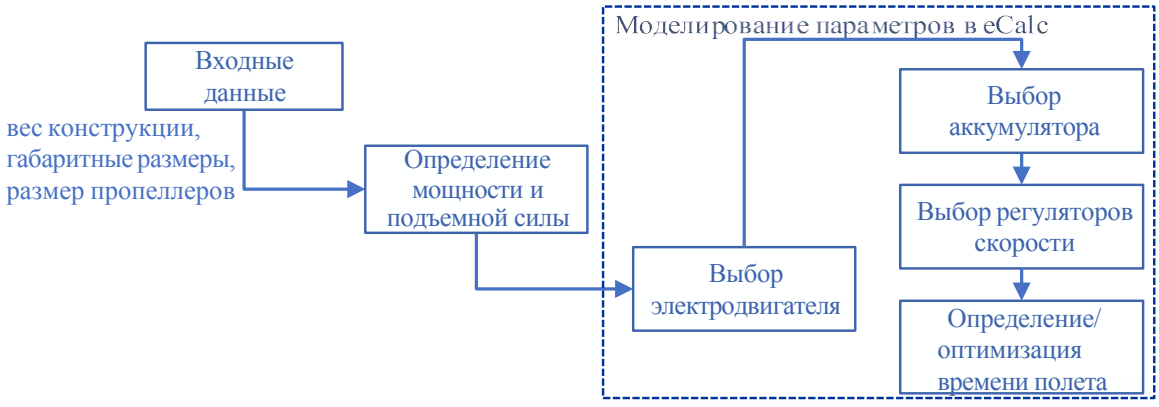


Рис.4.4. Алгоритм выбора винтомоторной группы МБЛК

С учетом габаритных размеров (450 х 450 х 50 мм) и вес конструкции МБЛК (2,5 кг), инструментом eCalc предложено использование бесколлекторных электродвигателей фирмы EMAX серии MT2213 совместно с 9-дюймовыми пропеллерами DJI 9450. Выбор данной винтомоторной

группы позволяет создавать суммарную подъемную силу до 3,8 кг. Время автономного полета составляет около 45 мин. на одной зарядке при использовании четырёхъячеечного литий-полимерного аккумулятора емкостью 16 000 мАч.

На верхнем уровне предложенной аппаратно-программной архитектуры реализуется интеллектуальная работа СМПТ. Расширению функциональных возможностей МБЛК способствует использование микрокомпьютера Raspberry Pi 4 (рисунок 4.5), работа которого осуществляется на базе 4-ядерного микропроцессора ARM Cortex-A72 (64-битный) на частоте 1500 МГц [98]. Данное решение позволяет использовать вычислительные возможности микрокомпьютера Raspberry Pi для выполнения задач СМПТ, включая обмену информацией с полетным контроллером Pixhawk для управления МБЛК.



Рис.4.5. Микрокомпьютер Raspberry Pi 4

Основные характеристики микрокомпьютера Raspberry Pi 4 приведены в табл.4.4.

Табл. 4.4.

Характеристики Raspberry Pi 4

Процессор (CPU)	Cortex-A72 (4-ядерный, 1500 МГц)
Графический процессор (GPU)	Broadcom VideoCore VI (4K, 500 MHz)
Оперативная память	8 Гб (LPDDR4, 3200 МГц)
Интерфейс GPIO	40 универсальных портов ввода/вывода
Проводной интерфейс	Ethernet LAN, 1 Гбит/с
Беспроводной интерфейс	WI-FI 5 (802.11ac), Bluetooth 5.0
Рабочее напряжение	5В (максимальный ток, 3А)
Доступные интерфейсы	micro-HDMI, USB 2.0, USB 3.0, CSI, DSI

В качестве аппаратного средства для получения необходимой визуальной информации, на базе которой строится бортовая система технического зрения, используется камера RGB-D Intel Realsense D455 [99]. Главным достоинством видеоустройства (рисунок 4.6) является наличие встроенного инерциального модуля, обеспечивающего стабилизацию изображений, определение перемещения МБЛК и возможность использовать модуль как инструмент для составления карты местности с привязкой к объекту, выступающему целью мониторинга. Основные характеристики данной RGB-D камеры представлены в табл.4.5.



Рис.4.6. RGB-D камера Intel Realsense D455

Табл. 4.5.

Характеристики RGB-D камера D455

Разрешение	1280 x 720 (до 90 FPS)
Угол обзора	90^{o} x 65^{o}
Рабочее напряжение	5 В
Частота обновления данных	90 Гц
Встроенные модули	IMU, инфракрасный модули, RGB-датчик
Интерфейс подключения	USB 3.1

Обеспечение процесса обмены информацией между МБЛК и наземным пунктом управления, как о текущем состоянии системы, так и о ходе выполнении СМПТ вверенных оператором задач осуществляется модулем мобильной связи, позволяющим расширить радиус покрытия связи, а также увеличить пропускной способности информационного канала для передачи в режиме реального времени видеоданных с борта МБЛК. Исходя из технических характеристик (табл.4.6) и совместимости с аппаратной базой используется модуль мобильной связи (рисунок 4.7) Raspberry Pi 4G/LTE фирмы

Sixfab CORE [100]. Качество Интернет-соединения в отдаленных районах, где доступ к мобильной связи ограничен может быть улучшено посредством установки дополнительных мобильных базовых станций в близости прибрежных территорий.

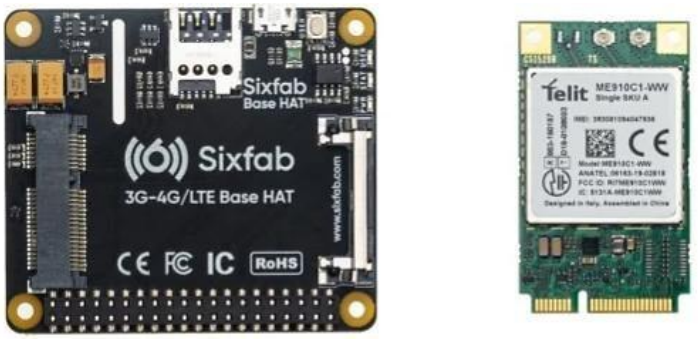


Рис.4.7. Модуль сотовой связи Raspberry Pi 4G/LTE

Табл. 4.6.
Характеристики модуля 4G/LTE

Стандарт мобильной связи	4G/LTE
Скорость передачи данных	150 Mbps (DL) / 50 Mbps (UL)
Рабочее напряжение	5 В (максимальный ток, 3А)
Интерфейс подключения	UART, USB

В случае возникновения нештатных ситуаций в радиусе до 5 км предусмотрено использование модуля телеметрии, совместимого с микроконтроллером Pixhawk и работающего на частотах 433 и 915 МГц, что позволяет поддержать связь с МБЛК. На основании информации, передаваемой телеметрической системой оператору открывается возможность дистанционно внедрить альтернативные (корректирующие) или безопасные аварийные стратегии при помощи пульта радиоуправления и приемника по протоколу UART, работающих на частотных диапазонах 2,4 ГГц.

Кроме того, эффективность работы микрокомпьютера Raspberry Pi и подключенных к нему внешние устройства обеспечивается дополнительным литий-полимерным модулем емкостью 3000 мАч.

Архитектура системы мониторинга водного транспорта интегрирована в операционной системе Linux Ubuntu 18.04, установленной в микрокомпьютере

Raspberry Pi. Передача данных между микрокомпьютером и полетным микроконтроллером осуществляется через USB посредством протокола MAVLink, состоящего из зашифрованных сообщений, их типов и набора предписанных и служебных функций. Протокол определяет набор сообщений, содержащих информацию о состоянии, настройке параметров полетного контроллера, вводе команд для управления МБЛК и др. Кроме того, тип сообщения определяется идентификатором (англ. Message ID) и телом пакета данных (англ. Payload). Содержимое и размер сообщения зависят от идентификатора и проверяется контрольной суммой байтов для обнаружения ошибок в последовательности обмениваемых между устройствами сообщений [73]. Программная реализация алгоритмов СМПТ основывается на использовании языка программирования Python и библиотеки DroneKit [101-103], которая позволяет создать программный интерфейс высокого уровня для управления движением МБЛК и решения интеллектуальных задач.

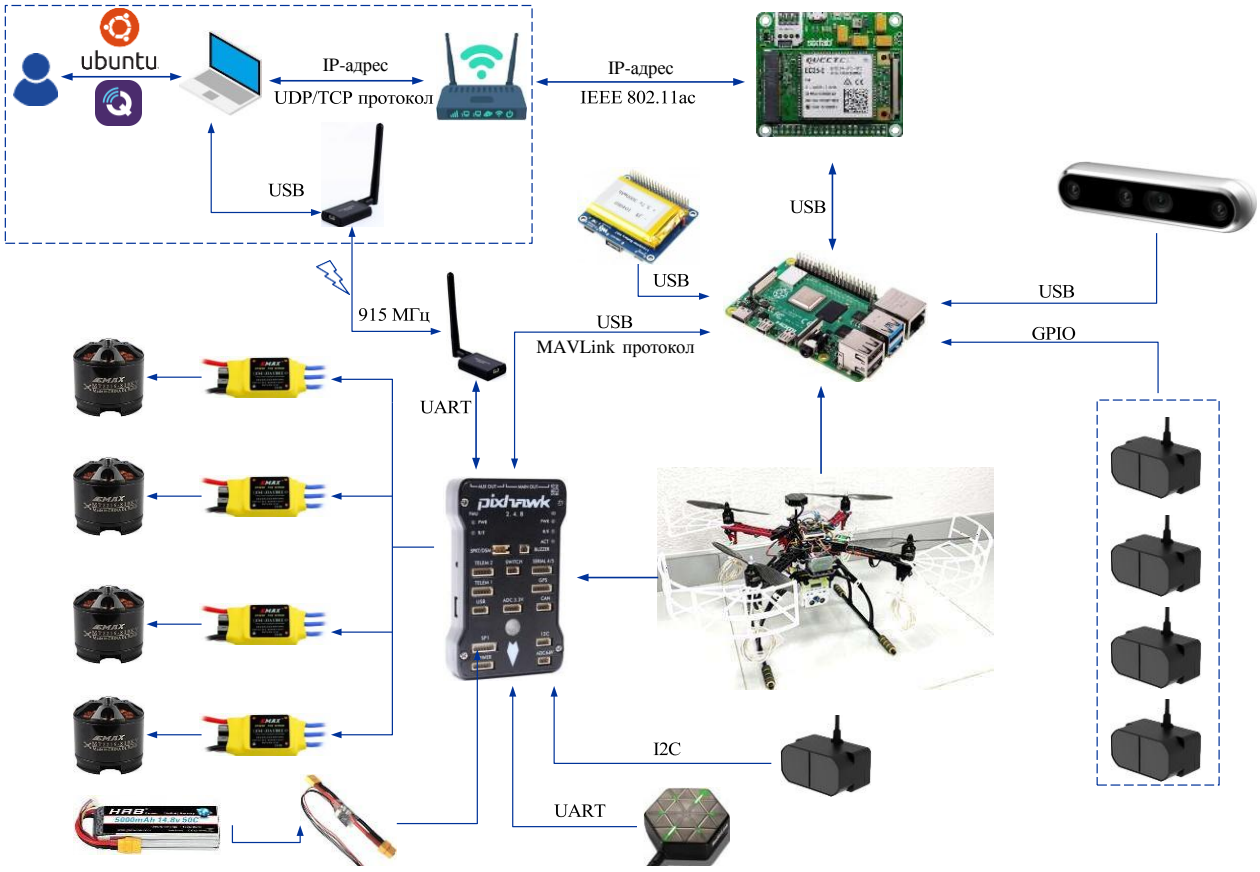


Рис.4.8. Аппаратно-программная архитектура СМПТ

4.2. Описание алгоритмов функционирования системы мониторинга прибрежных территорий

Рассмотрим общий алгоритм метода мониторинга водного транспорта на прибрежных территориях посредством МБЛК, общая схема которого представлена на рис.4.9. Алгоритм выполняется в следующей последовательности:

1. Оператор, находящийся на наземной станции управления устанавливает удаленную связь с МБЛК по протоколу SSH (англ. Secure Shell), что позволяет получить доступ к командной строке микрокомпьютера RaspberryPi из персонального компьютера. Безопасное соединение обеспечивается переадресацией сетевого трафика с внешнего адреса маршрутизатора на адрес выбранного компьютера в локальной сети.
2. Проверка подключения модулей СМПТ к сети осуществляется отправкой опроса оператором. Затем, задаются параметры полетной миссии, включающие в себя массив GPS-координат территорий, где требуется проводить мониторинг водного транспорта.
3. Взлет является первым этапом движения МБЛК, цель которого заключается в том, чтобы летательный аппарат набрал необходимую высоту и завис на заданной оператором высоте.
4. Движение МБЛК по заданной траектории представляется процессом последовательной обработки путевых точек массива GPS-координат. В заданных точках МБЛК проводит визуальное обследование территорий, а также распознавание и определения координат о местонахождении обнаруженных морских судов.
5. Посадка МБЛК осуществляется в результате завершения полетной миссии, при этом посадка может производится в промежуточный пункт управления или подзарядки, либо в начальный пункт взлета. Посадка реализуется в автоматическом режиме на основе визуальных данных.
6. МБЛК выводит полный отчет о результатах работы СМПТ, либо готовится к началу новой полетной миссии в случае необходимости.

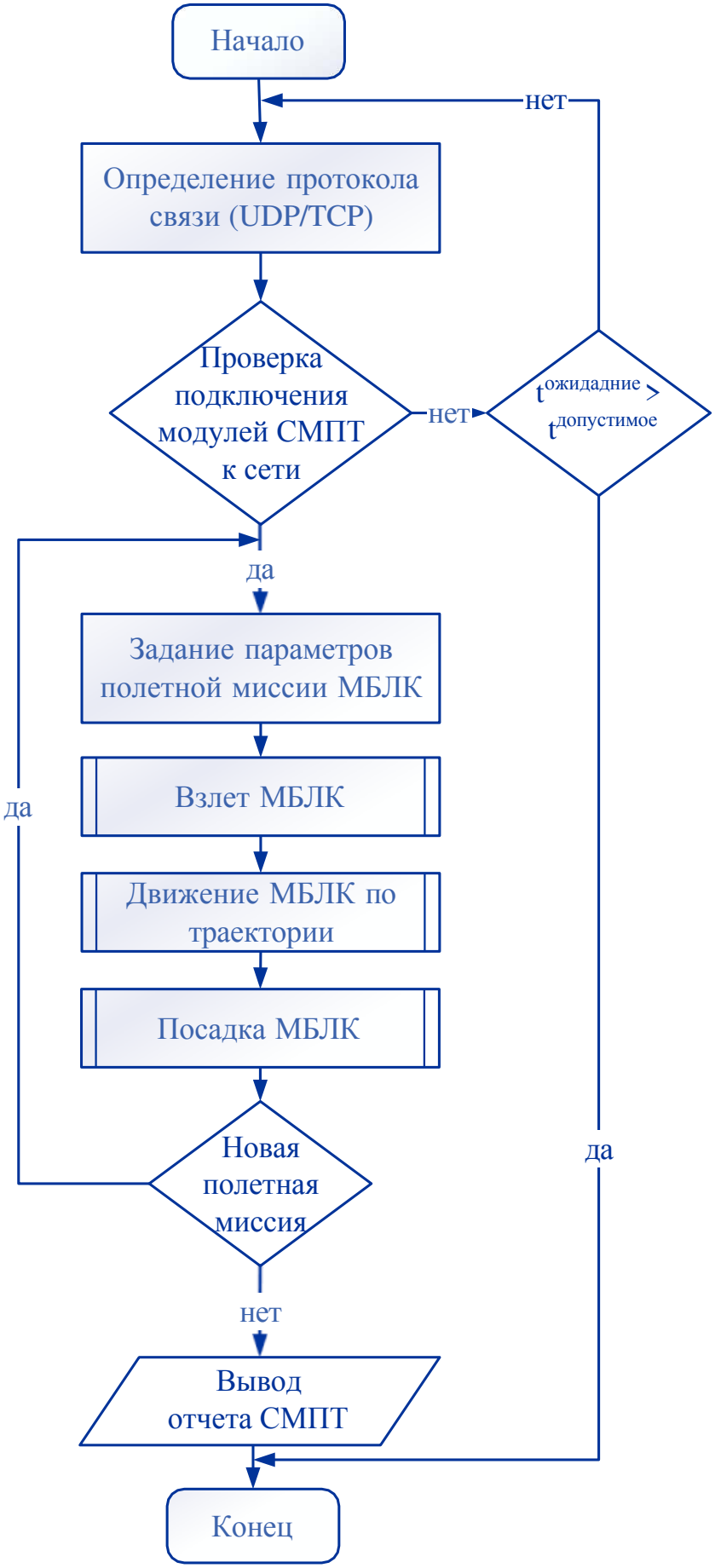


Рис.4.9. Алгоритм метода мониторинга водного транспорта на базе МБЛК

Далее, рассмотрим внутреннюю структуру трех основных подсистем, описывающих этапы траекторного движения МБЛК и решаемые задачи СМПТ. На рис.4.10. представлена последовательность действий при выполнении этапа взлета МБЛК:

1. Оператор, получив информацию о готовности модулей СМПТ к выполнению полетной миссии, выключает режим безопасности, что приводит к изменению режима МБЛК в «GUIDED».
2. Режим «GUIDED» позволяет осуществить полет МБЛК на основе поступающей информации от системы глобального позиционирования. На данном этапе винтомоторные группы МБЛК приводятся в движение частотой, соответствующей 10% от их максимального значения.
3. Оператор, в зависимости от географических особенностей местности задает желаемое значение высоты $h^{желаемое}$, на которую необходимо подняться МБЛК.
4. Набор высоты осуществляется на основании ШИМ-сигналов, поступающих в электродвигатели в результате обработки информации каналов обратной связи и корректировки управляющих выходных сигналов системой автоматического управления.
5. Отклонение по высоте Δh определяется как разность между желаемым $h^{желаемое}$ и текущим $h^{текущее}$ значениями высоты. При этом, источником измерения высоты выступают барометр и инфракрасный датчик. Текущее значение параметра будет определяться измерениями инфракрасного датчика до тех пор, пока данное значение будет находиться в диапазоне измерения инфракрасного датчика $h^{ик_макс}$, в противном случае текущее значение будет задан измерениями барометра $h^{бар_датчик}$.
6. Перевод МБЛК в режим удержания высоты «ALT-HOLD» выполняется в случае когда $h^{текущее} > 0{,}95 \cdot h^{желаемое}$. В данном режиме, МБЛК способен зависать на заданную высоту при частоте вращения винтомоторных групп, соответствующей 45 – 50 % от их максимального значения.

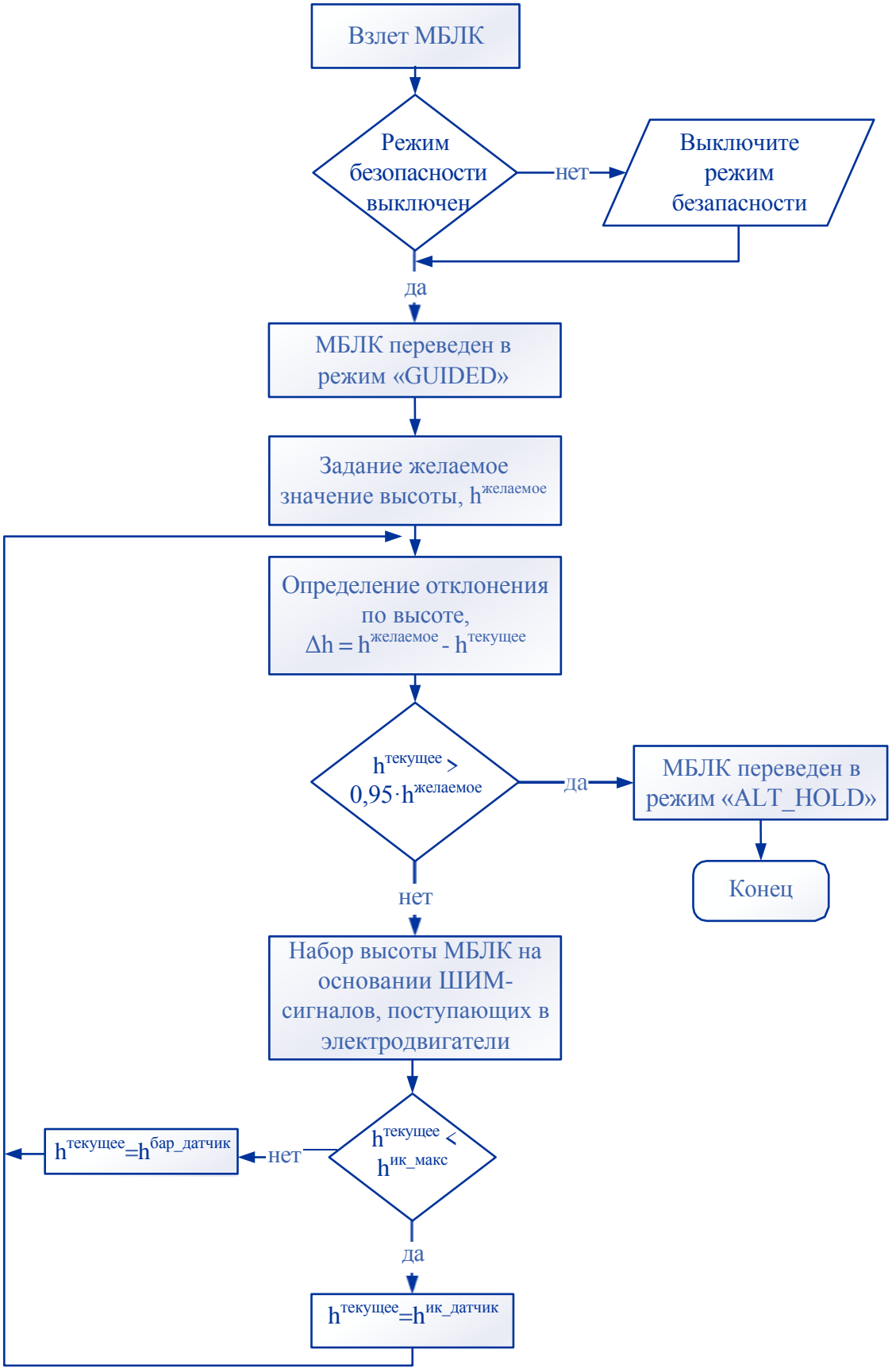


Рис.4.10. Алгоритм реализации подсистемы «Взлет МБЛК»

Далее, рассмотрим алгоритм выполнения этапа траекторного движения МБЛК, структура которого представлена на рис.4.11. В данном этапе МБЛК производит обследование местности, а также визуальный мониторинг водного транспорта на основе бортовой системы технического зрения. Последовательность действий, выполняемых МБЛК представлены ниже:

1. МБЛК определяет текущие GPS-координаты P_i. Данное значение сохраняется в памяти микрокомпьютера в случае возникновения нештатных ситуаций для обеспечения возврата МБЛК в точку начала выполнения траектории.
2. МБЛК последовательно обработает путевые точки P_i, входящие в массив GPS-координат P. При этом, параметры ширины и долготы i-й путевой точки представляются координатами x и y соответственно. Расстояние d_i между последующей P_{i+1} и текущей P_i путевыми точками может быть определено по формуле евклидова расстояния: $d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ [93].
3. Далее МБЛК переводится в режим «GUIDED». Траекторное движение представляет собой двухточечную задачу, последовательно образующее кусочно-линейные сегменты. При этом, процесс перестроения траектории движения МБЛК из-за наличия возможных препятствий реализуется модулем, состоящим из ультразвуковых датчиков согласно алгоритму искусственных потенциальных полей (PFPP), описанному в п. 2.3.
4. При условии, что текущее расстояние $d_i^{текущее}$ до путевой точки P_{i+1} составляет меньше 2% изначально рассчитанного расстояния между P_i и P_{i+1}, считается, что МБЛК прибыл в пункт назначения.
5. Затем, визуальное обследование местности, обнаружение и определение географических координат искомых водных объектов осуществляется бортовой системой технического зрения (рис. 4.12).

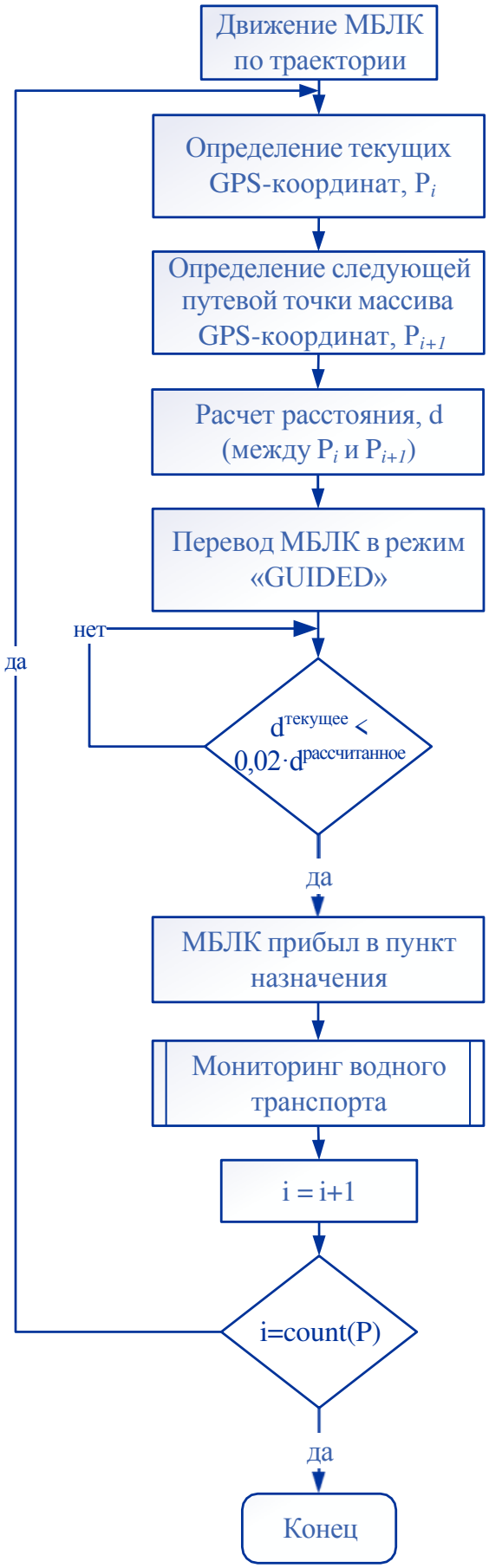


Рис.4.11. Алгоритм реализации подсистемы «Движение МБЛК по траектории»

Процесс мониторинга водного транспорта предполагает выполнение следующих действий, последовательность которых представлена ниже:

1. МБЛК переводится в режим движения по кругу «CIRCLE», радиус которого определяется оператором исходя из требований к выполнению полетной миссии. В данном режиме, МБЛК осуществляет круговое движение с головным направлением к центру круга.
2. Далее, осуществляется загрузка файла, который содержит матрицу весов нейронной сети, на основании которой система технического зрения (СТЗ) будет осуществлять предсказания об обнаружении искомого объекта, при пороговом критерии точности распознавания > 85%.
3. Обработка изображений является двухэтапным процессом, состоящим из масштабирования и преобразования изображений из RGB в черно-белую цветовую модель для оптимизации вычислительных ресурсов и увеличения вероятности правильного распознавания искомых объектов.
4. Процесс распознавания и определения географических координат обнаруженных морских судов выполняется бортовой СТЗ на базе СНС класса YOLO. Запись обнаруженных объектов вносится в матрицу $n = [lon, lat, h, p, c]$, где lon, lat, h – географические координаты искомого объекта, представляющиеся шириной, долготой и высотой над уровнем моря соответственно, p – вероятность предсказания; c – класс объекта.
5. Оператору предлагается выполнение дополнительного круга обзора в случаях, когда по совершению манёвра не было зарегистрировано наличие морских судов, либо для повторного обследования местности с целью уточнения информации об обнаруженных объектах. При этом, радиус круга обзора может быть изменен на усмотрение оператора для обеспечения качественного мониторинга местности.
6. При отсутствии необходимости в выполнении дополнительного круга обзора, его радиус R обнуляется, что позволяет МБЛК зависать на заданной высоте пока проводится обновление следующей путевой точки в массиве GPS-координат, включая расчет расстояния до неё.

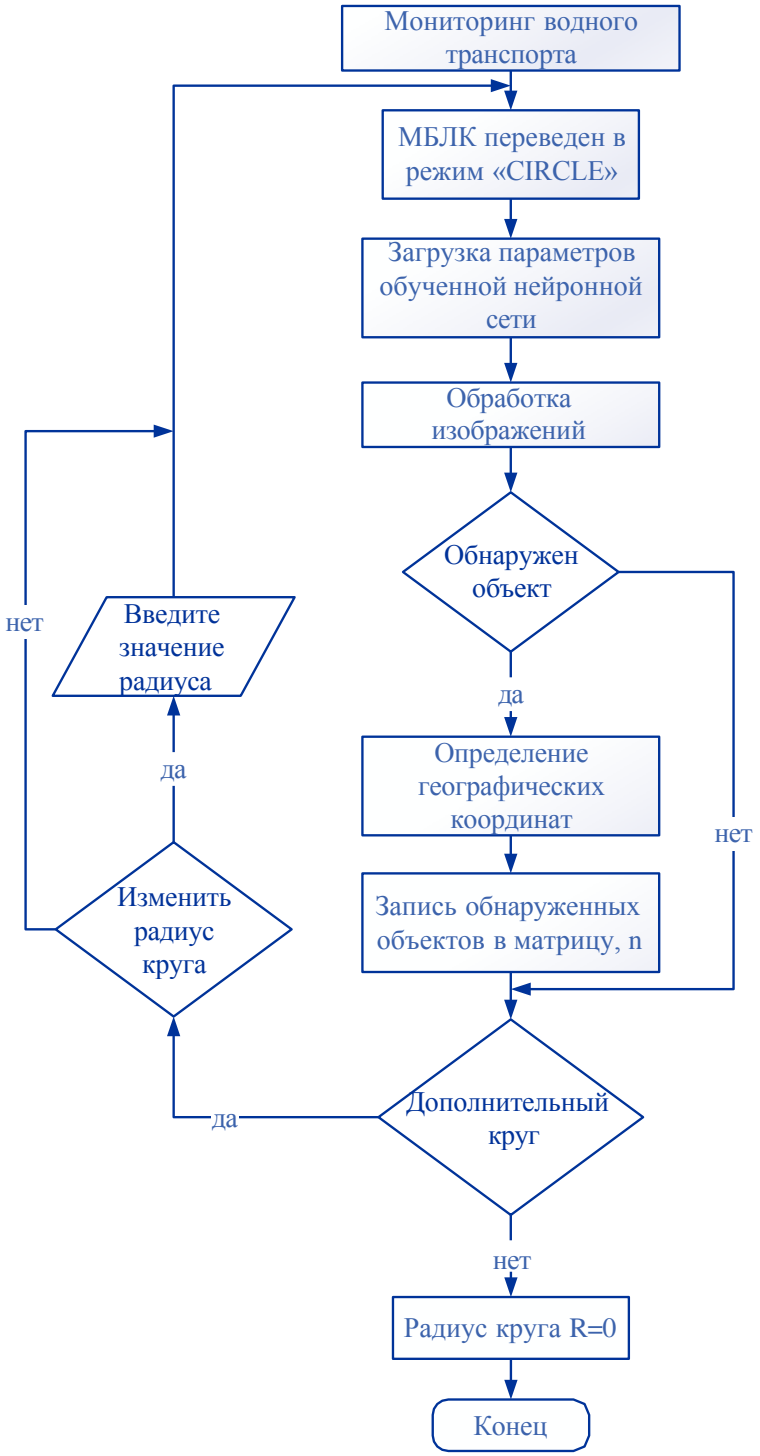


Рис.4.12. Алгоритм реализации метода мониторинга водного транспорта

При завершении полетной миссии, посадка может производится в ограниченные пространства, такие как промежуточный пункт управления или подзарядки, либо в начальный пункт взлета. В связи с этим возникает необходимость в обеспечении автоматической высокоточной посадки МБЛК. Структура алгоритма этапа посадки МБЛК представлена на рис. 4.13. предполагает выполнение следующих действий:

1. МБЛК переводится в режим «LAND». На данном этапе, снижение высоты осуществляется в текущем положении на основании измерений, полученных из барометра, позиционируя МБЛК посредством навигационной системы GPS.
2. Определение вектора геометрических параметров M идентификационного маркера ArUco осуществляется бортовой СТЗ при текущем значении высоты $h^{текущее}$ меньше максимального значения $h^{макс_ArUco}$, при котором видеоустройство способно его распознавать. Вектор M содержит информацию о координатах вершин и геометрического центра маркера ArUco, включая текущее расстояние до поверхности назначенного пункта приземления МБЛК, значение которого определяется инфракрасным датчиком.
3. Процесс обнаружения паттернов и анализа вектора геометрических параметров маркера позволяет позиционировать МБЛК в системе координат, связанной с центром маркера. Для этого изначально необходимо определить вектор отклонения координат $\Delta_{pos} = [\Delta_x, \Delta_y] = [(c_x - \frac{l_x}{2}) / l_x, (c_y - \frac{h_y}{2}) / h_y]$, где c_x, c_y – координаты x, y геометрического центра маркера ArUco; l_x, h_y – горизонтальный и вертикальный размеры кадра изображения.
4. Затем, с учетом угла поля зрения видеоустройства по горизонтали (h_{FOV}) и вертикали (v_{FOV}) производится расчет вектора отклонения углов ориентации $\Delta_{ang} = [\Delta_{ang_x}, \Delta_{ang_y}] = [(\Delta_x \cdot h_{FOV}), (\Delta_y \cdot v_{FOV})]$.
5. Текущие значения вектора Δ_{ang} используются в САУ в качестве желаемых значений углов крена и тангажа для того, чтобы формировать соответствующие управляющие ШИМ-сигналы, поступающие на электродвигатели МБЛК.
6. При условии, что геометрические центры видеоустройства $С^{камера}$ и маркера ArUco совпадают на 95 % или более, МБЛК продолжает

снижение высоты до тех пор, пока расстояние до поверхности маркера больше минимального порогового значения измерения инфракрасного датчика $h^{мин_ИК}$, в противном случае проводиться прерывание ШИМ-сигналов, поступающих на электродвигатели, что приводит к полной остановке винтомоторных групп и завершению этапа посадки МБЛК.

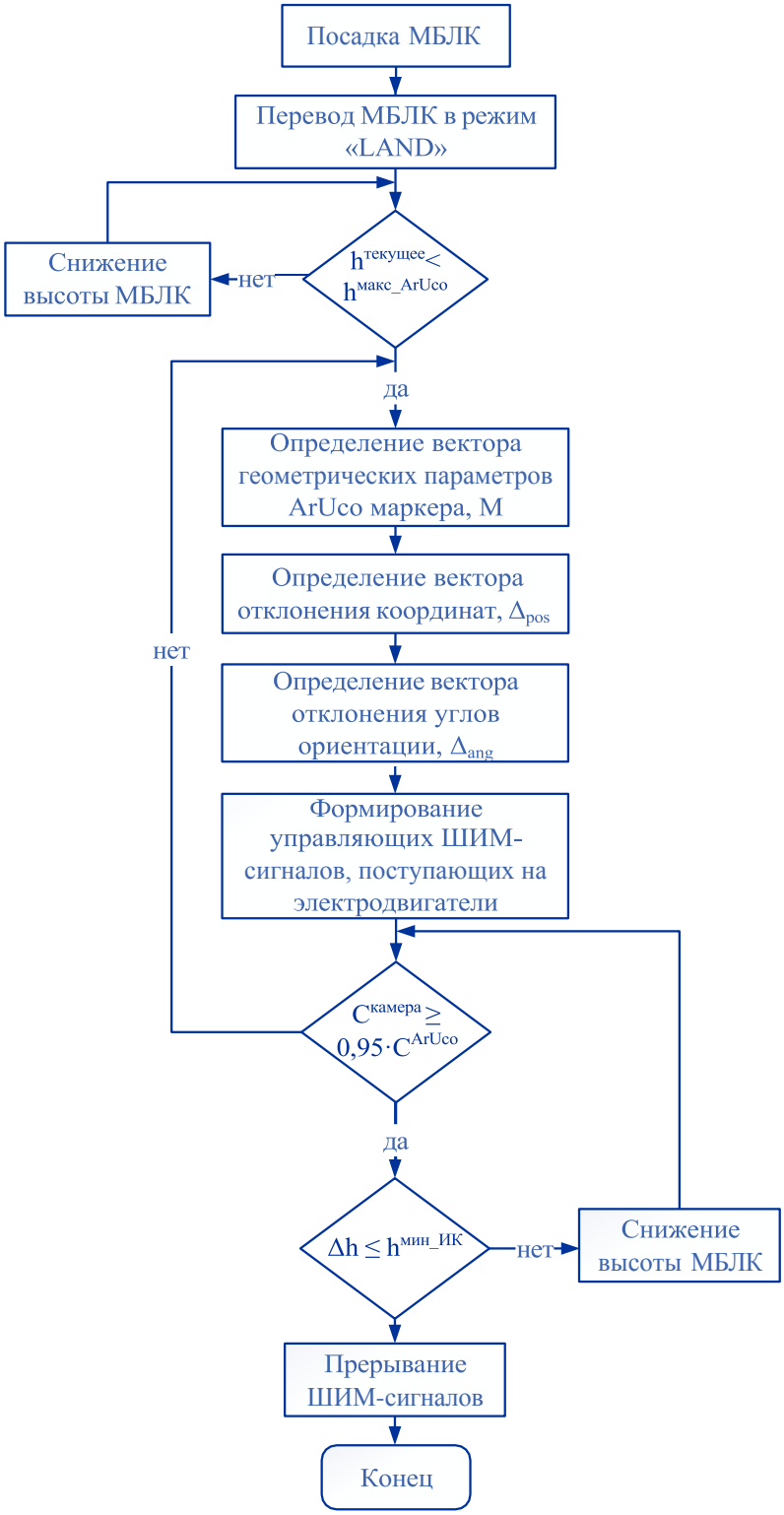


Рис.4.13. Алгоритм реализации подсистемы «Посадка МБЛК»

4.3. Экспериментальное изучение движения МБЛК

Из теоретических исследований, проведенных в главах 2, 3 диссертационной работы выявлена закономерность движения, а также законы и стратегии управления МБЛК, обеспечивающие автономное движение роботизированной платформы воздушного базирования в условиях неопределенности. В силу сложности рассматриваемой системы возникает необходимость в дополнении результатов виртуального моделирования экспериментальными данными, позволяющими провести оценку степени влияния аэродинамических и массо-инерционных свойств МБЛК на его стабилизацию и устойчивость к внешним воздействиям. Одним из наиболее важных условий при выполнении экспериментальных опытов является обеспечение безопасной и контролируемой среды для обработки данных информационно-измерительных модулей и настройки параметров многоканального регулятора системы управления МБЛК за счет применения экспериментальных стендов [104].

В данном разделе представлено краткое описание методики проведенных экспериментальных исследований основных аэродинамических характеристик МБЛК и его режимов движения, включая точную настройку параметров регулятора САУ МБЛК, закрепленным на многофункциональном стенде, разработанном в лаборатории кафедры ММиР ЮЗГУ (рисунок 4.14).

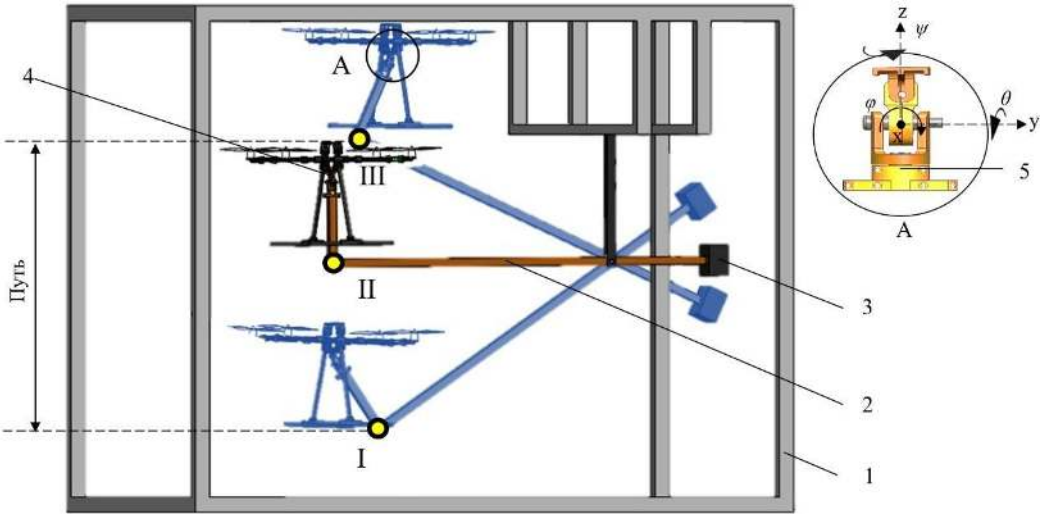


Рис.4.14. Многофункциональный стенд: 1 – опорная рама, 2 – платформа, 3 – противовес, 4 – прототип МБЛК, 5 – трехосевой шарнир

Прототип МБЛК 4, выполненный по квадрокоптерной схеме в X-образной конфигурации закреплен на трехосевом карданном шарнире 5, обеспечивающем возможность поворота МБЛК в горизонтальной плоскости и вокруг собственной оси. Основание карданного шарнира 5 неподвижно установлено на платформе 2, на другом конце которой расположен противовес 3, позволяющий варьировать положение МБЛК. В свою очередь, платформа 2 закреплена к опорной раме 1.

Один из наиболее важных экспериментальных опытов заключается в оптимизации параметров регулятора, обеспечивающих стабилизацию МБЛК вблизи желаемого состояния зависания в пространстве. Эксперимент разделен на 4 этапа: I – взлет, II – траектория, III – зависание, IV – приземление. В соответствии с геометрическими характеристиками экспериментального стенда, максимальное пройденное расстояние МБЛК во время испытаний составляет около 2 метров. При этом, цикл выполнения опыта составляет 60 секунд. В целях валидации результатов цикл выполняется 2 раза.

Кроме того, при проведении экспериментального опыта учитываются следующие условия:

- Реальное начальное положение МБЛК составляет 0,85 м, а реальное конечное положение - 1,75 м относительно земли;
- Поворот МБЛК вокруг оси z на угол рыскания ψ ограничен.
- Диапазон изменения углов крена φ и тангажа θ ограничен $\pm$ 30 градусами;
- Желаемая ориентация МБЛК в пространстве относительно локальной системы координат, привязанной к трехосевому карданному шарниру составляет ноль градусов (состояние равновесия);
- Исключено воздействие внешних помехов.

При проведении опыта протестированы полученные в ходе виртуального моделирования значения параметров регулятора САУ МБЛК. Однако, эти параметры привели к нестабильному зависанию и неправильному позиционированию МБЛК. Экспериментальным образом, с учетом реальных характеристик электронных и электромеханических модулей улучшены параметры регулятора. В целях повышения безопасности испытательный стенд ограждается пластиковой сеткой (4.15).

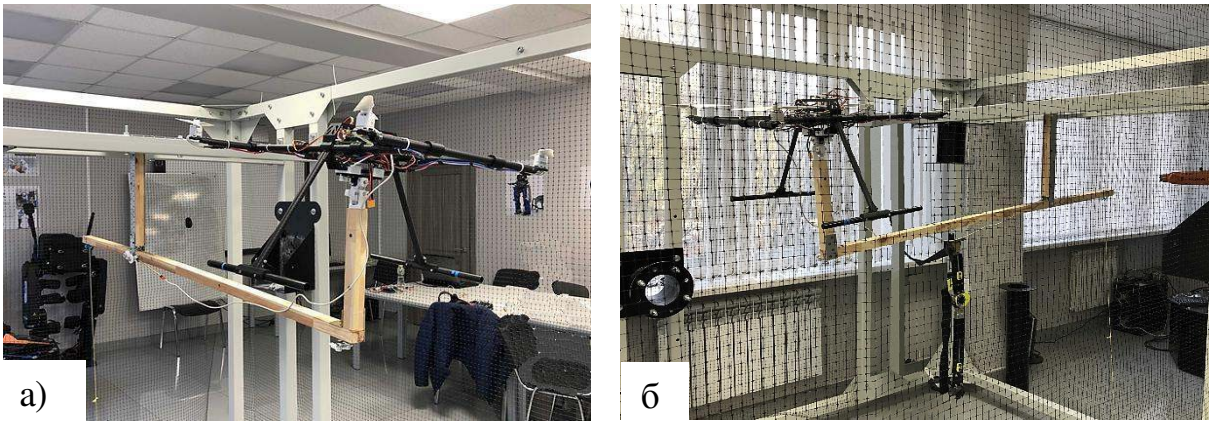


Рис.4.15. Установка МБЛК на испытательный стенд: а – закрепление МБЛК к опорной раме, б – ограждение по периметру испытательного стенда пластиковой сеткой

Основные результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных опытов представлены на рис. 4.16 – 4.19.

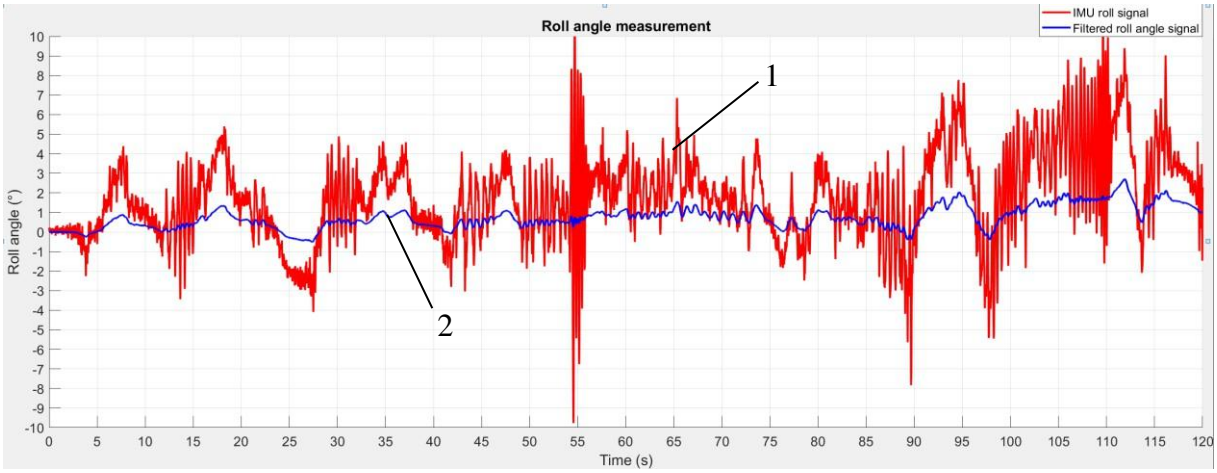


Рис.4.16. График зависимости от времени изменения угла крена: 1 - исходный сигнал, 2 – обработанный сигнал угла крена.

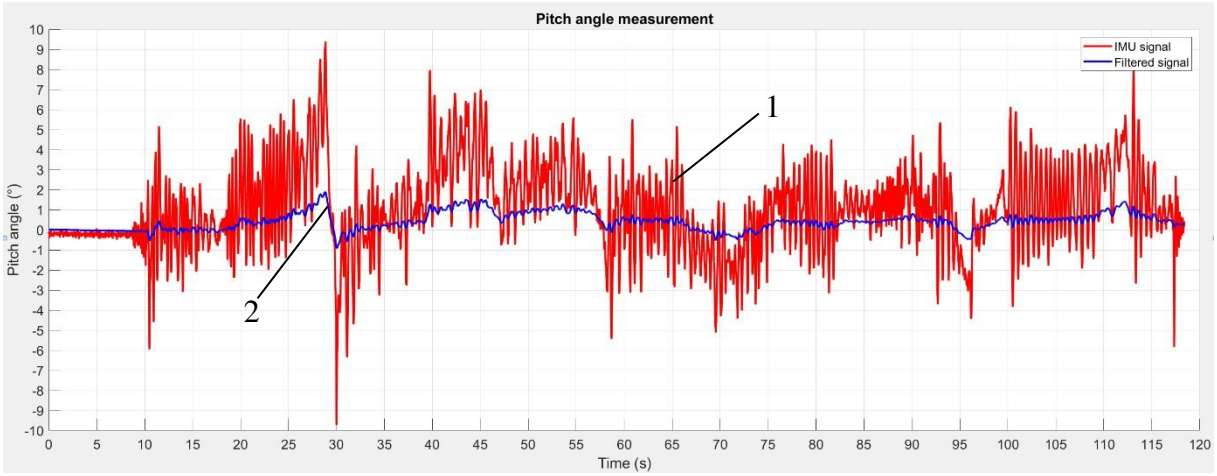


Рис.4.17. График зависимости от времени изменения угла тангажа: 1 - исходный сигнал, 2 – обработанный сигнал угла тангажа.

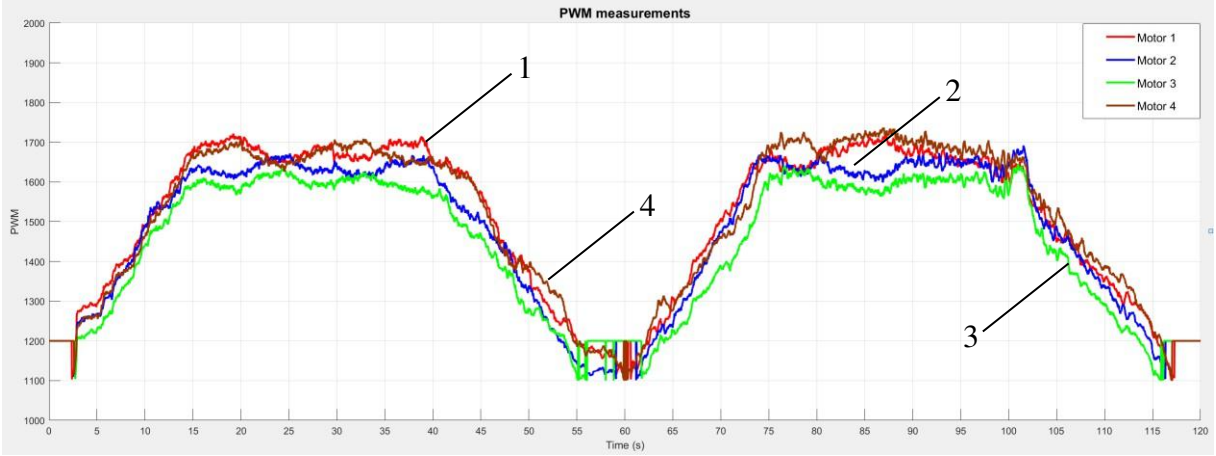


Рис.4.18. График зависимости от времени формирования ШИМ-сигналов, поступивших на электроприводы 1 – 4 соответственно.

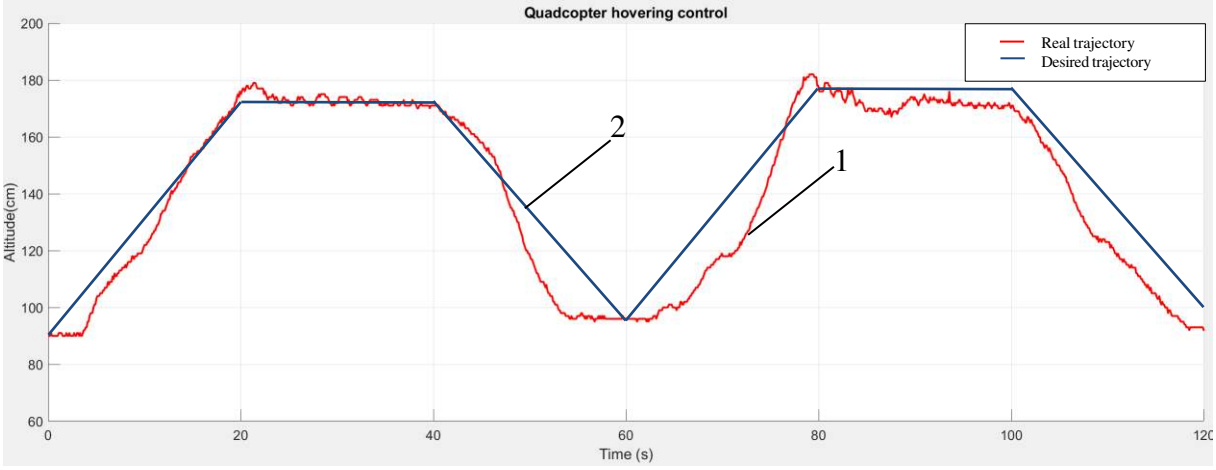


Рис.4.19. График зависимости от времени цикла движения МБЛК: 1 – отработанная траектория, 2 – желаемая траектория движения МБЛК.

Успешное выполнение в лабораторных условиях базовой настройки многоканального регулятора САУ МБЛК позволяет перейти к проведению безаварийных испытательных опытов в открытом пространстве. В качестве полигона для испытания работы МБЛК выбрана территория спортивного стадиона ЮЗГУ. Движение МБЛК происходит в автономном режиме по замкнутой траектории, приведенной на рис. 4.20.



Рис.4.20. Траекторное движение МБЛК на испытательном полигоне: 1 – заданная оператором траектория; 2 – фактическая траектория выполнена МБЛК

Испытательный полигон площадью 6153 м^2 состоит из 6 путевых точек, вокруг которых МБЛК производит круговое движение радиусом 3 м. Полет МБЛК осуществляется на высоте 15 м. При среднем значении угловой скорости винтомоторных групп 5276 об/мин, общее время выполнения траектории составляет 220 сек.

Кроме того, при выполнении экспериментального изучения движения МБЛК в открытом пространстве следует отметить наличие ветровой нагрузки, действующей по юго-восточному направлению со скоростью 0,5 м/с.

Результаты, представленные на рис. 4.21 носят сравнительный характер и отражают способность системы управления МБЛК обеспечить более устойчивые характеристики движения по заданной траектории благодаря применению гибридной архитектуры, состоящей из PID и MPC стратегий управления.

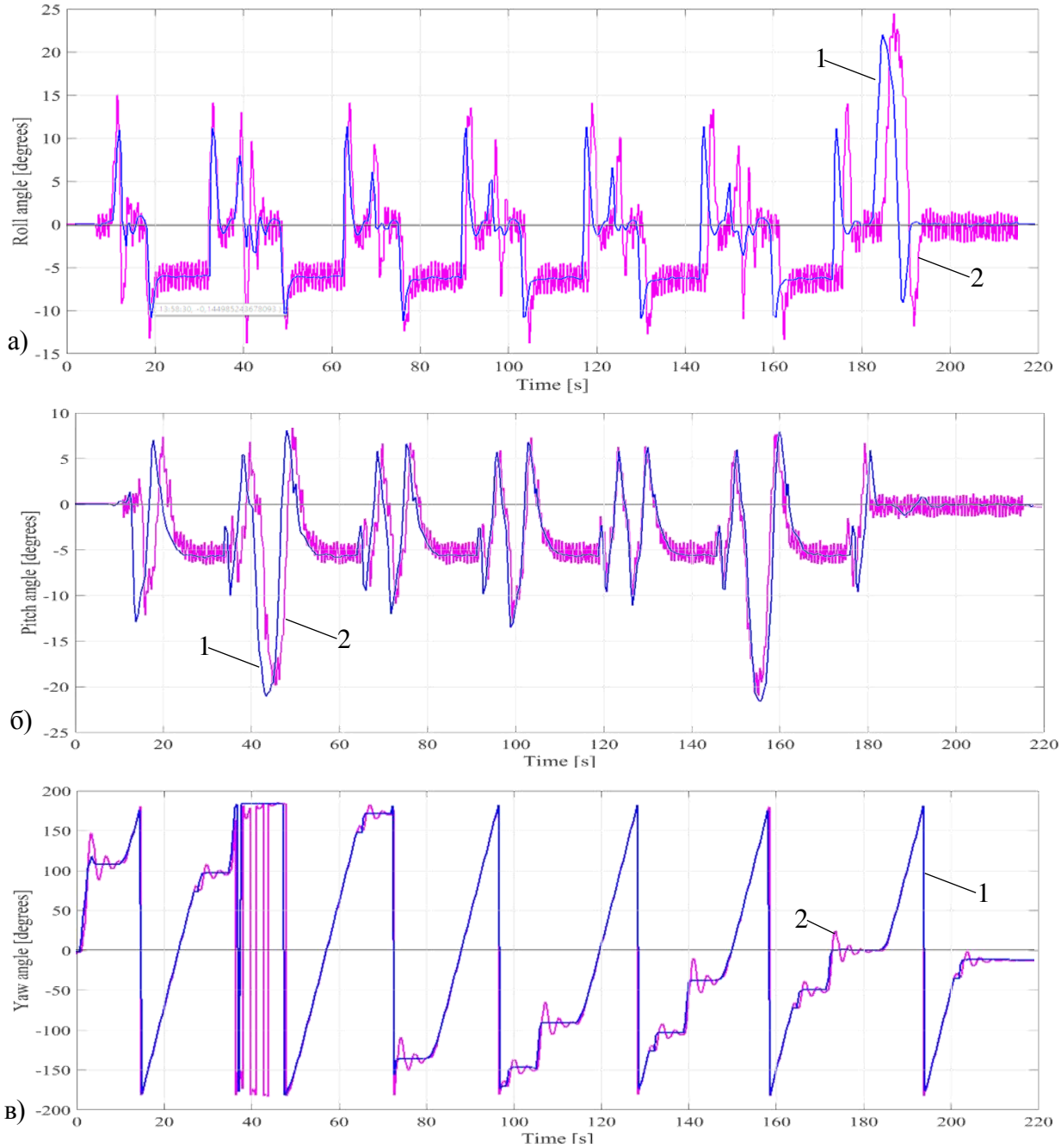


Рис.4.21. Графики изменения ориентации центра масс МБЛК: 1, 2 – исходный PID и оптимизированный MPC сигналы; а,б,в – отклонение МБЛК относительно осей *OX*, *OY* и *OZ* на самолетные углы φ,θ,ψ.

Из рис. 4.21 следует, что изменение значений самолетных углов варьируется в диапазонах: от -12° до +21° для крена, от -21° до +8° для тангажа и от -180° до +180° для рыскания. При этом, согласно рис. 4.22 значения управляющих ШИМ-сигналов, поступающих на винтомоторные группы, изменяются от 1680 до 1850 мс.

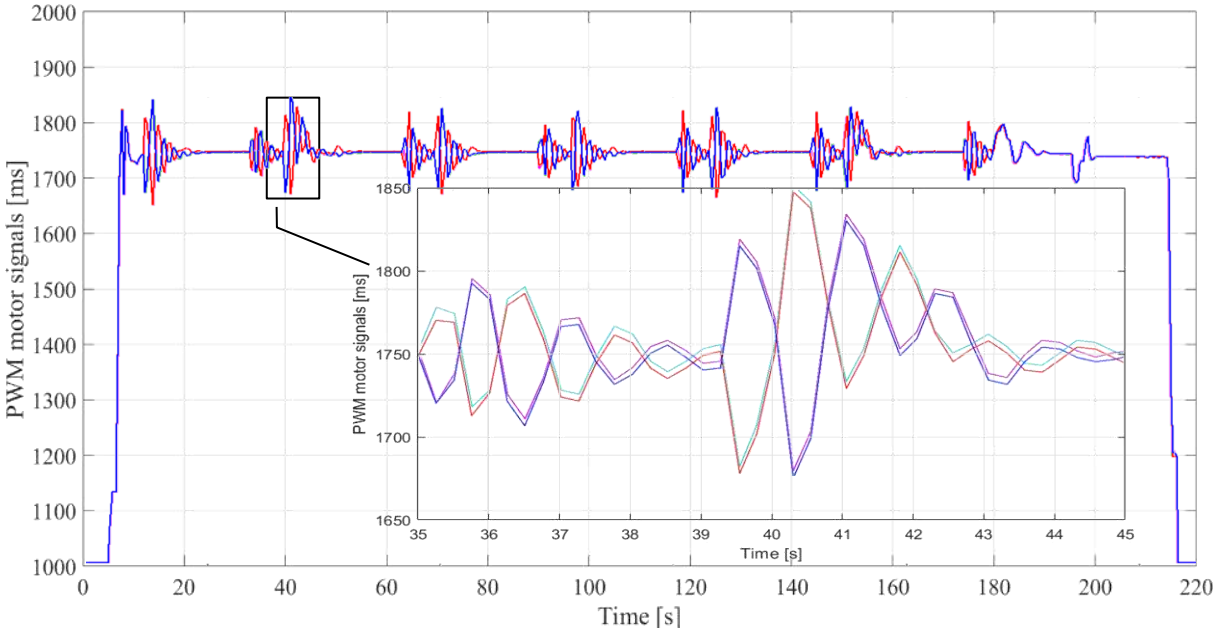


Рис.4.22. График изменения управляющих ШИМ-сигналов, поступающих на электроприводы

Согласно рис. 4.23 диапазон изменения линейных скоростей МБЛК находится в пределах: 4 м/с (проекция вдоль оси *OX*), 3 м/с (проекция вдоль оси *OY*) и 2 м/с (проекция вдоль оси *OZ*).

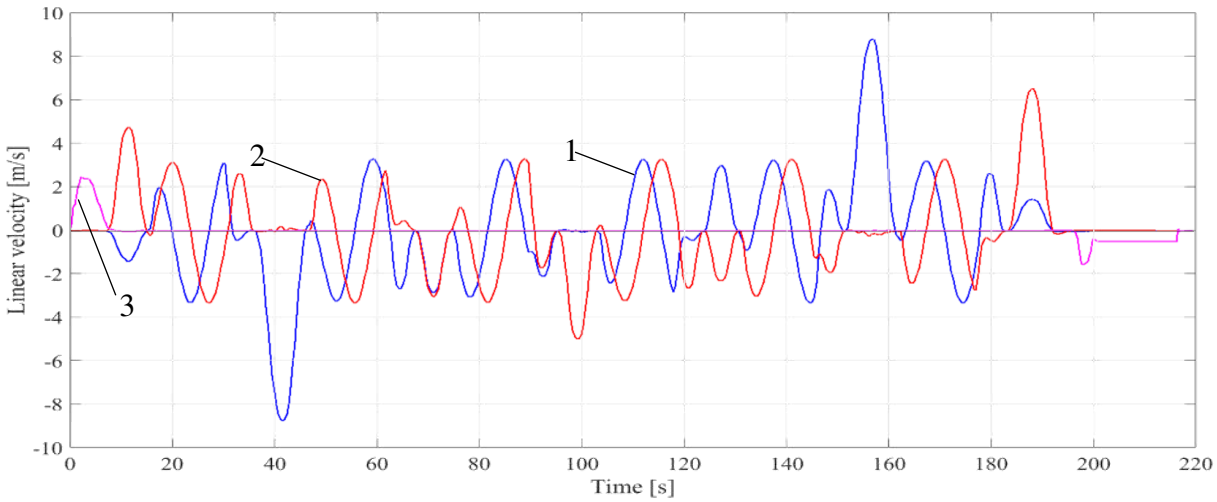


Рис.4.23. График изменения линейной скорости МБЛК: 1,2,3 – проекции линейной скорости вдоль осей *OX, OY, OZ* соответственно

На рис. 4.24 представлены результаты оценки точности позиционирования МБЛК вдоль заданной траектории. Применение гибридной архитектуры, состоящей из PID и MPC стратегий управления, позволяет уменьшить значения отклонений позиционирования центра масс МБЛК относительно заданной траектории до 0,5; 1,5; 0,1 м по осям *OX, OY, OZ* соответственно. Данные значения являются максимальными, за исключением пикового значения отклонения центра масс МБЛК по оси *OX* (3,45 м), вызванного разницей между соответствующими координатами центра *i-й* окружности и ближайшей точки начала выполнения геометрической фигуры.

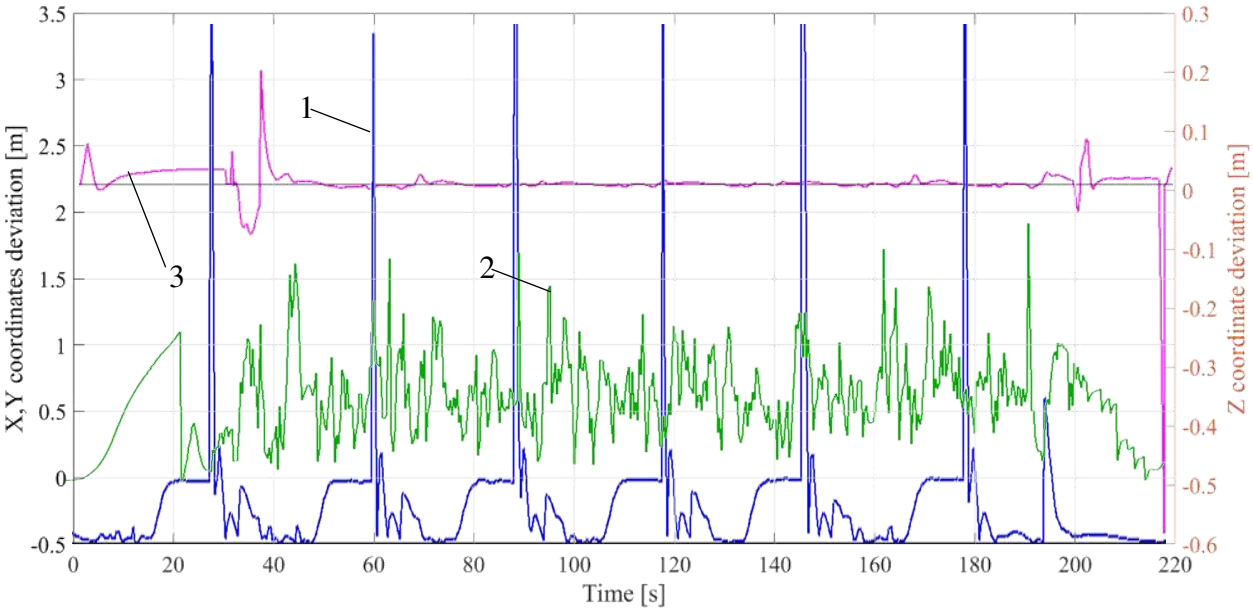


Рис. 4.24. График изменения значений отклонений позиционирования центра масс МБЛК: 1,2,3 – проекции отклонений центра масс относительно осей *OX, OY, OZ* соответственно

Проведение экспериментальных опытов тестирования прототипа, как в лабораторных условиях, так и в окрытом пространстве, позволило улучшить алгоритмы обработки данных информационно-измерительных модулей, а также провести полноценную настройку многоканального регулятора системы управления МБЛК, что положительно повлияло на обеспечение требуемых характеристик автономного полета в условиях изменяющихся внешнийх воздействий, как показано на рис. 4.16 – 4.24.

4.4. Экспериментальное изучение СМПТ

Малогабаритный беспилотный летательный аппарат, входящий в состав системы мониторинга прибрежных территорий, оснащен навесным оборудованием и аппаратно-программным комплексом, позволяющими реализовать задачи высокоточной посадки и распознавания водного транспорта посредством бортовой системы технического зрения.

Одним из наиболее важных этапов при выполнении МБЛК мониторинга вверенных оператором территорий заключается в обеспечении автоматической высокоточной посадки МБЛК в ограниченные пространства, которыми могут служить посадочные платформы, расположенные как на суще, так и на служебно-разъездных катерах; станции подзарядки или пункты временной дислокации. В силу того, что навигация МБЛК спутниковым GPS модулем характеризуется относительно большой погрешностью, задача точной посадки требует внедрения дополнительной системы локального позиционирования МБЛК, работа которой предложено реализовать на основе методов обработки визуальных данных (рис. 4.25). В работе применяется метод визуальной навигации МБЛК, использующий уникальные бинарные идентификационные маркеры класса ArUco [105, 108], которые позволяют позиционировать МБЛК в системе координат, связанной с центром маркера за счет обнаружения известных паттернов и анализа геометрических параметров, оказывающихся в поле видимости бортового видеоустройства (рис. 4.26).

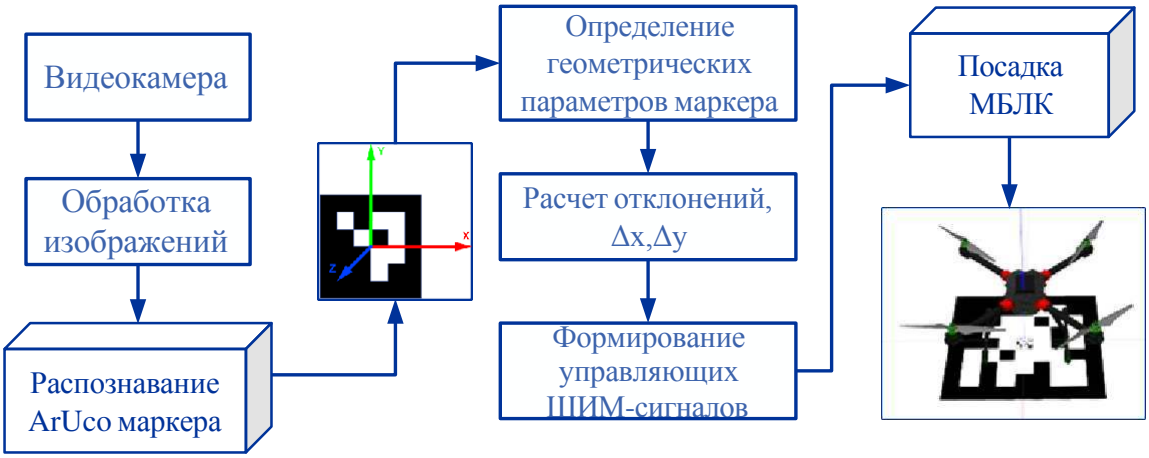


Рис. 4.25. Схема реализации задачи высокоточной посадки МБЛК

Методика проведения экспериментальных опытов осуществляется в соответствии с алгоритмом функционирования подсистемы «Посадка» СМПТ, представленным на рис. 4.13. В качестве аппаратного средства для получения визуальной информации используется RGB-D камера Intel Realsense D455, реализующая обработку потока изображений посредством использования библиотеки OpenCV, позволяющей проецировать трехмерную облаку точек на плоскость изображения с использованием преобразования перспективы на базе модели камеры с точечной диафрагмой [108, 109, 111].

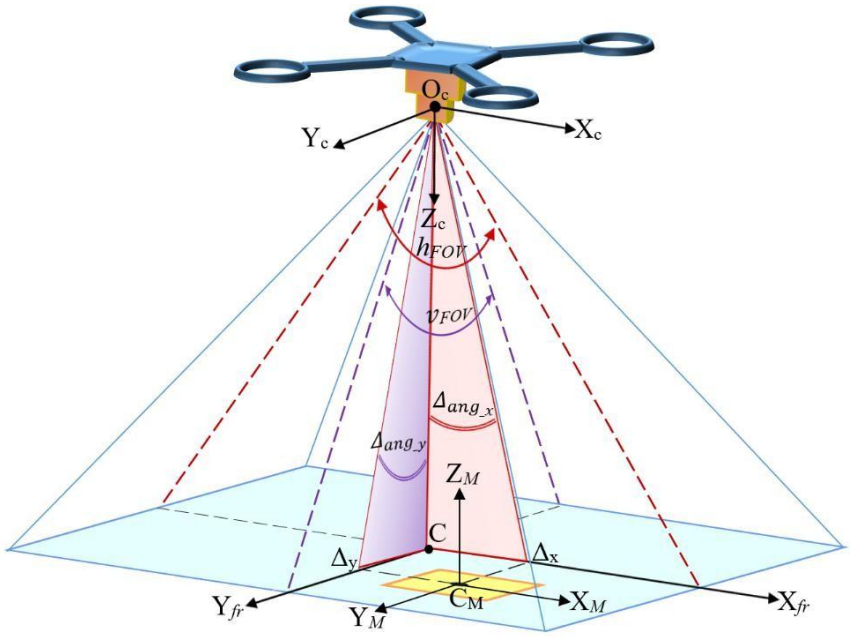


Рис. 4.26. Схема проецирования кадра изображения на плоскость: $O_cX_cY_cZ_c$, $C_MX_MY_MZ_M$, $CX_{fr}Y_{fr}$ – системы координат видеоустройства, ArUco маркера и кадра изображения; Δ_x, Δ_y – составляющие отклонения по осям; h_{FOV}, v_{FOV} – горизонтальное и вертикальное поля зрения видеоустройства, измеряемые в градусах; $\Delta_{ang_x}, \Delta_{ang_y}$ – корректирующие углы, способствующие совпадению геометрических центров кадра изображения и ArUco маркера

При этом, качество измерений и позиционирования МБЛК относительно идентификационного маркера зависит от точности калибровки видеоустройства, цель которой заключается в вычислении оптических параметров матрицы устройства и коэффициентов искажения. Процесс калибровки проводится с помощью черно-белой шахматной доски (рисунок 4.27а)

и встроенной функции *cv.calibrateCamera()* библиотеки OpenCV на базе микрокомпьютера Raspberry Pi [111, 112]. Кроме того, при программной реализации алгоритма распознавания маркеров учитываются такие параметры, как: разрешение (640x480 пк), горизонтальное (87^{o}) и вертикальное (58^{o}) поля зрения камеры RealSense D455. На рис. 4.27б представлен результат обнаружения маркера ArUco, содержащий информацию о положении и ориентации камеры относительно маркера и наоборот.

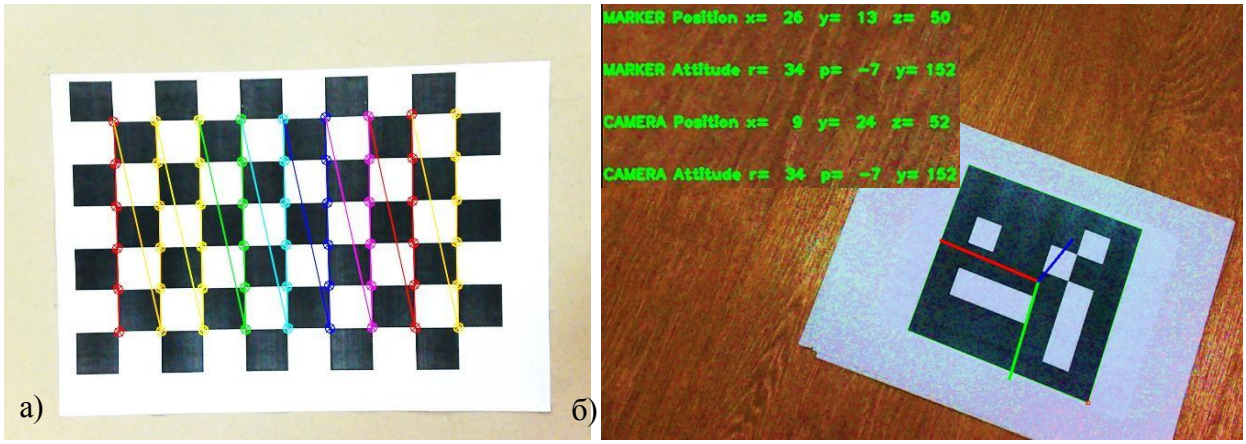


Рис.4.27. Результаты калибровки камеры: а – эталонный объект (шахматная доска, б – распознавание маркера класса ArUco

На рис.4.28. представлено поэтапное движение МБЛК в ходе выполнения автоматической посадки на основе системы визуальной навигации, встроенной в бортовую систему технического зрения.

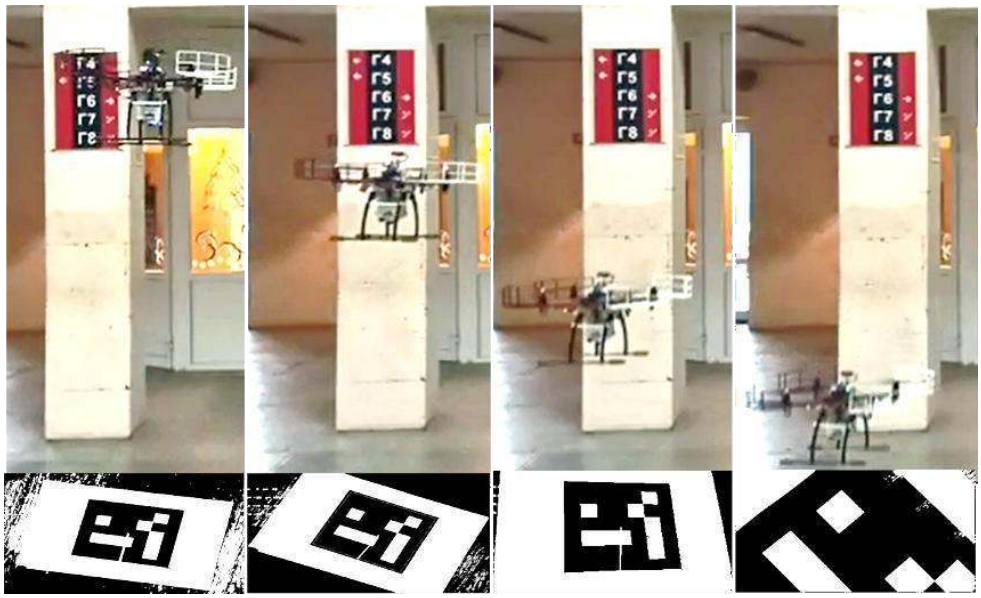


Рис. 4.28. Тестирование алгоритма высокоточной посадки МБЛК

Тестирование работы алгоритма высокоточной посадки МБЛК проводилось в помещении. Экспериментальный опыт состоит из следующих этапов: I – взлет, II – зависание, III – посадка. Основные условия выполнения эксперимента, следующие:

- средняя скорость набора высоты – 0,6 м/с;
- средняя скорость приземления – 0,3 м/с
- установленная высота зависания – 3 м;
- продолжительность зависания – 20 с;
- частота обработки изображения – 60 кад/с.

Основные результаты, отражающие эффективность выполнения высокоточной посадки МБЛК в автономном режиме представлены на рис. 4.29.

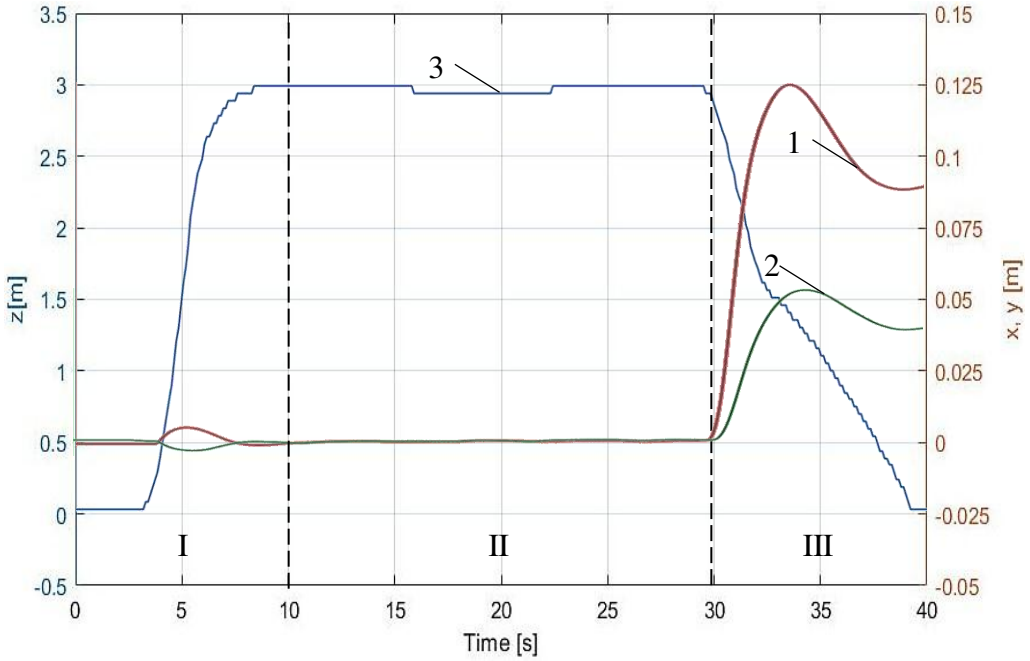


Рис.4.29. График изменения положения центра масс МБЛК относительно координат центра Aruco маркера: 1, 2, 3 – изменение положения центра масс МБЛК по осям *OX, OY, OZ* соответственно.

Проведенные экспериментальные исследования эффективности предложенного метода реализации системы точной посадки СМПТ показывают, что точность посадки МБЛК находится в диапазоне до 10 см. при

разрешении видеоустройства 640 х 480 пикселей. В соответствии с рис.4.29. значения отклонений положения центра масс МБЛК относительно координат Aruco маркера составляют 0,08; 0,048 м; 0,03 м.

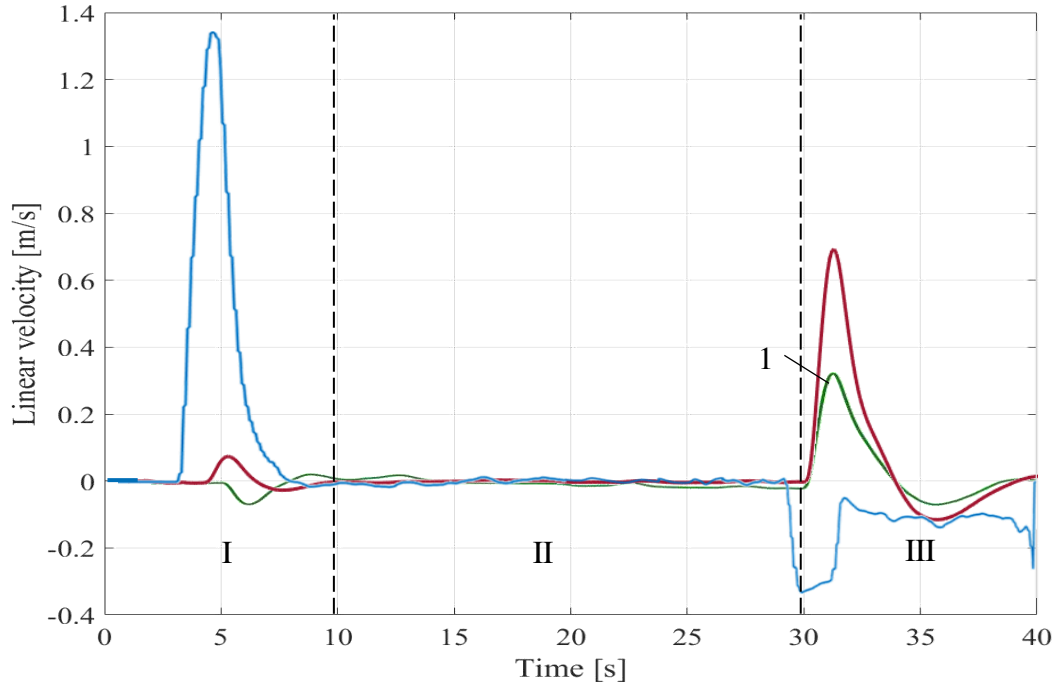


Рис.4.30. График изменения линейной скорости центра масс МБЛК: 1,2,3 – проекции линейной скорости вдоль осей *OX, OY, OZ* соответственно.

Алгоритм функционирования системы высокоточной посадки МБЛК выполняется в циклическом режиме. Обработка нового кадра изображения начинается только после завершения анализа предыдущего, вычисления координат и генерирования управляющих ШИМ-сигналов. Среднее время обработки одного кадра составляет 0,065 с. Таким образом, данный метод позволяет в реальном времени эффективно компенсировать постоянное смещение центра масс МБЛК относительно координат центра Aruco-маркера, даже в условиях незначительных изменений уровня освещенности. Кроме того, в ходе экспериментальных испытаний установлено, что система высокоточной посадки, несмотря на пиковые значения проекций линейной скорости МБЛК до 1,2 м/с, наибольшей эффективности работы предложенного метода достигается при значениях проекций скорости, не превышающих 0,5 м/с. (рис.4.30).

Распознавание и определение координат о местонахождении морских судов, выполняется в режиме реального времени бортовой СТЗ на базе априорных знаний, полученных посредством метода переносного обучения свёрточной нейронной сети класса YOLO на основе набора данных ShipRSImagaeNet [110] и пользовательского набора, состоящего из 2500 изображений, учитывающих такие факторы, как искажение, изменение высоты и вида съемки, отражение солнца или отсутствие освещения и др.

Набор данных ShipRSImagaeNet состоит из 17 573 изображений размером 930x930 пикселей в формате RGB, классифицированных в 50 категориях водных видов транспорта, и полученных с различных датчиков, спутниковых платформ, в разных географических районах и сезонах. Каждое изображение включает водные виды транспорта разных масштабов и ориентаций [113]. В рамках диссертационной работы особое внимание представляет класс «малогабаритная моторная лодка» (анг. motorboat).

Пользовательский набор данных дополняет базу ShipRSImagaeNet 2500 изображениями малогабаритных моторных лодок (рис. 4.31) размером 640 x 480 пикселей в формате RGB, снятых с высоты 30 – 100 м. в прибрежной зоне г. Манта на побережье Эквадора, в прилегающих районах к населенному пункту Сан Матео [114].

а)



б)



Рис. 4.31. Малогабаритная моторная лодка: а) вид сбоку, б) вид сверху

Бортовая система технического зрения СМПТ на базе априорных знаний, полученных посредством метода переносного обучения СНС на основе алгоритма YOLO версии v8n характеризуется способностью к быстрому и эффективному распознаванию объектов класса «малогабаритные моторные лодки» в режиме реального времени. На этапах переносного обучения, валидации и тестирования СНС применяются изображения из пользовательского набора данных в соотношениях 1750, 500 и 250 единиц, соответственно.

Кроме того, наиболее приемлемые настройки процесса обучения СНС достигаются при количестве эпох равен 100. Данный вывод обосновывается на результатах исследования качества процесса обучения СНС. Согласно характеру изменения функции потерь (англ. loss) для наборов, применяемых на этапах обучении и валидации (рисунок 4.32), отсутствуют признаки переобучения (англ. overfitting) или недообучения (англ. underfitting) [114, 115].

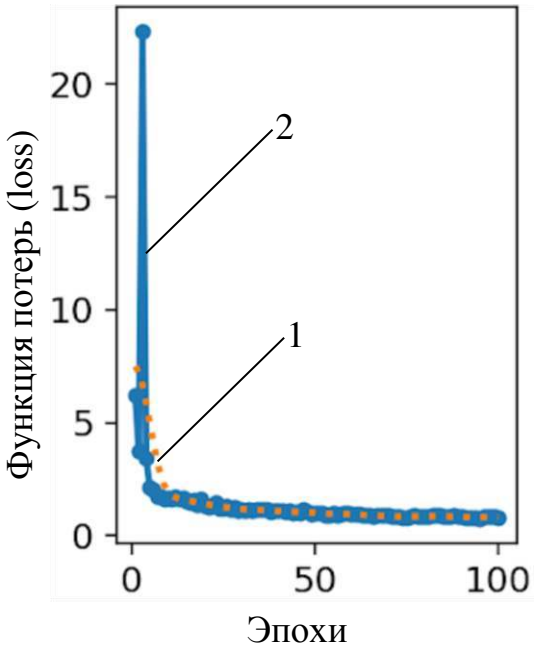


Рис. 4.32. График зависимости изменения функции потерь (минимизации ошибки обнаружения целей на изображении) относительно пройденных эпох: 1 – этап обучения, 2 – этап валидации модели.

Далее, анализ результатов производительности СМПТ при выполнении мониторинга малогабаритных моторных лодок включает в себя оценку точности, полноты обнаружения целей, и другие контрольные показатели (метрики) [114], которые удобно вычислить при помощи матрицы ошибок [116-118]. Применение данной матрицы позволяет интегрально оценить случаи верных положительных (TP), верных отрицательных (TN), ложных положительных (FP) и ложных отрицательных (FN) предсказаний, установленных моделью (рисунок 4.33).

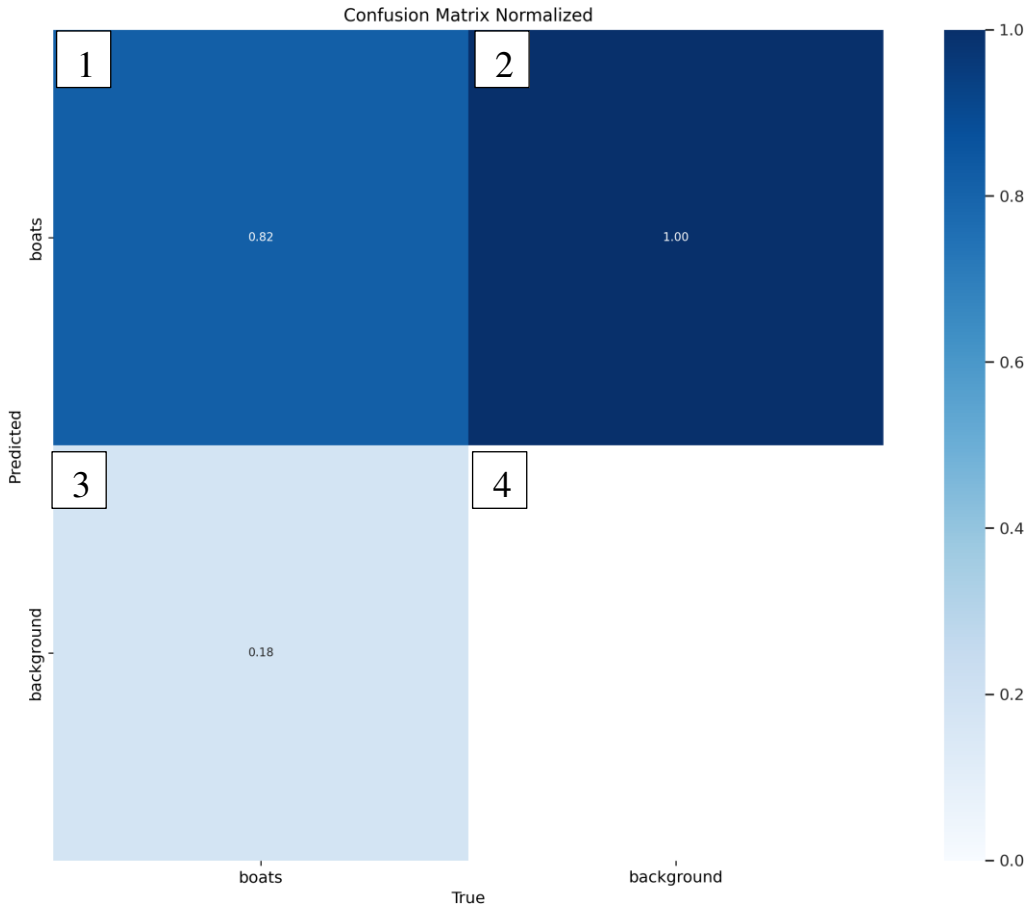


Рис. 4.33. Матрица ошибок для интегральной оценки эффективности модели: 1 – *TP*, 2- *TN*, 3 - *FP*, 4 - *FN*

Истинные положительные показатели (TP) представляют случаи, когда модель правильно предсказывает наличие малогабаритной моторной лодки, а истинные отрицательные (TN) – случаи, когда модель правильно предсказывает его отсутствие. Ложные положительные показатели (FP)

отображают случаи, когда модель ошибочно предсказывает наличие искомого объекта, когда его нет, а ложные отрицательные (FN) – случаи, когда модель неправильно предсказывает отсутствие малогабаритной моторной лодки, когда она есть.

Основываясь на значениях, полученных в матрице ошибки можно вычислить различные контрольные показатели, как точность обнаружения моторных лодок на изображениях (англ. precision), в соответствии с выражением [115, 118]:

$$\text{Точность} = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{0{,}82}{0{,}82 + 0{,}18} = 0{,}82 \qquad (4.1)$$

На рис. 4.34 представлена динамика изменения точности обнаружения СНС целей класса «малогабаритная моторная лодка» в диапазоне до 100 эпох. График отражает долю истинных положительных срабатываний среди предсказанных результатов. Установившиеся значение точности составляет 0,82 (82%) и соответствует аналитическим расчетам, выполненным согласно выражению 4.1.

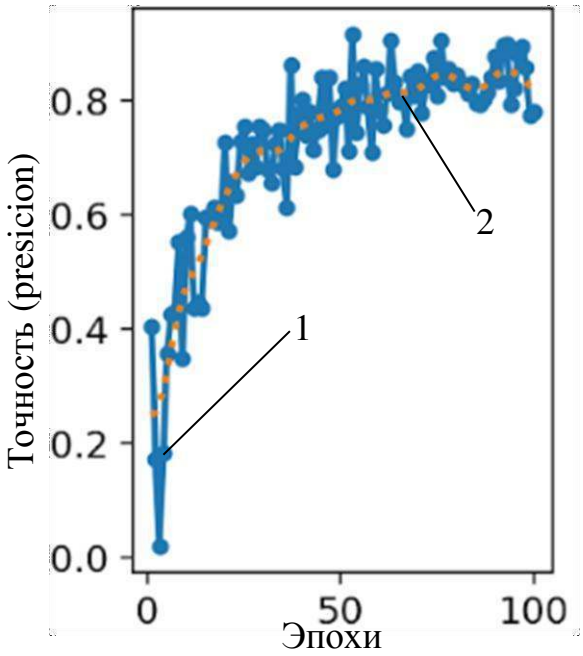


Рис. 4.34. График изменения точности обнаружения целей класса «моторная лодка» в зависимости от пройденных эпох обучения: 1 – этап обучения, 2 – этап валидации модели



Рис.4.35. Результаты обнаружения СМПТ водного транспорта

На рис. 4.35. представлены основные результаты, полученные в ходе результата обучения СНС. Согласно результатам, точность распознавания зависит от количества предметов на кадре изображения. Это связано с тем, что алгоритм YOLO производит предсказания ограниченного числа объектов в пределах фиксированного количества ячеек сетки, на которую разбивается изображение, что приводит к ошибкам локализации, пропускам объектов и снижению показателей производительности системы технического зрения.

Кроме того, выявлено, что среднее значение точности распознавания составляет 82% в зависимости от качества, вида и занимаемой площади малогабаритной моторной лодки на кадре изображения. Однако, при распознавании до 3 объектов на изображении точность достигает 78–82%, а при увеличении числа от 5 до 10 моторных лодок – показатель падает до 60–65 %. При увеличении числа моторных лодок до 15 и более, точность распознания системы может опуститься до уровня ниже 50%.

Следует отметить, что применение метода переносного обучения СНС при проведении экспериментальных исследований по распознаванию моторных лодок на борту МБЛК на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 4 ускоряет процесс распознавания водного транспорта на 15–20% при использовании алгоритма YOLO версии v8n. При дальнейшей разработке рекомендуется предусматривать использование микрокомпьютера Nvidia Jetson Nano, способного задействовать встроенное GPU-ускорение на базе архитектуры CUDA, что дает существенный прирост по вычислительной производительности. При проведении экспериментальных исследований применение данного микрокомпьютера позволило повысить эффективность обработки видеопотока, достигая скорости до 30 кадров в секунду при точности распознавания малогабаритных моторных лодок в пределах 75–80%. Это демонстрирует значительное преимущество по сравнению с микрокомпьютером Raspberry Pi 4, где точность распознавания составляет всего 55–60% при аналогичных условиях обработки потока изображений в реальном времени на борту МБЛК.

4.5. Экспериментальная оценка показателей качества мониторинга прибрежных территорий

В рамках диссертационной работы задача мониторинга прибрежных территорий заключается в наблюдении за передвижением малогабаритных моторных лодок для раннего выявления и предотвращения потенциальных противоправных действий.

С учетом проведенного обзора методов мониторинга (п.п.1.1.), вышеупомянутая задача может быть реализована традиционным и дистанционным способами. В этой связи, при проведении экспериментальной оценки показателей качества мониторинга малогабаритных моторных лодок, находящихся в прибрежных территориях и их окрестностях, были учтены следующие технологические решения (методы): 1 - Стационарные пункты охраны (СПО), оснащенные персоналом, разъездными катерами, системами наблюдения и связи; 2 – Спутниковая система (СС), состоящая из роя наноспутников и наземной станции приема и обработки информации; 3 – Малогабаритный летательный комплекс (МБЛК), представляющий собой летательную лабораторию, снабженную бортовыми аппаратно-программными модулями.

Основные характеристики малогабаритного летательного комплекса МБЛК (рисунок 4.36) приведены в табл.4.7.

Табл. 4.7.
Характеристики МБЛК

Габариты (длина х высота х ширина)	450 х 450 х 50 мм
Вес конструкции	2,5 кг.
Предельная крейсерская скорость	10 м/с
Предельная скорость ветровых возмущений	5 м/с
Средняя скорость набора высоты	3 м/с
Средняя скорость автономной посадки	0,5 м/с
Максимальная длительность работы	до 60 мин



Рис. 4.36 Общий вид прототипа МБЛК

Процедура экспериментальной оценки показателей качества мониторинга прибрежных территорий основывается на результатах технического анализа, степени апробирования экспериментальных испытаний, сравнивания с существующими технологическими решениями, а также заключений экспертов (специалистов, исследователей, инженеров испытательных бригад) [119-120]. С учетом этого выделяются 11 основных критериев оценки эффективности мониторинга прибрежных территорий, релевантность которых оценивается в диапазоне от 0 до 10 баллов. В табл. 4.8. приведены результаты экспериментальных исследований на основе многокритериального анализа показателей качества СМПТ с применением МБЛК.

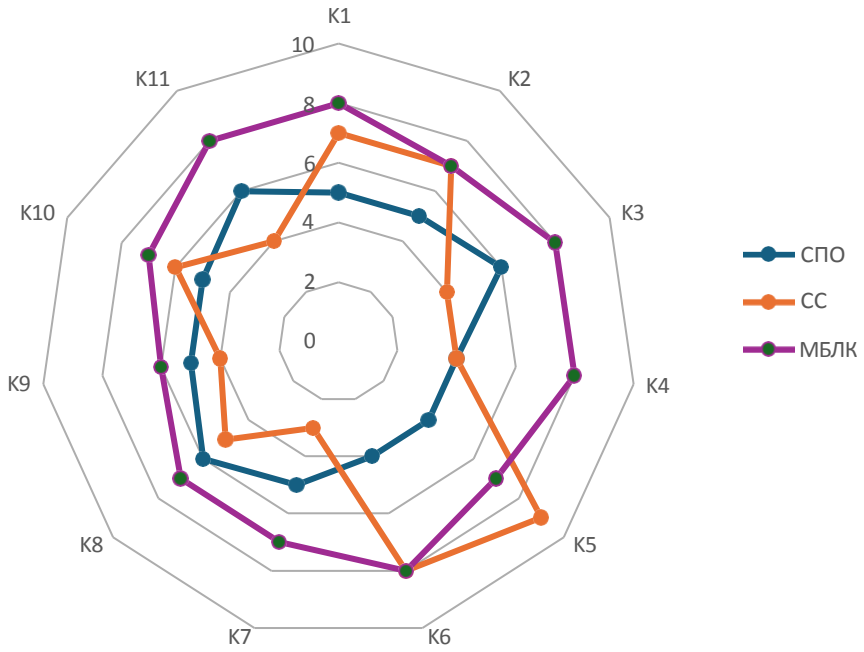
Таблица 4.8

Критерии качества МБЛК для мониторинга прибрежных территорий и их релевантность

№ п/п	**Критерии оценки эффективности применения МБЛК**	**Релевантность K_p^i экспертов**	**Нормированная релевантности K_p^i/K_p^{max}**
$К_1$	Достоверность определения наземных целей (моторных лодок)	8	1,000

$К_2$	Критичность к рельефу прибрежных территорий	7	0,875
$К_3$	Периодичность проведения мониторинга	8	1,000
$К_4$	Скорость передачи данных на наземную станцию управления	8	1,000
$К_5$	Площадь покрываемой территорий мониторинга	7	0,778
$К_6$	Снижение риска для персонала	8	1,000
$К_7$	Стоимость эксплуатации технологий	7	0,875
$К_8$	Номенклатура контролируемых параметров среды	7	0,875
$К_9$	Критичность к скорости ветра	6	0,857
$К_{10}$	Интеграция с системами автоматизированного контроля	7	0,875
$К_{11}$	Требования к подготовке кадров	8	1,000

На рис. 4.37 приведена диаграмма сопоставления показателей качества мониторинга прибрежных территорий ранее описанных методов: 1 – Стационарные пункты охраны (СПО); 2 – Спутниковая система (СС); 3 – Малогабаритный летательный комплекс (МБЛК).



.

Рис. 4.37. Диаграмма сопоставления экспертной оценки показателей качества мониторинга прибрежных территорий на основе исследуемых методов

Кроме того, интегральный критерий оценки качества мониторинга прибрежных территорий I_j исследуемыми методами основывается на заключениях экспертов и определяется следующим выражением:

$$I_j = \sum_{i=1}^{10} \frac{K_P^i}{K_p^{max}} \cdot \eta_{ij} \qquad (4.1)$$

где, j – метод мониторинга (СПО, СС, МБЛК); $0{,}5 < \eta_{ij} \leq 1$ – коэффициент компетентности экспертов; K_P^i, K_p^{max} – среднее и максимальное значения релевантности *i-го* критерия, зарегистрированные экспертами.

Результаты анализа динамики изменения интегрального критерия I_j в зависимости от метода мониторинга прибрежных территорий представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Интегральный критерий экспертной оценки показателей качества мониторинга прибрежных территорий:

Интегральный критерий	**Стационарные пункты охраны (СПО)**	**Спутниковая система (СС)**	**МБЛК**
I_j	0,46	0,66	0,87

В соответствии с данными, приведенными в табл. 4.9., значение интегрального критерия I_j варьируется в диапазоне от 0 (минимальное значение) до 1 (максимальное значение). Результаты анализа показывают, что интегральный критерий экспертной оценки качества мониторинга прибрежных территорий на основе МБЛК (0,87) превышает аналогичный критерий, полученный СПО (0,66) и СС (0,46) в 1,8 и 1,3 раза соответственно. Следует отметить, что информация соответствует коэффициенту компетентности экспертов, равному 0,9 единицы. Таким образом, применение МБЛК в качестве средства мониторинга передвижения водного транспорта в прибрежных территориях и их окрестности оказывается наиболее эффективным методом.

Выводы по четвертой главе

На основе проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Проведено описание аппаратно-программной архитектуры СМПТ, а также алгоритмов функционирования МБЛК в автономном режиме управления с целью проведения мониторинга водного транспорта в прибрежных территориях и их окрестностях.

2. Разработана методика экспериментального изучения движения МБЛК, основанная на теоретических исследованиях и реализованная как в контролируемых лабораторных условиях, так и в открытом пространстве.

3. Проведено экспериментальное изучение задачи высокоточной посадки МБЛК, реализуемой методом визуального распознавания идентификационных маркеров класса ArUco. Показано, что точность посадки МБЛК находится в диапазоне до 10 см при разрешении видеоустройства 640 х 480 и скорости движения, не превышающей 0,5 м/с.

4. Проведено экспериментальное изучение задачи обнаружения водного транспорта системой технического зрения СМПТ. Выявлено, что применение переносного обучения СНС YOLO версии v8n позволяет ускорить процесс распознавания малогабаритных моторных лодок в реальном времени на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 4 на 15–20 % при скорости обработки изображений до 15 кадров в секунду. Среднее значение точности распознавания составляет 82 % в зависимости от качества, вида и занимаемой площади в кадре изображения.

5. Проведены экспериментальные исследования оценки показателей качества мониторинга прибрежных территорий различными методами. Разработан метод экспертной оценки и интегральный критерий качества процесса мониторинга. Применение МБЛК оказывается наиболее эффективным методом мониторинга водного транспорта, интегральный критерий которого превышает полученные результаты СПО и СС в 1,8 и 1,3 раза соответственно.

Заключение

В диссертационной работе решена научно-техническая задача и получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана структура системы мониторинга прибрежных территорий роботизированного типа, включающая малогабаритный беспилотный летательный комплекс с комбинированным управлением, позволяющая осуществлять систематическое наблюдение водного транспорта в заданных путевых точках.

2. Разработан метод модульного планирования траектории движения МБЛК в виде кусочно-линейных отрезков, позволяющий обеспечить быстродействие процесса пространственного зондирования вверенных оператором территорий.

3. Разработаны математические модели и алгоритмы управления движением МБЛК по заданной траектории при действии неопределенных внешних возмущающих воздействий детерминированного и случайного характера, построенные на методе разложения движения на заданное и возмущенное корректирующее управление, позволяющие обеспечить движение МБЛК.

4. Разработан метод синтеза многоканального регулятора, позволяющий определить структуру и параметры регулятора, образующего вектор выходных управляющих воздействий в соответствии с установленным алгоритмом управления движением МБЛК.

5. Разработана структурная схема системы управления МБПК каскадного типа, основанная на использовании PID регулятора реализующая модульную стратегию планирования, позволяющая определять ориентацию и отклонение МБЛК относительно заданной траектории. Структурная схема системы управления дополняется использованием стратегии с прогнозирующей моделью (MPC) для обеспечения робастного управления и увеличения точности позиционирования МБЛК по заранее заданной оператором траектории.

6. Разработана многоуровневая аппаратно-программная архитектура системы мониторинга прибрежных территорий, позволяющая обеспечить автономное движение МБЛК, а также реализовать мобильную систему технического зрения для обнаружения и слежения в реальном времени за объектами морского транспорта методами визуального распознавания идентификационных маркеров класса ArUco и переносного обучения одноэтапной СНС класса YOLO соответственно.

7. Проведены экспериментальные исследования оценки показателей качества мониторинга прибрежных территорий различными методами. Разработан метод экспертной оценки и интегральный критерий качества процесса мониторинга. Применение МБЛК оказывается наиболее эффективным методом мониторинга водного транспорта, интегральный критерий которого превышает полученные результаты СПО и СС в 1,8 и 1,3 раза соответственно.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для решения задач модернизации и повышения качества системы мониторинга прибрежных территорий.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработка современной системы оценки и контроля передвижения морского транспорта в целях обеспечения безопасности прибрежных территорий Республики Эквадор.

Список литературы

1. Куркина Л. А., Вялова Е. П. Нормативно-правовое регулирование государственного мониторинга окружающей среды// Комплексные проблемы техносферной безопасности. Актуальные вопросы безопасности при формировании культуры безопасной жизни. – 2018. – С. 89-92.
2. Храмов А. В. и др. Возможности экологического мониторинга с применением БПЛА в России //Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ. – 2017. – №. 7. – С. 79-84.
3. Manfreda S. et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring //Remote sensing. – 2018. – Т. 10. – №. 4. – С. 641.
4. Митин М. Д., Никольский Д. Б. Современные тенденции развития отрасли беспилотных летательных аппаратов //Геоматика. –2013. – №. 4. – С. 27-31.
5. Лучников А. И., Ляхин Ю. С., Лепихин А. П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – №. 1. – С. 37-46.
6. Tmušić G. et al. Current practices in UAS-based environmental monitoring //Remote Sensing. – 2020. – Т. 12. – №. 6. – С. 1001.
7. Bauk S. et al. Advantages and disadvantages of some unmanned aerial vehicles deployed in maritime surveillance //Maritime Transport VIII: Proceedings of the 8th International Conference on Maritime Transport: Technology, Innovation and Research: Maritime Transport'20. – Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques, 2020. – С. 91.
8. Montoya P. B., Briones R. V. Empleo de los UAV, en operaciones de seguridad y vigilancia en las áreas estratégicas en el Ecuador //Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa. – 2019. – Т. 4. – №. 4. – С. 15-15.
9. Панамарева О. Н. Беспилотные летательные аппараты: их особенности и перспективы использования в контексте обеспечения национальной безопасности и развития морского транспорта России //Модернизация и

устойчивое социально-экономическое развитие России и ее регионов в XXI веке сквозь призму роста производительности труда. – 2020. – С. 435-450.

10. Octavian A., Jatmiko W. Designing intelligent coastal surveillance based on big maritime data //2020 International Workshop on Big Data and Information Security (IWBIS). – IEEE, 2020. – С. 1-8.
11. Спорышев М. С., Щербатюк А. Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор //Подводные исследования и робототехника. – 2018. – №. 2. – С. 21-27.
12. Воздушный мониторинг [электронный ресурс]- URL: https://ascam.aero/vozdushnyiy-monitoring/ - свободный.
13. Guerrero C. D. O. Increase of Aircraft Operations for Deterrence and Combat of Illicit Activities in the South Maritime Area//Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa. – 2021. – Т. 6. – №. 3. – С. 19-19.
14. Avilés Bastidas A. K., Sánchez Jordán G. L., Villao Quezada F. W. Monitoring system of artisanal fishing boats of Anconcito, Santa Elena province, Ecuador, using AIS technology - Automatic Identification System – 2017.
15. Adade R. et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) applications in coastal zone management—a review //Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Т. 193. – №. 3. – С. 1-12.
16. Богородицкая С. И., Помыткина О. Н., Помыткин А. А. Аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата как современный перспективный способ дистанционного зондирования //V Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 54-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос (9–10 апреля 2015 года): сборник. – 2015. – С. 126.
17. Айтмагамбетов А. З. и др. Определение местонахождения малых воздушных судов при авариях и катастрофах с использованием спутниковых систем //T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2019. – Т. 13. – №. 8. – С. 36-41.

18. Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Мониторинг судов на трассах северного морского пути с помощью спутниковых систем связи //Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО Макарова. – 2016. – №. 6 (40). – С. 184-205.
19. Сидоров С. А., Травкин С. Л., Сахно В. П. Российский и зарубежный опыт охраны морских биологических ресурсов //Право и государство: теория и практика. – 2020. – №. 1 (181). – С. 32-34.
20. Dadkhah N., Mettler B. Survey of motion planning literature in the presence of uncertainty: Considerations for UAV guidance //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Т. 65. – №. 1. – С. 233-246.
21. Ингабире А. Прикладные методы синергетического синтеза систем управления беспилотными летательными аппаратами с жестким крылом: Дис. … кад. тех. наук: 2.3.1 / А. Ингабире. – Таганрог, 2021. – 252 с.
22. Яцун С. Ф. и др. Адаптивное управление нелинейным объектом типа конвертоплан в условиях неопределенностей //Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т. 24. – №. 3. – С. 35-50.
23. Ковалёв М. А. и др. Математическая модель ветра при движении беспилотного летательного аппарата по заданной траектории //Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации.– 2018. – С. 57-61.
24. Амелин К. С. и др. Повышение точности следования БПЛА по заданной траектории при ветровых нагрузках методом SPSA //Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9. – №. 4. – С. 260-270.
25. Yang Y. et al. Model-Free Integrated Navigation of Small Fixed-Wing UAVs Full State Estimation in Wind Disturbance //IEEE Sensors Journal. – 2022. – Т. 22. – №. 3. – С. 2771-2781.
26. Schiano F. et al. Towards estimation and correction of wind effects on a quadrotor UAV //IMAV 2014: International Micro Air Vehicle Conference and Competition 2014. – International Micro Air Vehicle Conference and Competition 2014 (IMAV 2014), 2014. – С. 134-141.

27. De Simone M. C. et al. Multibody model of a UAV in presence of wind fields //2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO). – IEEE, 2017. – С. 83-88.
28. Gálvez H., Regalado J. Características de las precipitaciones, la temperatura del aire y los vientos en la costa ecuatoriana. – 2007.
29. Kim J., Gadsden S. A., Wilkerson S. A. A comprehensive survey of control strategies for autonomous quadrotors //Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2019. – Т. 43. – №. 1. – С. 3-16.
30. Verberne J. Development of Robust Control Laws for Disturbance Rejection in Rotorcraft UAVs. – 2019.
31. Журавлёв Д. О., Наинг З. Х. Эволюция систем управления беспилотных летательных аппаратов: от появления до наших дней // Научно-издательский центр «Мир науки». – 2017.
32. Сыров А. С. и др. Задачи управления движением многорежимных беспилотных летательных аппаратов //Проблемы управления. – 2014. – №. 4. – С. 45-52.
33. Яковлев К. С., Петров А. В., Хитьков В. В. Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами //Информационные технологии и вычислительные системы. – 2013. – №. 3. – С. 72-83.
34. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами //Казань: ГБУ РЦМКО. – 2013.
35. Биард Р. У., МакЛэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – 2015.
36. Mo H., Farid G. Nonlinear and adaptive intelligent control techniques for quadrotor uav–a survey //Asian Journal of Control. – 2019. – Т. 21. – №. 2. – С. 989-1008.
37. Самышева Е. Ю. Стабилизация бокового движения летательного аппарата при возмущениях //Вестник Технологического университета. – 2019. – Т. 22. – №. 9. – С. 137-142.

38. Ахрамович С. А. и др. Синтез системы управления беспилотного летательного аппарата по высоте методом бэкстеппинга //Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – №. 2. – С. 7-22.
39. Романов П. С., Романова И. П. Подходы к созданию интеллектуальной системы управления мобильным роботом //Инженерный вестник Дона. – 2018. – №. 1 (48). – С. 55.
40. Abdelmaksoud S. I., Mailah M., Abdallah A. M. Control strategies and novel techniques for autonomous rotorcraft unmanned aerial vehicles: A review //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 195142-195169.
41. Shraim H., Awada A., Youness R. A survey on quadrotors: Configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2018. – Т. 33. – №. 7. – С. 14-33.
42. Мехатроника и робототехника: моделирование и управление мультироторными летающими роботами: учебное пособие / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, О.В. Емельянова, Г.В. Климов; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – 127 с.
43. Prach A., Kayacan E. An MPC-based position controller for a tilt-rotor tricopter VTOL UAV //Optimal control applications and methods. – 2018. – Т. 39. – №. 1. – С. 343-356.,
44. Amadi C. A. et al. Design and implementation of a model predictive control on a Pixhawk flight controller : дис. – Stellenbosch: Stellenbosch University, 2018.
45. Ступницкий П. П., Валиева С. П. Система управления следования по пути с прогнозирующими моделями //XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – 2019. – С. 133-138.
46. García Rivero A. Desarrollo de un sistema de detección de objetivos marítimos con redes neuronales de una única etapa. – 2020.
47. Alejandro Rodríguez K. P., Yagual Mite M. M. Modelo de un sistema de videovigilancia orientado a la seguridad de embarcaciones de pesca artesanal

aplicando algoritmos en Machine learning en el balneario de Ballenita, Prov. de Santa Elena : дис. – Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales., 2021.

48. Чорбаа Н. А., Ту Л. А., Толстой И. М. Сравнительный анализ методов детектирования объектов на радиолокационных изображениях при помощи нейронных сетей //Научный результат. Информационные технологии. – 2020. – Т. 5. – №. 4. – С. 15-25.
49. Фахми Ш. С. и др. Видеосистема наблюдения за морскими судами в реальном времени //Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 1. – №. 2. – С. 98-105.
50. Стариченков А. Л. Сравнительная оценка современных интеллектуальных систем управления в задачах обработки навигационной информации //Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – С. 160.
51. Montaño-Serrano V. M. et al. Artificial Vision Algorithms for Socially Assistive Robot Applications: A Review of the Literature //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 17. – С. 5728.
52. Орлов А. А., Рыжкова М. Н., Мареев А. В. Методы локализации объектов в видеопотоке (обзор) //Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – №. 3. – С. 48-60.
53. Зотов С. С., Яковлев А. А., Колчинцев Д. А. Обнаружение объектов в реальном времени с помощью алгоритмов распознавания YOLO //Синергия Наук. – 2018. – №. 26. – С. 388-404.
54. Ерохин Д. Ю., Ершов М. Д. Современные сверточные нейронные сети для обнаружения и распознавания объектов //Цифровая обработка сигналов. – 2018. – №. 3. – С. 64-69.
55. Береснев А. П., Зоев И. В., Марков Н. Г. Исследование свёрточных нейронных сетей класса YOLO для мобильных систем детектирования объектов на изображениях //Труды Международной конференции по компьютерной графики и зрению" Графикон". – Федеральное

государственное учреждение" Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. МВ Келдыша Российской академии наук", 2018. – №. 28. – С. 196.

56. Бикмаев Р. Р., Садеков Р. Н. Особенности применения свёрточных нейронных сетей в задаче распознавания морских надводных объектов //Известия Института инженерной физики. – 2019. – №. 4. – С. 105-110.
57. Ведякова А. О. Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей //International Journal of Open Information Technologies. – 2014. – Т. 2. – №. 3. – С. 18-22.
58. Бондаренко В. А. и др. Алгоритм нейросетевого распознавания надводных объектов в реальном времени //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 1. – С. 19-33.
59. Саратовский А. М., Богатырёв Д. А. Выбор оптимальной нейронной сети для решения задачи идентификации морских надводных объектов //Транспортное дело России. – 2020. – №. 6. – С. 96-99.
60. Полковникова Н. А. Нейросетевые системы автоматического распознавания морских объектов //Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №. 1. – С. 207-218.
61. Боков П. А., Кравченя П. Д. Экспериментальный анализ точности и производительности разновидностей архитектур YOLO для задач компьютерного зрения //Программные продукты и системы. – 2020. – Т. 33. – №. 4. – С. 635-640.
62. Boudjit K., Ramzan N. Human detection based on deep learning YOLO-v2 for real-time UAV applications //Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence. – 2022. – Т. 34. – №. 3. – С. 527-544.
63. Redmon J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 779-788.

64. Крыжановская Г. В. и др. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами //Туризм и рекреация: инновации и ГИС-технологии. – 2019. – С. 45-49.
65. El Plan Nacional de Seguridad 2019 -2030 [электронный ресурс]- URL: https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/07/plan-matriz-web.pdf- свободный.
66. Костин А. С. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения //Системный анализ и логистика. – 2019. – №. 1. – С. 70-80.
67. Куатов Б. Ж., Макаев Т. З. История развития беспилотных летательных аппаратов //Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2017. – Т. 1. – С. 137-139.
68. БПЛА Boeing Scan Eagle [электронный ресурс]- URL: http://vimpel-v.com/guns/avia/bpla/402-bpla-boeing-scan-eagle.html- свободный.
69. Горизонт Эйр S-100 [электронный ресурс]- URL: https://russiandrone.ru/publications/2-6-gorizont-eyr-s-100/- свободный.
70. IAI’s Maritime Heron ideal for maritime security [электронный ресурс]- URL: https://www.defenceweb.co.za/security/maritime-security/iais-maritime-heron-ideal-for-maritime-security/- свободный.
71. Fulmar X Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [электронный ресурс]- URL: https://www.airforce-technology.com/projects/fulmar-x-unmanned-aerial-vehicle-uav/ - свободный.
72. UAV-2 GAVILÁN: Dron producido por Ecuador [электронный ресурс]- URL: https://www.elciudadano.com/pueblos/uav-2-gavilan-dron-producido-por-ecuador/01/12/ - свободный.
73. MAVLink Developer Guide [электронный ресурс]- URL: https://mavlink.io/en/- свободный.
74. Павловский В. Е. и др. Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером //Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – №. 4. – С. 49-57.

75. Лысухо Г. В., Масленников А. Л. Квадрокоптер: динамика и управление //Политехнический молодежный журнал. – 2020. – №. 05 (46).
76. Лазарев В. С., Лащев А. А. Разработка математической модели БПЛА на базе квадрокоптера с рамой DJI f-450 //Инженерный Вестник Дона. – 2018. – №. 2 (49). – С. 110.
77. Плохотников В.В. Модальный синтез систем управления с интервальными параметрами: Дис. … канд. тех. наук: 05.13.01 / В.В. Плохотников. – Новосибирск, 2002. – 252 с.
78. А.А. Бобцов, В.О.Никифоров и др. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении. - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. - 277 с.
79. Jatsun S. et al. Investigation of oscillations of a quadcopter convertiplane in transient mode in the vertical longitudinal plane //Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings”. – Springer, Singapore, 2020. – С. 345-358.
80. Усачов В. Е., Таргамадзе Р. Ч. Принципы и алгоритмы формирования системы математических моделей целевой миссии беспилотного летательного аппарата //Труды МАИ. – 2011. – №. 49. – С. 25-25.
81. Основы теории случайных процессов для радиофизиков: учебное пособие. А.А. Мальцев, И.В. Артюхин, О.В. Болховская, Е.А. Домбровский, А.В. Клюев, А.Г. Флаксман; Нижегородский. гос. ун-т. им. Н.И. Лобачевского – Нижний Новгород, 2014. – 78 с.
82. Mellinger D. Trajectory generation and control for quadrotors. Ph. D. thesis. University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania, 2012, 137 p.
83. Najm A. A., Ibraheem I. K. Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system //Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – Т. 22. – №. 4. – С. 1087-1097.
84. Uniformly distributed random numbers [электронный ресурс]- URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rand.html- свободный.

85. Рыхлов А. Б. Анализ применения законов распределения для выравнивания скоростей ветра // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Науки о Земле. – 2010. – Т. 10. – №. 2. – С. 25-30.
86. Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada [электронный ресурс]- URL: https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas - свободный.
87. Исследование спектров периодических сигналов: учебное пособие по выполнению лабораторной работе. А.А. Гуламов, Д.С. Коптев; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2020. – 25 с.
88. Муслимов Т. З. Алгоритмы управления строем автономных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа с помощью метода векторного поля //Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №. 4. – С. 187-214.
89. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – №. 11. – С. 677-685.
90. Agarwal D., Bharti P. S. A review on comparative analysis of path planning and collision avoidance algorithms //International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2018. – Т. 12. – №. 6. – С. 608-624.
91. Radmanesh M. et al. Overview of path-planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: A comparative study //Unmanned systems. – 2018. – Т. 6. – №. 02. – С. 95-118.
92. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Новый подход к использованию метода потенциальных полей в мобильной робототехнике //Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. ВИ Ульянова, 2021. – Т. 1. – С. 314-317.
93. Guayasamín Cajamarca A.C. Diseño y simulación de algoritmos de control tipo PID y SMC para seguimiento de trayectoria de un manipulador aéreo. Bachelor degree thesis. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018, 94 p.

94. Калькулятор силовых установок для радиоуправляемых моделей [электронный ресурс]- URL: https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php - свободный.
95. Pixhawk Overview [электронный ресурс]- URL: https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html- свободный.
96. NEO-M8N GPS [электронный ресурс]- URL: https://holybro.com/collections/gps-rtk-systems/products/m8n-gps- свободный.
97. Benewake TFmini Plus Lidar [электронный ресурс]- URL: https://ardupilot.org/copter/docs/common-benewake-tfmini-lidar.html- свободный.
98. Микрокомпьютер Raspberry Pi 4 Model B [электронный ресурс]- URL: https://amperka.ru/product/raspberry-pi-4-model-b-4-gb- свободный.
99. Intel RealSense Depth Camera D455 [электронный ресурс]- URL: https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d455/- свободный.
100. Sixfab 4G/LTE Cellular Modem Kit for Raspberry Pi [электронный ресурс]- URL: https://sixfab.com/product/raspberry-pi-4g-lte-modem-kit/- свободный.
101. DRONEKIT Developer tools for drones [электронный ресурс]- URL: https://dronekit.io/- свободный.
102. DroneKit 3DR Solo Development Guide [электронный ресурс]- URL: https://3drobotics.github.io/solodevguide/concept-dronekit.html - свободный.
103. Drone Programming - How to Control a Drone Using Python [электронный ресурс]- URL: https://www.elucidatedrones.com/posts/how-to-control-a-drone-using-python/- свободный.
104. Jatsun S., Emelyanova O., Lushnikov B., Martinez Leon A.S., et al. Hovering control algorithm validation for a mobile platform using an experimental test bench //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Т. 1027. – №. 1. – P. 012008.
105. Detection of ArUco Markers [электронный ресурс]- URL: https://gregorkovalcik.github.io/opencv_contrib/tutorial_aruco_detection.html- свободный.

106. Алексеев В. Ф., Бавбель Е. И. Автономная посадка БПЛА с использованием визуального сервоуправления // Десятая Международная научно-практическая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня». – 2024. – С. 472–479.

107. Боронахин А. М., Хань Н. К., Иен Н. Ч. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27. – №. 4. – С. 6-18.

108. Севостьянов И. Е., Девитт Д. В. Система визуального позиционирования многороторных беспилотников для совершения высокоточной автономной посадки //Science Time. – 2021. – №. 6 (90). – С. 38-42.

109. Козин Е. В., Карманов А. Г., Карманова Н. А. Фотограмметрия. – 2019.

110. ShipRSImagaeNet: A Large-scale Fine-Grained Dataset for Ship Detection in High-Resolution Optical Remote Sensing Images [электронный ресурс]- URL: https://github.com/zzndream/ShipRSImageNet- свободный.

111. Нечепуренко К. Ю. Автономное определение местоположения малогабаритного беспилотного летательного аппарата //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – №. 11. – С. 232-241.

112. Локализация по Aruco маркерам [электронный ресурс]- URL: https://habr.com/ru/articles/482220/- свободный.

113. Zhang Z. et al. ShipRSImageNet: A large-scale fine-grained dataset for ship detection in high-resolution optical remote sensing images //IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – Т. 14. – С. 8458-8472.

114. Намиот Д. Е., Ильюшин Е. А. О причинах неудач проектов машинного обучения //International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 60-69.

115. Rodríguez-Rangel H. et al. Analysis of statistical and artificial intelligence algorithms for real-time speed estimation based on vehicle detection with YOLO //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 6. – С. 2907.

116. Метрики классификации и регрессии [электронный ресурс]- URL: https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii-свободный.

117. Cuong N. H. H., et al. Improved YOLO object detection algorithm to detect ripe pineapple phase // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2022.- № 43(1). – С. 1365-1381.

118. Uzar M., Öztürk Ş., et al. Performance analysis of YOLO versions for automatic vehicle detection from UAV images // Advanced Remote Sensing. – 2021.- № 1. -С. 16–30.

119. Данелян, Т. Я. Формальные методы экспертных оценок// Статистика и экономика. – 2015. – № 1. -С. 183–187.

120. Васильева Е.В., Деева Е.А. Методы экспертных оценок в прикладной информационной экономике для обоснования преимуществ информационных систем и технологий // Мир новой экономики. – 2017. - № 4. – С. 14–22.