

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт кибернетики  
Направление 27.04.04 «Управление в технических системах»  
Кафедра систем управления и мехатроники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов

УДК 622.692.28:629.73-519

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Провоторов Павел Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. СУМ	Гончаров Валерий Иванович	д.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента ИСГТ	Петухов Олег Николаевич	к.э.н. доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Извеков Владимир Николаевич	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения.
P2	Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем управления и мехатроники.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных технических системах управления с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем управления мехатроники и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для управления в технических системах.
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно-техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач управления в технических системах.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за рискованную работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики  
 Направление подготовки 27.04.04 Управление в технических системах  
 Кафедра систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой СУМ  
 \_\_\_\_\_ Губин В.Е.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ5Б	Провоторов Павел Андреевич

Тема работы:

Использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2017 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является группа беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптер. Разработка способа децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров для роевого и строевого движения. В частности, апробация способа управления в задаче мониторинга нефтегазовых площадей группой квадрокоптеров. Исследование на соответствие критериям согласованного и безопасного коллективного движения.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вывести уравнения движения квадрокоптера.</li> <li>2. Разработать алгоритм управления движением одиночного квадрокоптера по скорости и по траектории.</li> <li>3. Исследовать алгоритмы управления мультиагентными системами и выработать критерии согласованного и безопасного движения группы квадрокоптеров.</li> <li>4. Решить кинематическую и динамическую задачу группового управления МАС в плоскости.</li> <li>5. Разработать способ децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе в трехмерном пространстве.</li> <li>6. Создать модель системы управления и среду компьютерного моделирования.</li> <li>7. Провести компьютерное моделирование коллективного движения 10 квадрокоптеров с независимыми системами</li> </ol>

	управления для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и способов управления. В частности, апробировать способ управления в задаче мониторинга нефтегазовых площадей группой квадрокоптеров. Проанализировать результаты исследований на соответствие критериям согласованного и безопасного коллективного движения.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Динамическая модель системы управления квадрокоптером выполненная в Universal Mechanism.</li> <li>Модель системы децентрализованного управления выполненная в пакете Matlab.</li> </ol>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Петухов Олег Николаевич
Социальная ответственность	Извеков Владимир Николаевич

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	15.01.2016 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры СУМ	Гончаров Валерий Иванович	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM5Б	Провоторов Павел Андреевич		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт кибернетики

Направление подготовки 27.04.04 Управление в технических системах

Кафедра систем управления и мехатроники

Уровень образования – магистратура

Период выполнения – осенний/весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	09.06.2017 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.05.2017 г.	Основная часть	60
27.05.2017 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
27.05.2017 г.	Социальная ответственность	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры СУМ	Гончаров Валерий Иванович	д.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
СУМ	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 158 с., 45 рис., 22 табл., 57 источников, 6 прил.

Ключевые слова: квадрокоптер, беспилотные летательные аппараты, дроны, мультикоптеры, мультиагентная система, децентрализованное управление, ПД и ПИД регуляторы, строевое управление, роевое управление.

Объектом исследования является группа беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптер.

Целью диссертационной работы является разработка способа децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров для мониторинга нефтегазодобывающих объектов.

В данной работе был разработан децентрализованный способ управления группой квадрокоптеров для полета в двух режимах в трехмерном пространстве и отвечающий шести ключевым критериям. В основу легли ранее разработанные модули управления одиночным квадрокоптером и модуль управления агентом в МАС для плоской динамической задачи.

Разработанный способ управление группой квадрокоптеров может применяться в нефтегазовой отрасли как система контроля утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводе, мониторинг территории, слежение при мероприятиях по капитальному ремонту на объектах. Данный способ позволит увеличить производительность, ускорит нахождение аварийных участков и сократит число аварий.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В работе используются следующие термины с соответствующими определениями:

**Квадрокоптер** (от англ. quadcopter — «вертолет с четырьмя винтами») — это беспилотный летательный аппарат с четырьмя пропеллерами, который обычно управляется пультом дистанционного управления с земли. Как правило, на нём устанавливается мини-камера, позволяющая вести в полёте фото- и видеосъёмку.

**Мультиагентная система (МАС):** это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами. Многоагентные системы могут быть использованы для решения таких проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы.

**Мобильный робот** — это робот, который может самостоятельно передвигаться и перемещаться в пространстве.

**Беспилотный летательный аппарат (БПЛА, реже БЛА; в разговорной речи также «беспилотник» или «дрон»)** — 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. Управление БПЛА может осуществляться эпизодической подачей команд или непрерывно — в последнем случае БПЛА называют дистанционно-пилотируемым летательным аппаратом (ДПЛА).

**Режим строевого движения** – упорядоченное групповое движение агентов с сохранением заданной геометрической топологии: клин, сетка, цепочка и другие формации. В построении при этом установлена двухуровневая иерархия: ведущие и ведомые агенты.

**Режим роевого движения** – коллективное движение децентрализованной самоорганизующейся мультиагентной системы без необходимости выдерживать определенную геометрическую топологию.

**Централизованная стратегия** – заключается в наличии одного или нескольких координирующих центров или центральных устройств управления, которые формируют команды для агентов.

**Децентрализованная стратегия** – подразумевает отсутствие в системе единого управляющего центра формирования координационных команд, а каждый агент независимо принимает решение о своих действиях, стремясь принести пользу для достижения групповой цели.

**Объект управления:** обобщающий термин кибернетики и теории автоматического управления, обозначающий устройство или динамический процесс, управление поведением которого является целью создания системы автоматического управления.

## Оглавление

Введение.....	11
ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРАМИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	17
1.1 Квадрокоптеры – перспективный вид БЛА .....	17
1.2. Управление одиночным квадрокоптером .....	21
1.2.1. Принцип полета .....	21
1.2.2. Функциональная схема и датчики .....	22
1.2.3. Обзор существующих решений в области управления одиночным квадрокоптером .....	24
1.2.4. Управление группой квадрокоптеров.....	27
1.3. Режимы движения .....	29
1.4. Стратегия управления .....	29
1.5. Коммуникация .....	30
1.6. Обзор существующих решений в области группового управления квадрокоптерами .....	31
1.7. Задача мониторинга нефтегазодобывающих объектов.....	33
1.8. Постановка задачи .....	38
Выводы по первой главе .....	39
ГЛАВА 2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫМ КВАДРОКОПТЕРОМ .....	41
2.1. Динамическая модель объекта управления.....	41
2.1.1. Допущения модели.....	41
2.1.2. Система координат и вектор состояния .....	41
2.1.3. Управляющее воздействие .....	42
2.1.4. Матрица перехода .....	43
2.1.5. Угловая скорость .....	46
2.1.6. Система уравнений движения .....	49
2.2. Синтез алгоритма управления .....	50
2.2.1. Линейная динамическая модель.....	50
2.2.2. Алгоритм управления по траектории .....	53
2.2.3. Алгоритм управления по скорости .....	55
Выводы по второй главе .....	55
ГЛАВА 3. ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ .....	57
3.1. Общие принципы в управлении мультиагентной системой.....	57
3.3.1. Методы строевого управления .....	59
3.3.2. Методы роевого управления .....	60
3.3.3. Модификация алгоритма Крейга Рейнольдса .....	61
3.3.4. Плоская кинематическая задача.....	62
3.4.1. Плоская динамическая задача .....	63
3.4.2. Трехмерная динамическая задача .....	64
Выводы по третьей главе .....	67
ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	68
4.1. Экспериментальный образец.....	68
4.2.1. Разработка модели системы управления и среды моделирования.....	69
4.2.2. Подключение модели системы управления и среды моделирования .....	69
4.2.3. Постановка экспериментов и результаты моделирования.....	70
4.4.1. Разработка модели системы управления и среды моделирования.....	71
4.4.2. Постановка экспериментов и результаты моделирования.....	72
4.5.1. Подключение модели системы управления и среды моделирования .....	75
4.5.2. Постановка экспериментов и результаты моделирования.....	76
Выводы по четвертой главе .....	81
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» .....	83
5.1 Организация и планирование работ.....	84
5.1.1 Продолжительность этапов работ .....	86
5.1.2 Расчет накопления готовности проекта.....	89
5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта .....	90
5.2.1 Расчет затрат на материалы .....	90
5.2.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	91
5.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	92
5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию.....	93
5.2.5 Расчет затрат на социальный налог .....	93
5.2.6 Расчет амортизационных расходов.....	94

5.2.7 Расчет прочих (накладных) расходов .....	95
5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки .....	95
5.2.9 Расчет прибыли, НДС и цены разработки НИР .....	95
5.3.1 Оценка экономической эффективности проекта .....	96
5.3.2 Оценка научно-технического уровня НИР .....	96
<b>СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>100</b>
Введение .....	100
6. Производственная безопасность .....	102
6.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования .....	102
6.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследования .....	103
6.3 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов (техника безопасности и производственная санитария) .....	104
6.3.1 Механические опасности .....	104
6.3.2 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ .....	105
6.3.3 Микроклимат .....	105
6.3.4 Освещение .....	107
6.3.5 Расчет системы искусственного освещения на рабочем месте оператора поста управления .....	108
6.3.6 Шум .....	111
6.3.7 Электромагнитные излучения .....	112
6.3.8 Психофизиологические факторы .....	113
6.3.9 Электрический ток .....	114
6.4 Экологическая безопасность .....	116
6.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	116
6.4.2 Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду .....	116
6.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	116
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	118
6.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	118
6.5.2 Анализ причин, которые могут вызвать ЧС на производстве при внедрении объекта исследований .....	119
6.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	119
6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	121
6.6.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства .....	121
6.6.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	121
6.6.2.1 Эргономические требования к рабочему месту оператора ПЭВМ .....	121
Основные результаты и заключение .....	123
Список использованных источников .....	125
Приложение А .....	131
Приложение Б .....	132
Приложение В .....	133
Приложение Г .....	135
Приложение Д .....	136
Приложение Е .....	141

## Введение

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время роботы находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. Применение групп малоразмерных автономных роботов позволяет расширить функциональные возможности и повысить эффективность применения таких роботов [10, 11].

Группы малоразмерных автономных роботов могут применяться для решения целого ряда практических задач, таких как картографирование [12, 13], поисковые операции [14], мониторинг [15, 16], радиоэлектронная разведка и радиоэлектронная борьба, сортировка радиоактивных отходов [17], охранные системы, мобильные телекоммуникационные сети быстрого развертывания [18], перемещение крупного тела [19], мобильные распределенные сети датчиков [20] и др.

Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые по сути являются летающими роботами, составляют важную часть научных исследований в военной, гражданской и космической области. Заменяя пилотируемые транспортные средства, БПЛА имеют преимущество в сложных и опасных средах. Их надежность в тяжелых для человека условиях намного выше. Наиболее распространенным на текущий момент типом мобильных автономных роботов, применяемых в группах, являются беспилотные летательные аппараты (БЛА). Одним из наиболее перспективных видов малоразмерных БЛА являются квадрокоптеры, которые в настоящий момент находят все более широкое применение для решения различных практических задач, таких как формирование мобильных телекоммуникационных сетей и радиолокационных комплексов быстрого развертывания, формирование ложных целей, разведка и мониторинг территорий и др. Эти задачи требуют, чтобы аппараты группы могли быть размещены в пространстве строго определенным образом и имели возможность быстрого перестроения в соответствии с особенностями выполняемой задачи.

Прогрессирующая популярность наглядно подтверждает глобальный рост рынка БПЛА, как в исторической ретроспективе, так и в прогнозе аналитических агентств. Следует выделить тренд увеличения доли дронов гражданского назначения в среднесрочной перспективе: 19% ожидаемый ежегодный рост против 5% в военном секторе. Во многом это обусловлено стремительным ростом в 22% сегмента мультикоптеров за счет расширения областей применения, в первую очередь в гражданском секторе. Сегодня мультикоптеры активно используются в кинопроизводстве и аэрофотосъемке, в инспекции инфраструктурных объектов, в нефтегазовой отрасли.

Идея создания МАС на базе мультикоптеров начала развиваться совсем недавно и имеет перспективы для широкого применения. В сравнении с одиночным квадрокоптером, МАС, состоящая из квадрокоптеров, имеет расширенное знание окружающей среды за счет коммуникации внутри группы, повышенную надежность за счет взаимозаменяемости агентов, и способность коллективно быстрее выполнять более сложные задачи.

В книге по алгоритмам и моделям управления МАС И. А. Каляева [4] определяются три вида стратегии управления мультиагентными системами: централизованный, децентрализованный и комбинированный метод управления. Децентрализованное управление подразумевает отсутствие единого управляющего центра формирования координационных команд для каждого из элементов группы. Такая стратегия управления группой масштабируема, имеет высокую надежность и не требует сложной оптимизации коллективного движения в отличие от централизованного подхода.

Анализ российской и зарубежной литературы показал, что достаточно много научных трудов посвящено системе управления движением одиночного квадрокоптера. В России интерес научного сообщества к квадрокоптерам набирает обороты. Следует выделить статью С.А. Белокопя, Ю.Н. Золотухина и других научных сотрудников из Новосибирска по управлению параметрами полета квадрокоптера при заданной траектории [2]. Среди отечественных работ, посвященных теме управления группой квадрокоптеров, можно

отметить статью Д. Я. Иванова из ЮФУ, где решается строевая задача, при которой квадрокоптеры должны сохранять заданную геометрическую топологию [1]. Другими ключевыми российскими организациями, вносящими вклад в развитие методов управления мультиагентными системами, являются: МГТУ им. Баумана, ВМК МГУ, ЦНИИ РТК, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ «Станкин», МИРЭА.

В англоязычной литературе подобных научных трудов значительно больше, и алгоритмы управления одиночным квадрокоптером в основном базируются на линейно-квадратичных регуляторах [5], ПД или ПИД регуляторах [6-7], [8-9], [21] нечетких регуляторах [22] и нейросетевых регуляторах [23].

Исследователи из Будапештского Университета разработали алгоритм децентрализованного управления группой квадрокоптеров на базе правил К. Рейнольдса и создали МАС из 10 полностью автономных квадрокоптеров, способных выполнять реальные коллективные задачи [25]. В отличие от работ под авторством профессора Кумара, квадрокоптеры получали данные о внешней среде лишь с помощью GPS датчиков и обменивались информацией о своем положении с соседними агентами в зоне покрытия беспроводных радиомодулей связи. В работе венгерских исследователей модель управления была адаптирована для реальной среды, включающей шум, задержки сигналов и внешние воздействия, такие как ветер. В Стенфордском Университете создали алгоритм управления квадрокоптером в МАС, построенный на базе решения Нэша задачи о переговорах [26]. Модель управления была апробирована в реальных условиях при групповом движении трех автономных квадрокоптеров в открытом пространстве. Одной из отличительных особенностей работы является использование сложной динамической модели движения квадрокоптера, учитывающей ряд аэродинамических эффектов.

Резюмируя, децентрализованное управление квадрокоптерами в МАС является новым этапом развития систем управления мультикоптерами, и в силу

новизны задачи, востребованности в практическом применении и ограниченности научных работ на эту тему, является актуальной проблемой.

### **Цели и задачи**

Целью диссертационной работы является разработка способа децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров для роевого и строевого движения. Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Вывести уравнения движения квадрокоптера.
2. Разработать алгоритм управления движением одиночного квадрокоптера по скорости и по траектории.
3. Исследовать алгоритмы управления мультиагентными системами и выработать критерии согласованного и безопасного движения группы квадрокоптеров.
4. Решить кинематическую и динамическую задачу группового управления МАС в плоскости.
5. Разработать способ децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе в трехмерном пространстве.
6. Создать модель системы управления и среду компьютерного моделирования.
7. Провести компьютерное моделирование коллективного движения 10 квадрокоптеров с независимыми системами управления для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и способов управления. В частности, апробировать способ управления в задаче мониторинга нефтегазовых площадей группой квадрокоптеров. Проанализировать результаты исследований на соответствие критериям согласованного и безопасного коллективного движения.

## **Методы исследования**

Поставленные задачи были решены на базе классических методов теории автоматического управления, алгебры Ли и методов управления мультиагентными системами. Верификация математической модели движения квадрокоптера, проверка работоспособности алгоритма управления по скорости, алгоритма управления по траектории и способа децентрализованного управления в МАС было осуществлено в ходе исследований компьютерным моделированием. Оценка производилась на основе результатов экспериментов, а также с помощью симуляции среды моделирования.

## **Практическая ценность**

Сегодня интерес к мультикоптерным МАС проявляют организации в нефтегазовой отрасли, сельского хозяйства и энергетики, спасательные службы и силовые органы для выполнения задач мониторинга, аэрофотосъемок, грузоперевозок, патрулирования, а также поисково-спасательных работ. Например, в нефтегазовой отрасли используются мультикоптеры для мониторинга состояния объектов трубопроводов, обследование околотрубных пространств, своевременного выявления разливов и несанкционированного отбора нефти из трубопроводных магистралей, а также контроль плановых работ. В данных задачах применяется сочетание нескольких методов, что позволяет комплексно оценить состояние объекта, а также точно определить координаты местности, где был сделан снимок. Разрешение и частота снимков напрямую влияет на точность расчетов, и как следствие, прогноз возможных аварий и обнаружение порывов, либо несанкционированных врезок. С этой точки зрения использование снимков с мультикоптеров значительно эффективнее, чем снимки со спутниковых систем. Выполнение подобных задач на больших расстояниях требует согласованной работы группы автономных летающих агентов. При спасательных работах и задачах патрулирования границ нужна высокая надежность, что может быть обеспечено взаимозаменяемостью агентов.

Данная работа имеет научную значимость в теории управления МАС благодаря разработанным новым подходам к децентрализованному управлению и прикладную значимость, поскольку может лечь в основу систем управления автономными квадрокоптерами для решения обозначенных выше задач. В качестве примера практического применения разработанного способа группового управления, в диссертационной работе была решена задача мониторинга нефтегазодобывающих объектов группой автономных квадрокоптеров.

**Основные положения.** На защиту выносятся:

1. Алгоритмы управления одиночным квадрокоптером по скорости и по траектории.
2. Метод кинематического и динамического управления автономным агентом в мультиагентной системе для строевого и роевого движения в двумерном пространстве.
3. Способ децентрализованного управления квадрокоптером в мультиагентной системе на базе модифицированных правил К. Рейнольдса.
4. Модель системы управления квадрокоптером и масштабируемая среда моделирования, позволяющая визуализировать процесс группового движения автономных летающих агентов.
5. Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность разработанных алгоритмов и методов, а также оценка на соответствие критериям согласованного и безопасного движения в группе квадрокоптеров.

В первой главе рассмотрен принцип полета и функциональная схема квадрокоптера, включая основные составные части летающего аппарата, в том числе датчики для связи между агентами. Проведен обзор существующих решений в области управления одиночным квадрокоптером и в области группового управления квадрокоптерами с оценкой их достоинств и недостатков.

# ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРАМИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

## 1.1 Квадрокоптеры – перспективный вид БЛА

В работе [28] приведена классификация мобильных роботов по типу внешней среды:

- наземные;
- водные;
- воздушные;
- космические.

В настоящее время наиболее распространенными являются воздушные роботы, то есть беспилотные летательные аппараты (БЛА). История успешного применения БЛА насчитывает уже почти восемь десятилетий. В последнее время интерес к БЛА намного возрос [29], причем не только в военном [30, 31, 32], но и в гражданском применении. В соответствии с [33], применение БЛА на гражданском секторе рынка в первую очередь касается контрольных функций БЛА [34, 35, 36, 37, 38]. Одним из основополагающих факторов, выступающих в пользу малогабаритных БЛА является цена их производства. Несмотря на то, что производство единичных опытных образцов мини- и микро- БЛА нельзя считать дешевым, тем не менее, расчеты стоимости серийных образцов в случае их массового производства обнадеживают. Для сравнения, стоимость одного полноразмерного аппарата составляет около 10 млн. долларов США, в то время как стоимость мини-БЛА лежит в пределах 20-30 тысяч долларов (по данным отечественный комплекс, состоящий из БЛА и пульта управления на базе автомобиля высокой проходимости стоит порядка 7-9 млн. рублей), а расчетная стоимость микро-БЛА при их массовом производстве оценивается в 10 долларов за единицу [39].

В настоящее время не существует единой общепринятой классификации БЛА [40], однако широко используются различные подходы к систематизации БЛА по масштабам применения, принадлежности, габаритно-весовым

характеристикам, возможности повторного применения, аэродинамической схеме, типу двигателя, способам старта, посадки, управления и др. (подробнее этот вопрос рассмотрен в работе [40]). При решении группой БЛА практических задач большое значение имеет аэродинамическая схема применяемых БЛА, так как БЛА различной аэродинамической схемы значительно отличаются по динамическим возможностям и ограничениям на перемещение. Можно выделить следующие аэродинамические схемы БЛА:

- самолетного типа;
- вертолетного типа;
- гибридного типа (например: конвертоплан);
- аппараты легче воздуха (дирижабли, аэростаты и т.п.).

В робототехнике устойчиво наблюдается тенденция к миниатюризации. Малоразмерные роботы проще в применении, могут использоваться в небольших помещениях, обладают меньшим энергопотреблением. Однако одной из проблем на пути создания малоразмерных летательных аппаратов стала невозможность применения привычных схем построения летательных аппаратов на малоразмерных объектах. Достаточно подробно этот вопрос рассматривается в работе [41], там же показано, что малоразмерные летательные аппараты должны использовать другие принципы полета, чем те, что используются в полноразмерных летательных аппаратах. Таким образом, наблюдается тенденция все более широкого применения малоразмерных БЛА, а также расширения функциональных возможностей БЛА за счет группового применения.

В работе [42] приведен сравнительный анализ различных принципов построения летательных аппаратов, применительно к малоразмерным летательным аппаратам, приведенный в таблице 2.

Таблица 1 – Сравнение принципов полета (1 – плохо, 2 – удовлетворительно, 3 – хорошо)

Наименование параметра	Значение оценки параметра для различных типов ЛА				
	Самолет	Вертолет	Машущее крыло	Автожир	Дирижабль
Стоимость производства	2	1	2	2	3
Стоимость эксплуатации	2	1	1	2	3
Полезная нагрузка/объём	3	2	2	2	1
Маневренность	2	3	3	2	1
Зависание в полете	1	3	2	1	3
Полет на малой скорости	1	3	2	2	3
Защищенность	2	2	3	2	2
Вертикальный взлет/посадка	1	3	2	1	3
Прочность	2	1	2	1	3
Миниатюрность	2	3	3	2	1
Использование в помещениях	1	3	2	1	2
<b>Итого</b>	19	25	24	18	25

Приведенные в таблице 1 результаты сравнения принципов полета для малоразмерных летательных аппаратов показывают значительные преимущества аппаратов вертолетного и дирижабельного типов. Тем не менее, аппараты вертолетного и дирижабельного типа представляются более универсальными. Результаты, приведенные в таблице 1, демонстрируют также высокие перспективы малоразмерных летательных аппаратов на основе машущего крыла.

В таблице 2 приведены результаты более подробного сравнения этих типов БЛА. Приведенные в таблице 2 результаты сравнения принципов полета, показывают универсальность квадрокоптеров – летательных аппаратов, относящихся к классу мультикоптеров.

Таблица 2 – Сравнение малоразмерных вертолетов, дирижаблей и аппаратов с машущим крылом (1 – плохо, 2 – удовлетворительно, 3– хорошо, 4 – очень хорошо).

Наименование параметра	Значение оценки параметра для малоразмерных БЛА						
	Один винт	Осевой винт	Соосные винты	Тандемные винты	Квадрокоптер	Дирижабль	Машущее крыло
Стоимость производства	2	2	2	2	1	4	3
Стоимость эксплуатации	1	1	4	2	3	3	2
Полезная нагрузка/объем	2	2	4	3	3	1	2
Маневренность	4	3	2	2	3	1	3
Простота конструкции	1	2	3	1	4	4	1
Аэродинамическая сложность	1	1	1	1	4	3	1
Полет на низкой скорости	4	3	4	3	4	4	2
Полет на высокой скорости	2	4	1	2	3	1	3
Миниатюрность	2	3	4	2	3	1	2
Живучесть	1	3	3	1	1	3	2
Зависание в полете	4	4	4	4	4	3	1
<b>Итого</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>23</b>	<b>33</b>	<b>28</b>	<b>22</b>

## 1.2. Управление одиночным квадрокоптером

### 1.2.1. Принцип полета

Четырехпропеллерный летающий робот (далее «квадрокоптер») выполнен в виде креста с равными сторонами, на концах которых установлены пропеллеры с приводами. Все пропеллеры имеют фиксированную ось. Подъемная сила, возникающая в результате вращения пропеллера, перпендикулярна к платформе квадрокоптера. Величина подъемной силы зависит от скорости вращения пропеллеров. Вертикальный полет квадрокоптера осуществляется за счет вертикальной составляющей равнодействующей подъемной силы, которая преодолевает силу тяжести. Горизонтальный полет осуществляется за счет горизонтальных составляющих подъемных сил, возникающих при наклоне квадрокоптера. Наклонить квадрокоптер можно с помощью регулирования скоростей вращения пропеллеров, создавая опрокидывающий момент относительно осей  $x$  или  $y$  (Рис. 1). Для этого достаточно установить разную скорость вращения между пропеллерами, находящимися друг против друга по диагонали.

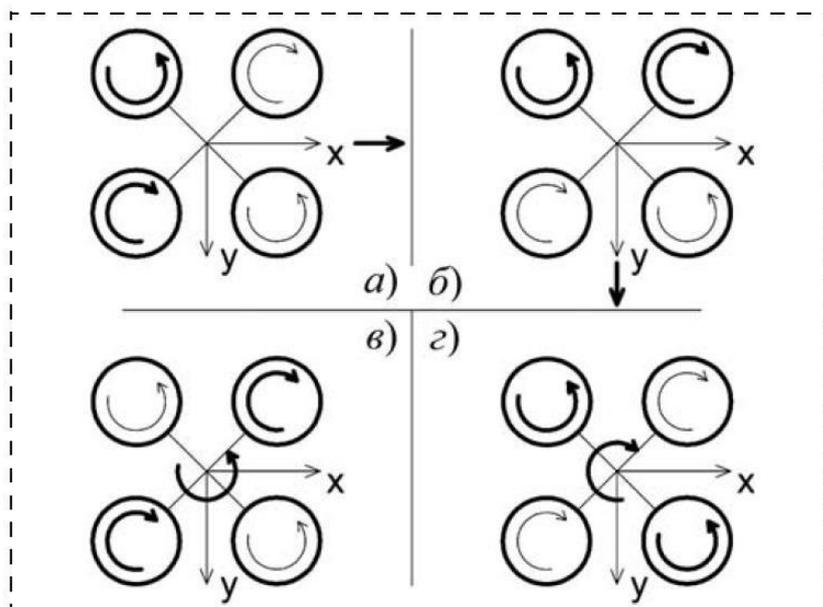


Рис. 1. Принцип полета квадрокоптера.

Если одна пара пропеллеров, расположенных друг против друга по диагонали, вращается по часовой стрелке, то другая пара вращается против часовой стрелки. Дело в том, что при вращении винта возникает момент, вращающий квадрокоптер вокруг собственной оси в обратную сторону. Если вращать пропеллеры попарно в разные стороны, то и момент, действующий на тело квадрокоптера и возникающий в результате вращения пары пропеллеров по часовой стрелке, будет компенсироваться моментом, возникающим в результате вращения пары пропеллеров против часовой стрелки. В вертолетах эту функцию выполняет хвостовой винт, компенсирующий момент, возникающий в результате вращения несущего винта вертолета. Вращение вокруг собственной оси осуществляется за счет разницы скоростей вращения между парами пропеллеров, вращающихся в разные стороны.

### 1.2.2. Функциональная схема и датчики

В общем случае составными частями квадрокоптера являются механическая часть (рама, шасси, пропеллеры (Рис. 2)), плата управления, блок аккумуляторов, электроприводы, контроллеры приводов и различные датчики, в том числе камера (Рис. 3).

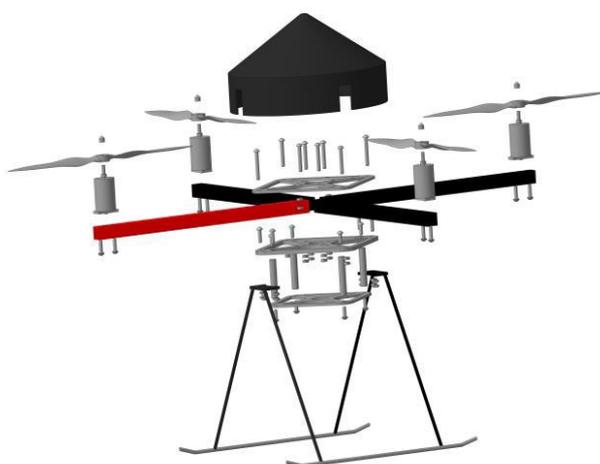


Рис. 2. Механические части квадрокоптера.

Обратная связь по угловой ориентации обеспечивается инерциальным измерительным блоком (датчик IMU, от англ. Inertial-measurement unit), представляющим комбинацию гироскопов, акселерометров и магнитометров для измерения углов (крена, тангажа и рыскания) и угловых скоростей. Для определения местоположения применяются датчики глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС. Дополнительно, квадрокоптер может быть оснащен компасом, альтиметром для измерения высоты полета, системой технического зрения, лазерным дальномером и другими датчиками.

Уровень автономности квадрокоптера бывает разным. При некоторых задачах управление квадрокоптером может вестись оператором с наземной рабочей станции. В этом случае квадрокоптер находится в зоне видимости оператора и/или изображение с бортовой камеры транслируется на экран рабочей станции, оператор при этом может задавать маршрут и траекторию движения летательного аппарата. Оперативное управление квадрокоптером по скорости может производиться джойстиком радиопульта, применяя простые команды: «вверх», «вниз», «направо», «налево».

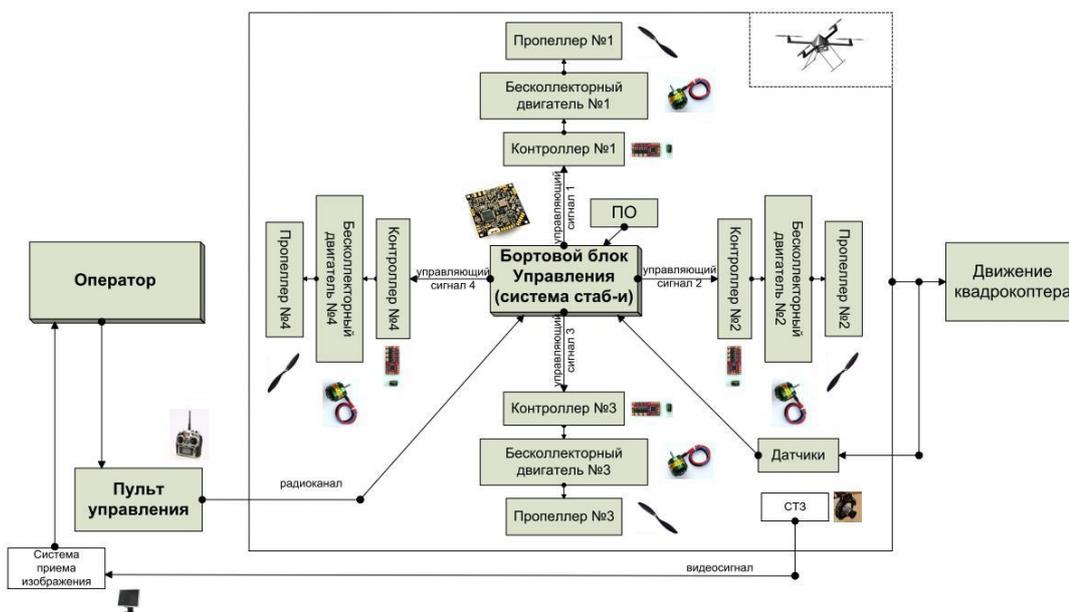


Рис. 3. Функциональная схема управления

В среднем мультикоптеры (квадрокоптеры, гексакоптеры (6 роторов) и октокоптеры (8 роторов)) могут весить от 0.1 до 4 килограмм, осуществлять

полет 30-50 минут на одном заряде аккумуляторов, развивать скорость до 110 км/ч, поднимать груз до 3-х килограммов и улетать на расстояние до 12 километров. На практике мультикоптеры считаются БПЛА «ближнего радиуса действия», что в первую очередь связано с ограниченностью времени полета. Дальность полета современных квадрокоптеров составляет в среднем 3-4 км.

### 1.2.3. Обзор существующих решений в области управления одиночным квадрокоптером

Анализ мировой литературы показал, что достаточно много работ, посвященных теме управления квадрокоптером, включая разработку динамической модели, алгоритма управления, моделирования движения и экспериментальные исследования движения реальных образцов (Таблица 3).

Таблица 3 - Перечень научных трудов, посвященных управлению одиночным квадрокоптером.

Авторы	Страна	Год	Датчики	Уникальность
Cutler	США	2012	Система лаб. камер	Использование пропеллера с переменным шагом
Hoffman	США	2007	GPS	Динамическая модель с учетом аэродинамических эффектов
Kumar	США	2011	Система лаб. камер	Высокая маневренность, уход от столкновения с дин, препятствиями
Shen	США	2014	GPS, борт. камеры, лазерный сканатор	Построение 3D карты местности
Lee	США	2011	GPS	Расчет ошибки угл. ориентации на основе матрицы поворота
Thorhallur	Дания	2009	Bluetooth	Не выявлена
Galustyan	Россия	2015	GPS	Метод комбинированного управления по скорости и траектории

Способ управления чаще всего базируется на ПД или ПИД регуляторах, а также на линейно-квадратичных регуляторах (ЛКР) [21], нечетких регуляторах [36] и нейросетевых регуляторах и рекурсивного метода стабилизации (на англ. Backstepping) [20].

В процессе исследования в русскоязычной литературе было обнаружено малое количество научных трудов в области управления мультикоптерами, соотносимых по уровню с зарубежными работами. Можно выделить статьи С.А. Белокопя, Ю.Н. Золотухина и других научных сотрудников из Новосибирска по управлению параметрами полета квадрокоптера по заданной траектории [2].

В статье [23] исследователей из аэрокосмической лаборатории Массачусетского Технологического Института применяется метод управления, где управляющее воздействие рассчитывается на основе ПИД регулятора, а при выводе уравнений движения используются кватернионы. Отличительной чертой работы является использование пропеллера с изменяемым шагом и дополнительным приводом вместо стандартного пропеллера с фиксированным углом атаки. Такое изменение дает возможность менять подъемную силу не только регулированием скорости вращения пропеллера, но и угла атаки, что позволяет повысить маневренность квадрокоптера, а также переворачивать платформу летательного аппарата и осуществлять полет в перевернутом состоянии (в этом случае угол атаки пропеллеров устанавливается таким образом, что подъемная сила действует в обратном направлении). Авторы статьи апробировали такую конструкцию и способ управления в натурных экспериментах.

Научные сотрудники из Стэнфордского Университета в своем методе управления также используют ПИД-регуляторы для контроллеров управления угловой ориентацией и высотой полета [34]. Работа отличается глубоким исследованием динамической модели движения квадрокоптера с учетом аэродинамики корпуса летательного аппарата. Авторы показывают, что эффект «биения лопасти», изменение подъемной силы за счет набегающего

дополнительного потока воздуха, эффект отраженного от земли потока воздуха при посадке и взлете, гироскопический момент и другие аэродинамические эффекты незначительно влияют на малых скоростях, например в режиме зависания, однако уже на средних скоростях их влияние усиливается.

В научном сообществе среди исследователей мультикоптеров выделяются сотрудники лаборатории «КумарЛаб» (от англ. KumarLab) Университета Пенсильвании под началом профессора В. Кумара. Результаты и видеоролики экспериментов из упомянутой лаборатории впечатляют резкостью, проворностью и маневренностью движения квадрокоптеров, использующих метод управления на основе ПД регулятора и автоматическую генерацию оптимальной траектории полета [37]. В статье авторы аргументируют, что микроквадрокоптеры (размером в 0.1-0.5 метр и весом 0.1-0.5 килограмм) значительно маневреннее, следовательно, при проектировании уделяют большое внимание размеру и весу летательного аппарата.

Учитывая этот недостаток, команда под руководством В. Кумара разработала универсальную модель квадрокоптера, оснащённую широким набором датчиков, включая датчик GPS, бортовые камеры и лазерный сканатор, и способную совершать полет, как внутри помещений, так и вне. Отличительной особенностью при этом является возможность строить 3D карту местности в процессе полета.

В качестве других, достойных внимания, работ, посвященных системе управления квадрокоптером, можно выделить статью ученых из ЮАР, где алгоритм управления основан ПД регуляторе и резюмирована теория аэродинамики винта, статьи Рафаэлло Д'Андреа [33], [42], профессора Швейцарской Высшей Школы Цюриха, где алгоритмы управления и планировании траектории синтезированы на основе методов оптимального управления с минимизацией времени движения и проверкой выполнимости траектории, и статью ещё одной команды исследователей из того же института[20], где в подходе управления был использован рекурсивный метод

стабилизации (Integral Backstepping) и были рассмотрены задачи ухода от столкновения, взлета и посадки.

Принимая во внимание степень разработанности задачи управления одиночным квадрокоптером, одним из этапов диссертационной работы было учесть лучшие практики и разработать комбинированный алгоритм управления движением квадрокоптера по скорости и по траектории.

#### **1.2.4. Управление группой квадрокоптеров**

Являясь перспективным типом малоразмерных БЛА, квадрокоптеры уже сейчас находят широкое применение не только поодиночке, но и в составе групп. Так, группы квадрокоптеров применяются при проведении световых шоу [45] и рекламных акций, мониторинге местности. Ведутся работы по применению групп квадрокоптеров для формирования мобильных фазированных антенных решеток [34, 47], мобильных телекоммуникационных сетей быстрого развертывания, формированию ложных целей [51] для средств радиоэлектронной разведки противника и др.

В большинстве рассмотренных случаев практического применения групп квадрокоптеров, квадрокоптерам группы необходимо формировать определенные пространственные положения. Требуемое (целевое) расположение квадрокоптеров в пространстве называют *строем* (англ. *formation*), а задачу формирования группой квадрокоптеров заданного строя называют *строевой задачей* (англ. *formation task*). В ряде практических применений, таких как формирования мобильных фазированных антенных решеток, ложных целей, мобильных телекоммуникационных сетей быстрого развертывания и т.п., строевая задача занимает приоритетное значение, от решения которой зависит возможность выполнения задания. В ряде других применений, таких как видеомониторинг, рекогносцировка, постановка радиопомех, эффективное решение строевой задачи позволяет несколько повысить эффективность решения группой поставленных задач за счет

снижений площади перекрытия рабочих зон роботов группы. Например, при решении задачи видеомониторинга группой роботов, роботам необходимо располагаться таким образом, чтобы избегать «мертвых зон» и в то же время избегать чрезмерного перекрытия видеокadres, как это показано на рисунке 4.

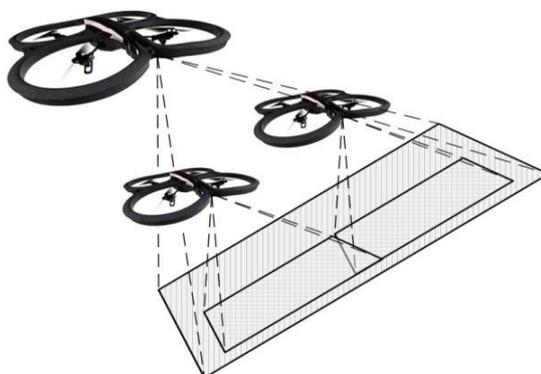


Рисунок 4 – Чрезмерное перекрытие кадров при видеомониторинге группой летающих роботов типа квадрокоптеров

В некоторых случаях один или несколько роботов снимают «общий план», в то время как остальные ведут более детальную съемку отдельных участков, что позволяет оператору перенаправлять камеры на наиболее важные участки, как это показано на рисунке 5.

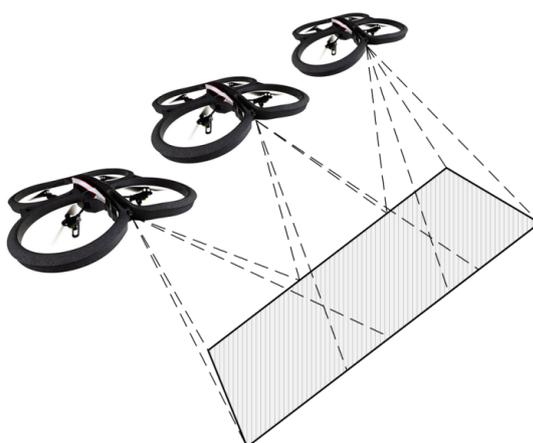


Рисунок 5 – Пример расположения летающих роботов в пространстве, которое позволяет минимизировать перекрытие кадров при видеомониторинге

При формировании ложных целей имеют значения очертания группы и средняя плотность расположения роботов внутри этого контура, необходимые для обеспечения отражающей способности подобной имитируемому объекту.

При формировании мобильных коммуникационных сетей, каждый робот должен быть расположен близко к центру соты. При формировании мобильных фазированных антенных решеток роботы группы должны строго поддерживать одинаковые интервалы друг между другом.

### **1.3. Режимы движения**

В диссертационной работе рассматриваются два режима группового движения агентов:

1. Режим строевого движения – упорядоченное групповое движение агентов с сохранением заданной геометрической топологии: клин, сетка, цепочка и другие формации. В построении при этом установлена двухуровневая иерархия: ведущие и ведомые агенты. Недостатком такого режима является зависимость ведомых агентов от агентов-лидеров, выход из строя которых может расформировать строй, если не учесть эту проблему.

2. Режим «роевого движения» – коллективное движение децентрализованной самоорганизующейся мультиагентной системы без необходимости выдерживать определенную геометрическую топологию. Такой режим может быть более гибким при внештатных ситуациях.

### **1.4. Стратегия управления**

В книге [13], посвященной коллективному управлению в группах роботов, определены три стратегии группового управления МАС:

1. Централизованная стратегия – заключается в наличии одного или нескольких координирующих центров или центральных устройств управления, которые формируют команды для агентов. Преимуществом такого подхода является простота организации централизованной стратегии и, следовательно, алгоритмизации, однако, при увеличении числа агентов и сложности задачи

такая стратегия может оказаться неэффективной, поскольку на централизованное управление возлагается сложная задача оптимизации действий всех агентов для достижения групповой цели. Другим недостатком централизованного управления является уязвимость системы в части зависимости от координирующего центра, выход из строя которого или потеря канала коммуникации может привести к выходу из строя всей системы.

2. Децентрализованная стратегия – подразумевает отсутствие в системе единого управляющего центра формирования координационных команд, а каждый агент независимо принимает решение о своих действиях, стремясь принести пользу для достижения групповой цели. Такая стратегия управления группой масштабируема и имеет высокую надежность, но сложна в алгоритмизации.

3. Смешенная стратегия – заключается в периодическом вмешательстве центра управления в систему с децентрализованной стратегией управления, например для постановки цели, а тактическое выполнение групповых задач происходит без участия центра управления. Такой подход предполагает гибкость в сочетании принципов централизованного и децентрализованного управления.

В диссертационной работе в зависимости от режима полета применяется децентрализованная или смешенная стратегия группового управления.

## **1.5. Коммуникация**

Как было отмечено ранее, в мультиагентной системе агенты имеют возможность локально обмениваться информацией для корректировки своих действий. В случае квадрокоптеров, в качестве коммуникационной базы для технической реализацией внутренней связи могут служить радиомодули Xbee с частотой 2.4 ГГц [43], функционирующие в широковещательном режиме и распространяющие пакеты данных без установления контакта с определенным агентом. Таким образом, каждый автономный квадрокоптер может передавать и принимать пакеты данных (идентификатор агента, глобальное

местоположение, скорость полета, угол рыскания), источники которых находятся в зоне слышимости агента, ограниченной дальностью связи 50-100 метров. Согласно исследованиям, такую дальность связи имеют птицы в стае.

Задержка передачи данных при этом может составить около 0.4 секунд, что может являться проблемой для эффективной работы алгоритма децентрализованного управления квадрокоптером в МАС. В диссертационной работе принимается допущение, что обмен информацией в зоне слышимости агента происходит моментально, и проблема задержки сигнала не исследуется.

### 1.6. Обзор существующих решений в области группового управления квадрокоптерами

В мировой литературе можно отметить лишь несколько работ, направленных на создание и апробацию способов группового управления летающими агентами в трехмерном пространстве (Таблица 4).

Таблица 4. Перечень научных трудов, посвященных групповому управлению квадрокоптерами.

Авторы	Год	№	Децентр.	Среда	Зависимость	Уникальность
Hauert	2011	10	Да	Вне помещения	GPS	Первые 10 автономных БПЛА
Hoffman	2011	3	Да	Вне/внутри помещения	GPS, камера, раб. станция	Масштабируемый алгоритм, дин. модель
Kushleyev	2012	20	Нет	Внутри помещения	VICON, центр. компьютер	20 единиц, точность и скорость маневров
Turpin	2012	4	Да/Нет	Внутри помещения	VICON, центр. компьютер	Быстрая динамика агентов
Vasarhelyi	2014	10	Да	Вне помещения	GPS	Децентрализованное управление 10 агентами

Среди отечественных работ можно отметить статьи [11-12], где решается задача формирования строя методом окружностей. Применен централизованный метод управления группой. Апробация метода произведена с примера квадрокоптеров Ar.Drone. В Университете Пенсильвании США профессором В. Кумара и сотрудниками его лаборатории была реализована и апробирована система управления группой из 20 квадрокоптеров [37], [57].

Результаты испытаний демонстрируют согласованное коллективное движение и выполнение задач, например, разделение на подгруппы для последовательного пролета через ограниченный проем в стене. К недостаткам можно отнести ограниченность движения лишь в лабораторных условиях, где для определения положения квадрокоптеров была установлена система камер, отслеживающие специальные маркеры. (Рис. 6). Кроме того, алгоритм управления был централизованным: управление квадрокоптерами происходило с центрального компьютера, что не соответствует принципам стайного движения.

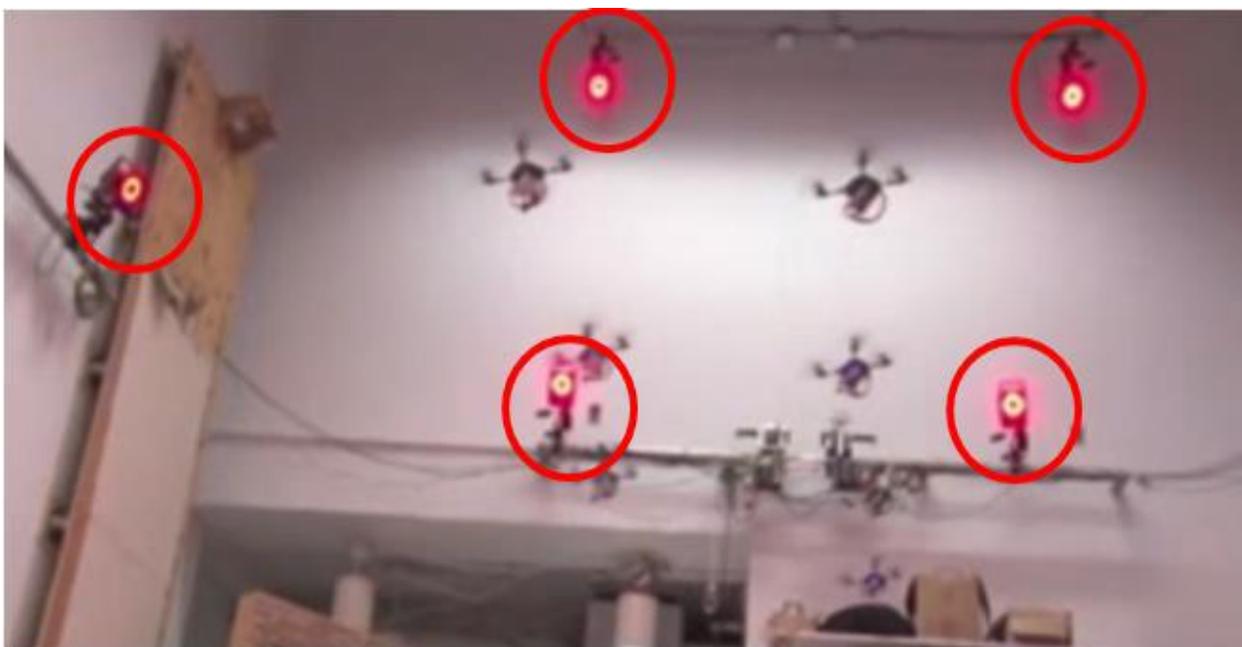


Рис. 6. Система камер VICON в лаборатории В. Кумара (Институт Пенсильвании)

Исследователи из Будапештского Университета разработали алгоритм децентрализованного управления группой квадрокоптеров на базе правил К. Рейнольдса и создали МАС из 10 полностью автономных квадрокоптеров, способных выполнять реальные коллективные задачи [43]. В отличие от работ под авторством профессора Кумара, квадрокоптеры получали данные о внешней среде лишь с помощью GPS датчиков и обменивались информацией о своем положении с соседними агентами в зоне покрытия беспроводных радиомодулей связи. Кроме этого, модель управления была адаптирована для реальной среды, включающей шум, задержки сигналов и внешние воздействия, такие как ветер.

### **1.7. Задача мониторинга нефтегазодобывающих объектов**

Группа квадрокоптеров с децентрализованным управлением может быть применена для решения ряда практических задач в нефтегазовой отрасли. Производственный процесс в добыче и транспортировке нефти проходит на масштабных территориях, особенно в России, где расположены значительные большие ресурсы залежей нефти. Территория деятельности ОАО «Томскнефть» ВНК составляет более 42 тысяч кв.км. Площадь лицензионных участков - свыше 26 тысяч кв.км. Главная отличительная черта географии: разбросанность месторождений, они находятся в труднодоступных Васюганских болотах и на неосвоенных землях. Степень заболоченности Томской области достигает 37%, что требует применение современных технологий, а именно удаленной системы мониторинга: спутниковых систем и беспилотных летательных аппаратов.

На БПЛА устанавливают специальные инфракрасные и телевизионные камеры, способные обнаруживать утечки в трубопроводе нефти и газа, непроектное залегание, масляные пленки, замазученность, разлив и несанкционированные врезки.

При облёте группы квадрокоптеров получают многочисленные снимки отдельных участков, как показано на рисунке 7 для того, чтобы собрать их в

целостное изображение объектов существуют специальные программные пакеты с технологий совмещения изображений на основе данных GPS.



Рис. 7. Снимок подозрения на разлив трубопровода при облёте одиночного квадрокоптера.

В случае если площадь мониторинга окажется больше (рисунок 8), например нужно проверить целое месторождение, тогда целесообразно будет применить группу квадрокоптеров для этой цели.

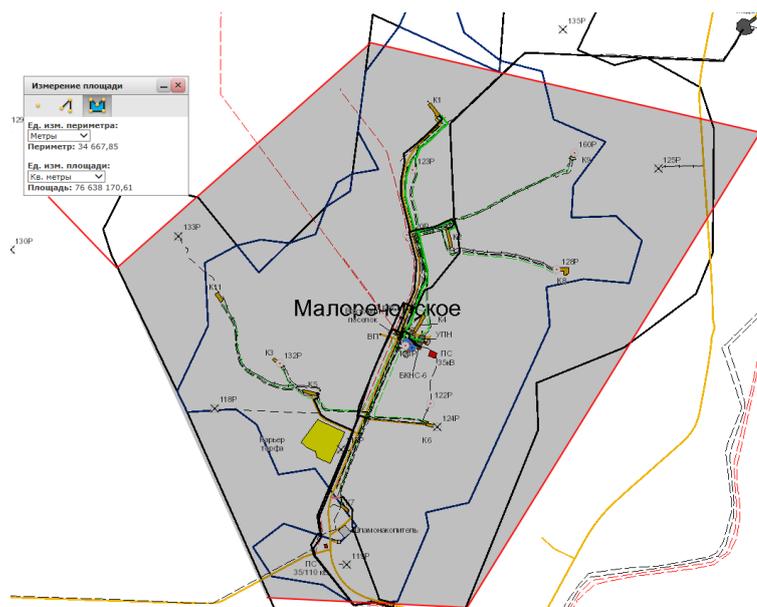


Рис. 8. Месторождение Малореченское для мониторинга квадрокоптерами.

За счет более высокого разрешения снимки с БПЛА в сравнении со снимками со спутниковых систем позволяют формировать карты с более высокой детализацией, что упрощает и повышает эффективность дальнейшей обработки. Кроме этого, задержка обновления спутниковых снимков может составить более 5 дней, а также существует вероятность недоступности снимков в определенный период из-за повышенной облачности, что является критичным в нефтегазовой отрасли. По этим причинам специализированные картографические программы с автоматизированной обработкой снимков, работающих на основе снимков с БПЛА, позволяют генерировать оповещения и предупреждения с большей достоверностью, что позволяет принимать экстренные меры для устранения аварий и утечек.

Таким образом, системы мониторинга на основе БПЛА являются менее доступными по сравнению с системами спутникового мониторинга, но более эффективными. На практике мультикоптеры среди БПЛА оказываются более востребованными, поскольку их можно использовать и для других задач, например, для слежения капитальных ремонтных работ на объектах, где требуется способность зависания в воздухе. Недостатком использования мультикоптеров в задаче мониторинга нефтегазодобывающих объектов является ограниченность времени и расстояния их полета. Покрытие масштабных площадей возможно при использовании группы квадрокоптеров, управляемой оператором как единое целое.

Рассмотрим преимущества применения группы квадрокоптеров в задаче мониторинга месторождения в сравнении с традиционным подходом, когда оператор управляет одним квадрокоптером, задавая область мониторинга (Рис. 9).

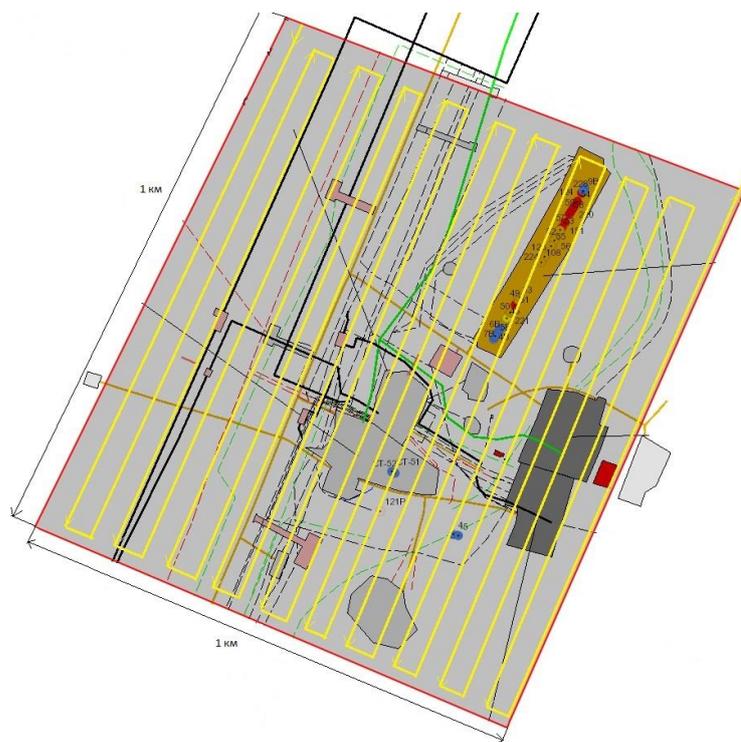


Рис. 9. Пример планирования полета мультикоптера для обследования нефтегазодобывающих объектов.

Для сравнения используем одинаковую ситуацию, когда требуется произвести мониторинг площади поля квадратной формы со стороной равной 1 км. Аэрофотосъемка такого поля может быть осуществлена индустриальным образцом квадрокоптера, оборудованным специализированной камерой (например, моделью Sony UMC-R10C). При полете на стандартной высоте в 60 м, камера с фокусным расстоянием в 50 мм и углом зрения  $45^\circ$  будет захватывать кадр с шириной в 50 м. Мониторинг может происходить при 3 м/с. Максимальное расстояние, которое может преодолеть квадрокоптер, без перезарядки аккумулятора, ограничен 4 км.

Путем несложных вычислений, можно определить, что для выполнения подобной операции одному квадрокоптеру потребуется пролететь участок туда-обратно 10 раз, что составит более 20 км пути, почти 2 часа времени без учета перезарядки и более 5 часов с учетом перезарядки. На Рис. 10 видно, что при заданных условиях мультикоптер нужно будет четыре раза направить обратно на базу для перезарядки аккумуляторов.

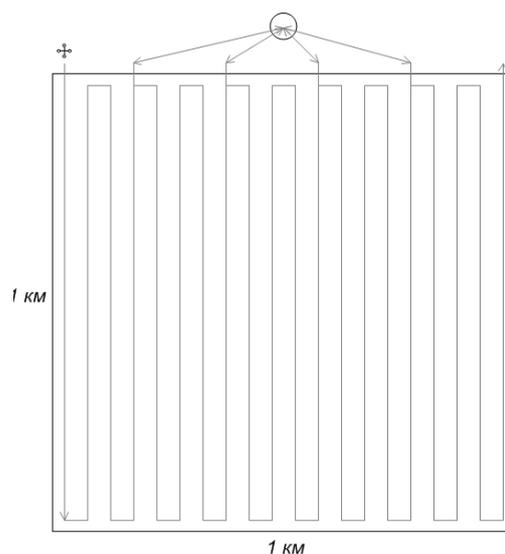


Рис. 10. Иллюстрация мониторинга нефтегазодобывающего объекта одним квадрокоптером.

В настоящее время тремя наиболее популярными коммерческими мультикоптерами в нефтегазовой отрасли являются следующие модели: 3DR Solo, senseFly eXom и DJI Phantom 4 (Рис. 11). Среди дронов с фиксированным крылом популярностью пользуются модели senseFly, eBee Ag, PrecisionHawk Lancaster и Trimble. Стоимость таких устройств может варьировать от 1,500 до 25,000 долларов США.



Рис. 11. Модель квадрокоптера DJI Phantom 4

Группа из 10 квадрокоптеров может выполнить подобную задачу значительно быстрее. Выстроившись в линию, мультиагентная система будет захватывать совокупную сцену с шириной в 500 м. В таком случае, потребуется лишь 1 раз строем пролететь поле туда-обратно, что составит около 2.5 км пути для каждого летающего агента и займет менее 15 минут времени (Рис. 12).

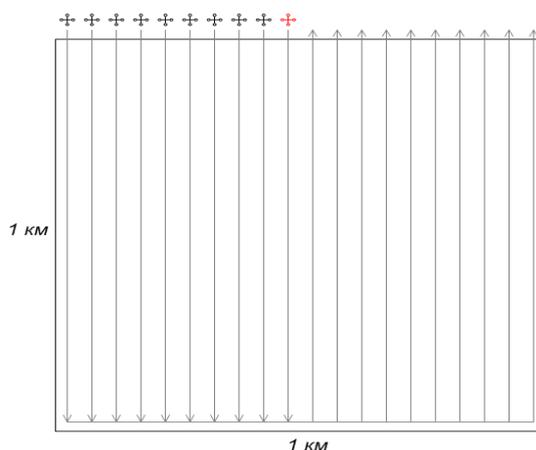


Рис. 12. Иллюстрация картирования нефтегазодобывающей площади группой квадрокоптеров.

Конечно, таких результатов можно получить, управляя 10 квадрокоптерами в отдельности и задавая каждому свой участок обработки, однако, такой подход по сравнению с групповым управлением имеет ряд недостатков.

Во-первых, это усложняет работу оператора в части необходимости задания маршрута для каждого летательного аппарата в отдельности, особенно когда будет много площадок для мониторинга.

Во-вторых, согласно правилам авиации, беспилотные летательные аппараты должны передвигаться на одной постоянной высоте, что создает угрозу столкновения.

В-третьих, усложняется задача склеивания снимков. Следовательно, групповое управление квадрокоптерами может оптимизировать процесс производственного мониторинга состоянием объектов в нефтегазовой отрасли.

### 1.8. Постановка задачи

Децентрализованное групповое управление квадрокоптерами является новым этапом развития систем управления мультикоптерами, и в силу новизны задачи и востребованности в практическом применении, является актуальной проблемой. Поэтому целью диссертационной работы является разработка способа децентрализованного управления группой автономных квадрокоптеров

для роевого и строевого движения. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Выведены уравнения движения квадрокоптера.
2. Разработан алгоритм управления движением одиночного квадрокоптера по скорости и по траектории.
3. Исследованы алгоритмы управления мультиагентными системами и выработаны критерия согласованного и безопасного движения группы квадрокоптеров.
4. Решены задачи кинематического и динамического группового управления МАС в плоскости.
5. Разработан способ децентрализованного управления квадрокоптерами в мультиагентной системе в трехмерном пространстве.
6. Создана модель системы управления и среда компьютерного моделирования.
7. Проведено компьютерное моделирование коллективного движения 10 квадрокоптеров с независимыми системами управления для проверки работоспособности разработанных алгоритмов и способов управления. В частности, апробирован способ управления в задаче мониторинг площадей нефтегазодобывающих объектов группой квадрокоптеров. Проанализированы результаты исследований на соответствие критериям согласованного и безопасного коллективного движения.

### **Выводы по первой главе**

В первой главе рассмотрены принцип полета и функциональная схема квадрокоптера, включая основные составные части летательного аппарата, в том числе датчики для связи между агентами. Проведен обзор существующих российских и зарубежных решений в области управления одиночным квадрокоптером и в области группового управления квадрокоптерами. Проанализированы достоинства и недостатки существующих решений.

Рассмотрены исследуемые режимы полета: строевое движение с сохранением геометрической топологии группы агентов и роевое движение по аналогии с поведением природных МАС.

Рассмотрены методы централизованной, децентрализованной и комбинированной стратегии управления мультиагентной системы. Приведены современные способы мониторинга нефтегазодобывающих площадей и проиллюстрирована возможность оптимизации процесса производственного мониторинга с помощью группы автономных квадрокоптеров. Определена цель и задачи диссертационной работы.

## **ГЛАВА 2. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОДИНОЧНЫМ КВАДРОКОПТЕРОМ**

### **2.1. Динамическая модель объекта управления**

#### **2.1.1. Допущения модели**

Для вывода уравнений движения квадрокоптера были приняты ряд упрощающих допущений:

- Корпус квадрокоптера абсолютно жесткий.
- Платформа летательного аппарата абсолютно симметричная: матрица инерции – диагональная.

- Угловые скорости вращения пропеллеров можно изменять моментально, пренебрегая динамикой привода с пропеллером. Такое допущение находится в соответствии с работами других авторов и связано с тем, что динамические изменения привода и пропеллера происходят значительно быстрее динамических изменений твердого тела.

- Некоторые аэродинамические эффекты не будут учтены в силу их незначительного воздействия при невысоких скоростях полета: изменение подъемной силы за счет дополнительного набегающего воздуха при полете квадрокоптера; изменение вектора подъемных сил за счет эффекта биения лопастей; сопротивление воздуха; ветер; гироскопический момент; эффект отражения потока воздуха от земли при посадке и взлете [44], [45], [46].

#### **2.1.2. Система координат и вектор состояния**

Движение квадрокоптера рассматривается с помощью двух систем координат: неподвижной системы координат (НСК), связанной с землей, и подвижной системой координат (ПСК), связанной с квадрокоптером (Рис. 13).

Начало координат ПСК совпадает с центром масс квадрокоптера, ось  $X_b$  пересекает оси пропеллеров 1 и 3, и ось  $Y_b$  пересекает оси пропеллеров 2 и 4.

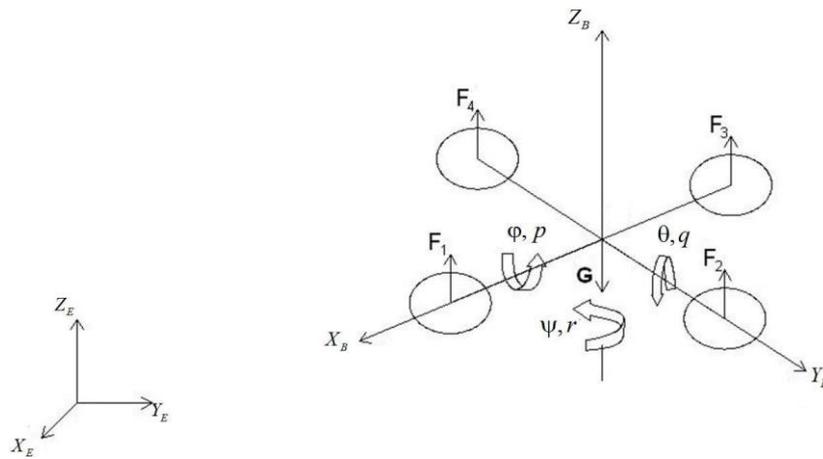


Рис. 13. Система координат и силы, действующие на квадрокоптер

Квадрокоптер имеет 6 степеней свободы: три угла и три линейные координаты центра масс. В движении квадрокоптера будем учитывать 12 параметров:

$(\varphi, \theta, \psi)$  – углы вращения;

$\Omega = (p \ q \ r)$  – вектор угловой скорости (проекции на оси ПСК);

$\mathbf{r} = (x \ y \ z)$  – вектор положения центра масс квадрокоптера;

$\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z})$  – вектор линейной скорости.

Таким образом, полный вектор состояния будет состоять из 12 параметров движения:  $\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]^T$ .

### 2.1.3. Управляющее воздействие

С учетом допущения о пренебрежении аэродинамических эффектов, на квадрокоптер действует сила тяжести  $G=mg$ , а также силы  $F_i$ , возникающие в результате разницы давления воздуха сверху и снизу  $i$ -го пропеллера, и моменты  $M_i$  (Рис. 2.1). В соответствии с теоремой Жуковского [18] подъемная сила  $F_i$  и момент  $M_i$  могут быть найдены по следующим соотношениям:

$$\begin{cases} F_i = K_F \omega_i^2 \\ M_i = \pm K_M \omega_i^2 \\ K_F = c_F \rho A R^2 \\ K_M = c_M \rho A R^3 \end{cases}$$

где  $\omega_i$  – скорость вращения пропеллера,  $\rho$  – плотность воздуха,  $R$  и  $A$  – радиус и площадь пропеллера,  $F_c$  и  $M_c$  – константы, зависящие от геометрии пропеллера.

Приведем систему сил и моментов к главному вектору и главному моменту.

$$\begin{cases} F_{z_b} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ M_{x_b} = (F_2 - F_4) * L \\ M_{y_b} = (F_3 - F_1) * L \\ M_{z_b} = M_1 - M_2 + M_3 - M_4 \end{cases}$$

где  $L$  – расстояние между центром масс и осями пропеллеров,  $F_{z_b}, M_{x_b}, M_{y_b}, M_{z_b}$  – проекции главного вектора и главного момента на оси ПСК.

Согласно допущениям динамической модели, угловые скорости вращения пропеллеров можно изменять моментально, тогда управление квадрокоптером осуществляется с помощью четырех силомоментных параметров

$$(u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4)^T = (F_{z_B} \ M_{x_B} \ M_{y_B} \ M_{z_B})^T:$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_F & K_F & K_F & K_F \\ 0 & K_F L & 0 & -K_F L \\ -K_F L & 0 & K_F L & 0 \\ K_M & -K_M & K_M & -K_M \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix}$$

#### 2.1.4. Матрица перехода

При кинематическом и динамическом анализе движения квадрокоптера используются ПСК и НСК, что вызывает потребность в преобразовании координат. Для возможности перехода из одной системы координат в другую, найдем матрицу перехода  $T_{BE}$  между ПСК и НСК [9]:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = T_{BE} * \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R_{BE} & P_{BE} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

где  $[x_e \ y_e \ z_e]^T$  и  $[x_b \ y_b \ z_b]^T$  – координаты произвольной точки в НСК и ПСК соответственно (от англ. “e” – earth, “b” - body),  $P_{BE}$  – матрица

переноса (вектор, соединяющий начало НСК и ПСК) для совмещения начал систем координат,  $R_{BE}$  – матрица поворота между ПСК и НСК для совмещения угловой ориентации в пространстве.

Матрица переноса состоит из следующих компонентов:  $P_{BE} = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ , где  $x_c \ y_c \ z_c$  – координаты положения центра масс квадрокоптера.

Отметим, что для преобразования проекций произвольного вектора из ПСК в НСК, достаточно применить матрицу поворота:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = R_{BE} * \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}$$

Найдем матрицу поворота, как матрицу сложного вращения, включающую последовательность элементарных вращений, под которыми понимаются повороты системы координат вокруг собственных осей. Матрицы поворота для элементарных вращений на угол  $\alpha$  вокруг осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (Рис. 14) имеют вид:

$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, R_Y = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}, R_Z = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Важно заметить, что указанные матрицы поворота переводят повернутую систему координат в исходную. Для обратного перевода необходимо применять другие матрицы.

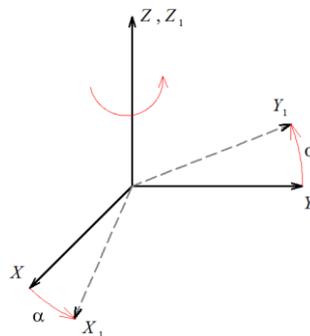


Рис. 14. Элементарное вращение на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Z$ .

Последовательность элементарных вращений для совмещения ПСК и НСК может быть разным. В зависимости от этого значения углов ( $\varphi, \theta, \psi$ ) будет отличаться. Выберем следующую последовательность элементарных вращений для перевода НСК в ПСК (Рис. 15):

1) Поворот вокруг оси  $Z$  на угол  $\psi$ :

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = R_Z(\Psi) * \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}.$$

2) Поворот вокруг оси  $Y$  на угол  $\theta$ :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = R_y(\theta) * \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = R_Z(\Psi) * R_y(\theta) * \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}.$$

3) Поворот вокруг оси  $X$  на угол  $\varphi$ :

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = R_x(\varphi) * \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = R_Z(\Psi) * R_y(\theta) * R_x(\varphi) * \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix}.$$

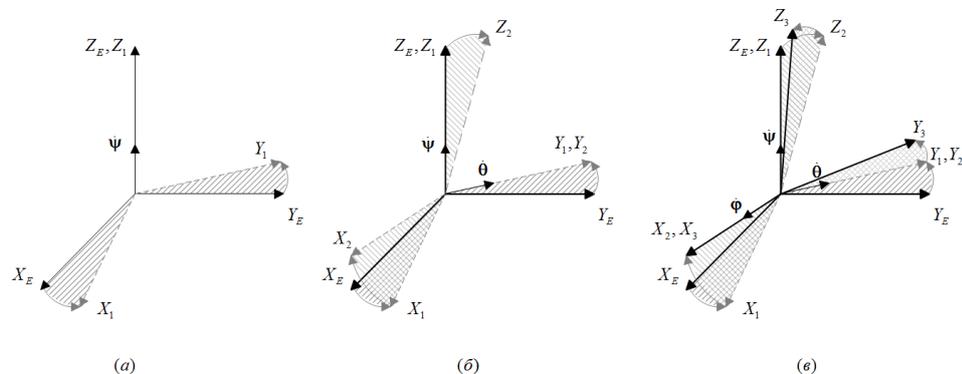


Рис. 15. Последовательность элементарных вращений вокруг оси  $Z$   $\psi$  (а), оси  $Y$  на угол  $\theta$  (б) и оси  $X$  на угол  $\varphi$  (в).

Таким образом, матрицу поворота между ПСК и НСК можно представить, как произведение матриц поворота для трех элементарных вращений в соответствующей последовательности:

$$\begin{aligned} R_{BE} &= R_Z(\Psi) * R_y(\theta) * R_x(\varphi) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Для компактности выражения используем следующее обозначение:

$\sin\alpha \rightarrow s_\alpha, \cos\alpha \rightarrow c_\alpha$ . Преумножив матрицы, получаем:

$$R_{BE} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta \\ c_\theta s_\psi & c_\varphi c_\psi + s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\varphi c_\theta \end{bmatrix}$$

Заметим, что матрица поворота в этом случае отлична от матрицы поворота Эйлера, которая получается последовательностью поворотов  $ZYZ$ . Следовательно, углы вращения  $(\varphi, \theta, \psi)$  – не являются углами Эйлера.

Переход между ПСК и НСК будет производиться следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - c_\varphi s_\psi & s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta & x_c \\ c_\theta s_\psi & c_\varphi c_\psi + s_\varphi s_\psi s_\theta & c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi & y_c \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\varphi c_\theta & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

### 2.1.5. Угловая скорость

Рассмотрим вектор угловой скорости  $\Omega$ . Очевидно, что производные углов вращения  $(\varphi, \theta, \psi)$  не равны проекциям угловой скорости  $\Omega = (p \ q \ r)$  на оси ПСК, следовательно, кинематические уравнения Эйлера не применимы. Найдем взаимосвязь между  $(\varphi, \theta, \psi)$  и  $\Omega = (p \ q \ r)$  двумя способами:

1. Первый способ основан на нахождении взаимосвязи между компонентами угловой скорости и матрицы поворота:

Пусть  $R$  – матрица поворота, переводящая ПСК в НСК. Очевидно, что  $R \cdot R^T = E$ , где  $E$  – единичная диагональная матрица. Продифференцировав данное уравнение, получаем:

$$\dot{R} * R^T + R^T * \dot{R} = 0.$$

Решение дифференциального уравнения будем искать в виде:

$$\dot{R} = \hat{\Omega} * R.$$

Подставив решение в дифференциальное уравнение, получим:

$$\hat{\Omega} * R * R^T + R * R^T * \hat{\Omega}^T = 0$$

Отсюда следует, что  $\hat{\Omega} + \hat{\Omega}^T = 0$  или  $\hat{\Omega} = -\hat{\Omega}^T$ . Таким образом,  $\hat{\Omega}$  – кососимметрическая матрица размерностью  $3 \times 3$ .

Учитывая, что  $\dot{R}$  зависит от угловых скоростей, очевидно, что  $\widehat{\Omega} = \widehat{\Omega}(\omega)$ . Следовательно, кососимметрическая матрица  $\widehat{\Omega}$  содержит проекции вектора угловой скорости на оси НСК:

$$\widehat{\Omega}(\omega) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{z_e} & \omega_{y_e} \\ \omega_{z_e} & 0 & -\omega_{x_e} \\ -\omega_{y_e} & \omega_{x_e} & 0 \end{pmatrix}$$

Найдем  $\omega_{x_e}, \omega_{y_e}, \omega_{z_e}$  из уравнения:

$$\widehat{\Omega}(\omega) = \dot{R} * R^{-1} = \dot{R} * R^T$$

Продифференцировав найденную ранее матрицу поворота между ПСК и НСК, результат произведения производной и транспонированной матрицы поворота будет следующим:

$$\begin{aligned} \widehat{\Omega}(\omega) &= \dot{R} * R^T = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & \dot{\varphi} * s_{\psi} - \dot{\Psi} & \dot{\theta} * c_{\psi} + \dot{\varphi} * c_{\theta} s_{\psi} \\ \dot{\Psi} - \dot{\varphi} * s_{\theta} & 0 & \dot{\theta} * s_{\psi} - \dot{\varphi} * c_{\theta} c_{\psi} \\ -\dot{\theta} * c_{\psi} - \dot{\varphi} * c_{\theta} s_{\psi} & \dot{\varphi} * c_{\theta} * c_{\psi} - \dot{\theta} * s_{\psi} & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Таким образом, проекции вектора угловой скорости на НСК могут быть найдены из следующих соотношений:

$$\begin{cases} \omega_{x_e} = \dot{\Psi} - \dot{\varphi} * s_{\theta} \\ \omega_{y_e} = \dot{\theta} * c_{\psi} + \dot{\varphi} * c_{\theta} s_{\psi} \\ \omega_{z_e} = \dot{\varphi} * c_{\theta} c_{\psi} - \dot{\theta} * s_{\psi} \end{cases}$$

Найдем проекции угловой скорости в ПСК:

$$\begin{aligned} [p \quad q \quad r]^T &= R^T [\omega_{x_e} \quad \omega_{y_e} \quad \omega_{z_e}]^T \\ \begin{cases} p = \dot{\varphi} - \dot{\Psi} * s_{\theta} \\ q = \dot{\theta} * c_{\varphi} + \dot{\Psi} * c_{\theta} s_{\varphi} \\ r = -\dot{\theta} * s_{\varphi} + \dot{\Psi} * c_{\theta} c_{\varphi} \end{cases} \end{aligned}$$

2. Второй способ основан на проецировании  $(\varphi, \theta, \psi)$  на оси  $X_b, Y_b, Z_b$  (или  $X_3, Y_3, Z_3$ ) ПСК (Рис. 15 (в)):

2.1. Спроецируем  $\dot{\varphi}$  на оси  $X_3, Y_3, Z_3$ :  $[\dot{\varphi}_{x_3} \quad \dot{\varphi}_{y_3} \quad \dot{\varphi}_{z_3}] = [\dot{\varphi} \quad 0 \quad 0]$ .

2.2. Спроецируем  $\dot{\theta}$  на оси  $X, Y, Z$ :

Пусть плоскость  $OY_1Y_3$  называется  $\alpha$  ( $X_3 \perp \alpha$  (Рис. 15)). Плоскость  $\alpha$  содержит в себе следующие оси:  $Y_3, Y_1, Y_2, Z_2, Z_3$ . Разложим  $\dot{\theta} = \dot{\theta}_{Y_3} + \dot{\theta}_{Z_3}$  в плоскости  $\alpha$  ( $\dot{\theta} \in \alpha$ ), где  $\dot{\theta}_{Y_3}$  и  $\dot{\theta}_{Z_3}$  проекции  $\dot{\theta}$  на оси  $Y$  и  $Z$  соответственно. Таким образом, проекции  $\dot{\theta}$  на ПСК имеют вид:

2.3. Спроецируем  $\dot{\psi}$  на оси  $X_3, Y_3, Z_3$ :

Пусть плоскость  $OZ_1Z_2$  называется  $\beta$  ( $Y_1 \perp \beta$  (Рис. 15)). Плоскость  $\beta$  содержит в себе следующие оси:  $Z_1, Z_2, X_1, X_2, X_3$ . Разложим  $\dot{\psi} = \dot{\psi}_{X_3} + \dot{\psi}_{Z_2}$  в плоскости  $\beta$  ( $\dot{\psi} \in \beta$ ), где  $\dot{\psi}_{X_3}$  и  $\dot{\psi}_{Z_2}$  - проекции  $\dot{\psi}$  на оси  $X_3$  и  $Z_2$  соответственно:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{X_3} = -\dot{\psi} * s_{\theta} \\ \dot{\psi}_{Z_2} = \dot{\psi} * c_{\theta} \end{cases}$$

Следующим шагом разложим  $\dot{\psi}_{Z_2} = \dot{\psi}_{Y_3} + \dot{\psi}_{Z_3}$  в плоскости  $\alpha$  ( $\dot{\psi}_{Z_2} \in \alpha$ ), где  $\dot{\psi}_{Y_3}$  и  $\dot{\psi}_{Z_3}$  - проекции  $\dot{\psi}_{Z_2}$  на оси  $Y_3$  и  $Z_3$  соответственно. Таким образом, проекции  $\dot{\psi}$  на ПСК имеют вид:

$$[\dot{\psi}_{X_3} \quad \dot{\psi}_{Y_3} \quad \dot{\psi}_{Z_3}] = [-\dot{\psi} * s_{\theta} \quad \dot{\psi} c_{\theta} s_{\varphi} \quad \dot{\psi} c_{\theta} c_{\varphi}].$$

Далее можем рассчитать проекции угловой скорости ( $p, q, r$ ) на ПСК по соотношениям:

$$\begin{cases} p = \dot{\varphi}_{X_3} + \dot{\theta}_{X_3} + \dot{\psi}_{X_3} \\ q = \dot{\varphi}_{Y_3} + \dot{\theta}_{Y_3} + \dot{\psi}_{Y_3} \\ r = \dot{\varphi}_{Z_3} + \dot{\theta}_{Z_3} + \dot{\psi}_{Z_3} \end{cases}$$

Вставив значения проекций  $(\dot{\varphi} + \dot{\theta} + \dot{\psi})$  на оси  $X_3, Y_3, Z_3$  ПСК, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} p = \dot{\varphi} - \dot{\psi} * s_{\theta} \\ q = \dot{\theta} * c_{\varphi} + \dot{\psi} * c_{\theta} s_{\varphi} \\ r = -\dot{\theta} * s_{\varphi} + \dot{\psi} * c_{\theta} c_{\varphi} \end{cases}$$

что находится в соответствии с аналогичным соотношением, найденным первым способом.

Следовательно, производные углов вращения и проекции угловой скорости на ПСК имеют следующую зависимость:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_{\varphi} * tg\theta & c_{\varphi} * tg\theta \\ 0 & c_{\varphi} & -s_{\varphi} \\ 0 & s_{\varphi}/c_{\theta} & c_{\varphi}/c_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

### 2.1.6. Система уравнений движения

Система уравнений движения получается из совокупности уравнения второго закона Ньютона, уравнения Эйлера и уравнения  $\hat{\Omega} = \dot{R} + R^T$  [4], устанавливающего взаимосвязь вектора угловой скорости с матрицей поворота (2.1).

Второй закон Ньютона для квадрокоптера имеет следующий вид:  $m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F} + \mathbf{G}$ , где  $\mathbf{F}$  – равнодействующая подъемная сила пропеллеров,  $\mathbf{G}$  – сила тяжести,  $m$  – масса квадрокоптера. Спроецируем на оси НСК, получим:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R_{BE} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix}$$

где  $g$  – ускорение свободного падения. Подставив матрицу поворота в уравнение, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 * (s_{\varphi} s_{\psi} + c_{\varphi} c_{\psi} s_{\theta}) \\ \ddot{y} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 * (c_{\varphi} s_{\psi} s_{\theta} - c_{\psi} s_{\varphi}) \\ \ddot{z} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 (c_{\varphi} c_{\theta}) - g \end{cases}$$

Далее рассмотрим уравнение Эйлера, описывающее вращение твердого тела, в векторном виде:

$$I_B \dot{\Omega}_B = -\Omega_B * I_B \Omega_B + \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

где  $I_B$  – тензор момента инерции,  $\Omega_B$  – вектор угловой скорости в ПСК,  $\dot{\Omega}_B$  – относительная производная вектора угловой скорости (производная в

ПСК). Согласно допущению по симметричности корпуса квадрокоптера, тензор момента инерции будет иметь вид:

$$I_B = \begin{bmatrix} I_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & I_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix}$$

где  $I_{XX}$ ,  $I_{YY}$ ,  $I_{ZZ}$  – осевые моменты инерции. Спроецируем на оси ПСК квадрокоптера:

$$\begin{aligned} I_{XX}\dot{p} &= u_2 - qr(I_{ZZ} - I_{YY}) \\ I_{YY}\dot{q} &= u_3 + pr(I_{ZZ} - I_{XX}) \\ I_{ZZ}\dot{r} &= u_4 \end{aligned}$$

Вывод системы уравнений также можно осуществить, используя закон сохранения кинетического момента для центра масс и формулу Бура [5].

Совокупность уравнений определяет закон движения квадрокоптера  $\dot{x} = f(x, u)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 * (s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta) \\ \ddot{y} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 * (c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi) \\ \ddot{z} = \left(\frac{1}{m}\right) * u_1 * (c_\varphi c_\theta) - g \\ \dot{\varphi} = p + (s_\varphi * tg\theta) * q + (c_\varphi * tg\theta) * r \\ \dot{\theta} = c_\varphi q + (-s_\varphi) * r \\ \dot{\psi} = \left(\frac{s_\varphi}{c_\theta}\right) * q + \left(\frac{c_\varphi}{c_\theta}\right) * r \\ \dot{p} = (u_2 - qr(I_{ZZ} - I_{YY}))/I_{XX} \\ \dot{q} = (u_3 + pr(I_{ZZ} - I_{XX}))/I_{YY} \\ \dot{r} = u_4/I_{ZZ} \end{array} \right.$$

Таким образом, динамическая (математическая) модель движения квадрокоптера определена в виде нелинейной системы уравнений.

## 2.2. Синтез алгоритма управления

### 2.2.1. Линейная динамическая модель

Рассмотрим вектор состояния  $x = (\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r)^T$  и нелинейную систему уравнений  $\dot{x} = f(x, u)$ . Линеаризуем её в окрестности

выбранной программной траектории – режима зависания квадрокоптера в пространстве:

$$x_d(t) = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \Psi_d \ 0 \ 0 \ 0)^T, u_d(t) = (u_h \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

где  $x_d(t)$  – программный (желаемый) вектор состояния,  $u_d(t)$  – программный вектор управления,  $\Psi_d$  – программный угол рыскания,  $u_h = mg$  – равнодействующая подъемная сила пропеллеров, равная силе тяжести.

Линеаризованную в окрестности программного движения систему уравнений будем искать в виде:

$$\Delta \dot{x} = F \Delta x + G \Delta u$$

где  $\Delta x = x - x_d$  и  $\Delta u = u - u_d$  – приращение вектора состояния и управляющего воздействия, F и G – матрицы, состоящие из значений частных производных нелинейной системы f по параметрам вектора состояния x и управляющего воздействия u в окрестности точки, соответствующему режиму, выбранному при линеаризации за исходную. Найдем частные производные нелинейной функции f:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{u_1}{m}(c_\varphi s_\psi - s_\varphi c_\psi s_\theta) & \frac{u_1}{m} c_\varphi c_\psi c_\theta & \frac{u_1}{m}(s_\varphi c_\psi - c_\varphi s_\psi s_\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_1}{m}(-c_\psi c_\varphi - s_\varphi s_\psi s_\theta) & \frac{u_1}{m} c_\varphi s_\psi c_\theta & \frac{u_1}{m}(c_\varphi c_\psi s_\theta + s_\varphi s_\psi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{u_1}{m}(s_\varphi c_\theta) & -\frac{u_1}{m}(c_\varphi s_\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \operatorname{tg}\theta(q \cdot c_\varphi - r \cdot s_\varphi) & \frac{q \cdot s_\varphi + r \cdot c_\varphi}{(c_\theta)^2} & 0 & 1 & s_\varphi \operatorname{tg}\theta & c_\varphi \operatorname{tg}\theta \\ 0 & 0 & 0 & -q \cdot s_\varphi - r \cdot c_\varphi & \frac{q \cdot s_\varphi s_\theta + r \cdot c_\varphi s_\theta}{(c_\theta)^2} & 0 & 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & 0 & 0 & q \cdot \frac{c_\varphi}{c_\theta} - r \cdot \frac{s_\varphi}{c_\theta} & 0 & 0 & 0 & \frac{s_\varphi}{c_\theta} & \frac{c_\varphi}{c_\theta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r \cdot (I_{zz} - I_{yy})}{I_{xx}} & -\frac{q \cdot (I_{zz} - I_{yy})}{I_{xx}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r \cdot (I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} & 0 & \frac{p \cdot (I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} (1/m) \cdot (s_\varphi s_\psi + c_\varphi c_\psi s_\theta) & 0 & 0 & 0 \\ (1/m) \cdot (c_\varphi s_\psi s_\theta - c_\psi s_\varphi) & 0 & 0 & 0 \\ (1/m) \cdot (c_\varphi c_\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/I_{ZZ} \end{bmatrix}$$

Тогда матрицы F и G будут следующими:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_d, \mathbf{u}_d)}{d\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g \cdot s_{\psi_d} & g \cdot c_{\psi_d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g \cdot c_{\psi_d} & g \cdot s_{\psi_d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_d, \mathbf{u}_d)}{d\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/I_{ZZ} \end{bmatrix}$$

Подставляя матрицы в уравнение и с учетом, что  $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d$  и  $\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_d$ , получаем:

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{x} &= g * (\varphi * s_{\psi_d} + \theta * c_{\psi_d}) \\ \Delta \ddot{y} &= g * (\theta * s_{\psi_d} - \varphi c_{\psi_d}) \\ \Delta \ddot{z} &= \frac{u_1}{m - g} \\ \Delta \dot{\varphi} &= p \\ \Delta \dot{\theta} &= q \\ \Delta \dot{\psi} &= r \\ \Delta \dot{p} &= \frac{u_2}{I_{XX}} \\ \Delta \dot{q} &= \frac{u_3}{I_{YY}} \\ \Delta \dot{r} &= \frac{u_4}{I_{ZZ}} \end{aligned}$$

Отметим, что линейная система уравнения (2.9) описывает движение лишь в предположении малых отклонений от заданного программного движения.

## 2.2.2. Алгоритм управления по траектории

Положение квадрокоптера, как твердого тела, в пространстве определяется 6 параметрами: три угла и три координаты центра масс. Управление траекторией квадрокоптера будем осуществлять четырьмя параметрами  $[r_T(t), \Psi_T(t)] = [x_T(t), y_T(t), z_T(t), \Psi_T(t)]$ , три координаты положения квадрокоптера и угол поворота относительно вертикальной оси (угол рыскания). Углы тангажа и крена, как видно из системы уравнений, влияют на горизонтальное ускорение объекта управления и будут рассчитываться в зависимости от заданной траектории движения  $r_T(t)$ .

Как было проиллюстрировано в обзоре принципа полета квадрокоптера, горизонтальное ускорение квадрокоптера зависит от горизонтальных составляющих равнодействующей подъемной силы, соответственно, от наклона и величины подъемной силы  $u_1$ , которая, к тому же, регулирует вертикальное ускорение квадрокоптера. Управление наклоном квадрокоптера и угловая стабилизация при этом осуществляется с помощью проекций главного момента на оси ПСК  $[u_2 \ u_3 \ u_4]$ . Таким образом, в алгоритме управления можно выделить три уровня управления (общая схема управления представлена на Рис. 16) [7]:

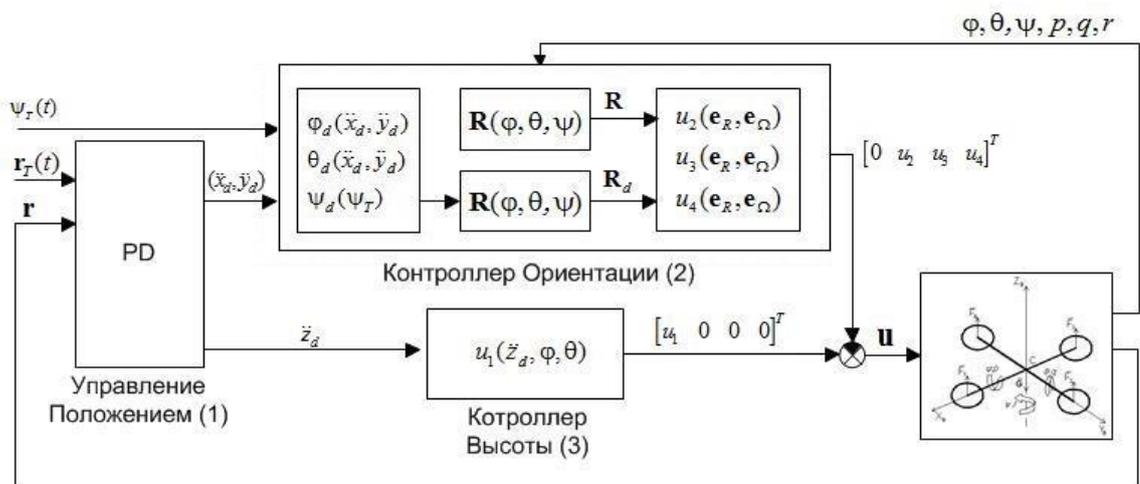


Рис. 16. Схема управления по траектории.

Первый уровень – управление положением. В этом блоке на основе обратных связей по вектору состояния и заданной  $r_T$  траектории определяются ошибки по положению и по скорости. На выходе из блока генерируется программные (желаемые на текущий момент) ускорения:

$$\begin{cases} \ddot{r}_d = \ddot{r}_T - K_p \varepsilon_p - K_d \varepsilon_d \\ e_d = \dot{r} - \dot{r}_T \\ e_p = r - r_T \end{cases}$$

где  $K_p$  и  $K_d$  – положительно определенные матрицы усиления.

Второй уровень – управление ориентацией. Входными сигналами блока является желаемое горизонтальное ускорение  $[\dot{x}_d, \dot{y}_d]$ , обратные связи по углам и угловой скорости квадрокоптера. Для нахождения желаемых углов в зависимости от желаемых ускорений воспользуемся уравнениями из линеаризованной динамической модели :

$$\begin{cases} \varphi_d = 1/g(\ddot{x}_d * s_{\psi_d} - \ddot{y}_d * c_{\psi_d}) \\ \theta_d = 1/g(\ddot{x}_d c_{\psi_d} + \ddot{y}_d s_{\psi_d}) \\ \Psi_d = \Psi_T \end{cases}$$

Следует отметить, что расчет ошибки угловой ориентации базируется на основе матрицы поворота. Такое решение основано на методах алгебры Ли и исключает возможную сингулярность в отличие от линейно-квадратичного регулятора угловой стабилизации, где осуществляется вычитание углов. На выходе «Контроллер Ориентации» формирует управляющие воздействия  $[u_2 \ u_3 \ u_4]$ . Система уравнений второго уровня управления имеет вид:

$$\begin{cases} [u_2 \ u_3 \ u_4]^T = -K_R e_R - K_\Omega e_\Omega \\ e_R = \frac{1}{2} * (R_d^T R - R_d R^T)^\sim \\ e_\Omega = \Omega - \Omega_T \end{cases}$$

где  $R_d$  – матрица поворота, рассчитанная на основе программных углов;  $R$  – матрица поворота, рассчитанная обратных связей по текущим углам  $[\varphi \ \theta \ \psi]$  ;  $^\sim$  – оператор перевода кососимметрической матрицы в  $R^3$ .

Третий уровень, управление высотой, регулирует подъемную силу в зависимости от желаемого вертикального ускорения:

$$u_1 = m * (\ddot{z}_d + g) / c_\varphi c_\theta$$

Таким образом, управляющее воздействие рассчитывается на основе уравнений.

### 2.2.3. Алгоритм управления по скорости

Алгоритм управления по скорости является частным случаем управления по траектории. Мотивацией рассмотрения такого алгоритма, является потребность в возможности оперативного управления движением квадрокоптером с помощью пульта управления. В этом случае управление квадрокоптера осуществляется следующими четырьмя параметрами –

$[V_T(t), r_T(t)] = [V_{x_T}(t), V_{y_T}(t), V_{z_T}(t), r_T(t)]$  вектор линейной скорости квадрокоптера  $V_T(t)$  и угловая скорость  $r_T(t)$  относительно вертикальной оси.

Управляющие воздействия находятся по следующему упрощенному алгоритму:

$$\begin{cases} \ddot{r}_d = \ddot{r}_T - K_d \varepsilon_d \\ [u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T = -K_R e_R - K_\Omega e_\Omega \\ u_1 = m * (\ddot{z}_d + g) / c_\varphi c_\theta \end{cases}$$

### Выводы по второй главе

Вторая глава диссертационной работы посвящена выводу системы уравнений движения квадрокоптера и разработке алгоритма управления одиночным квадрокоптером по траектории и скорости. В ходе работы получены следующие результаты:

1. Сформулированы основные допущения динамической модели.
2. Определены вектор состояния и вектор управляющего воздействия.
3. Движения квадрокоптера рассмотрена в НСК и ПСК. Для возможности перехода из одной системы координат в другую получена матрица перехода.
4. Выведена система уравнений движения квадрокоптера на основе уравнения второго закона Ньютона, уравнения, устанавливающего взаимосвязь вектора угловой скорости с матрицей поворота, и уравнения Эйлера.

5. Линеаризована динамическая модель с целью последующего использования линейных уравнений движения в алгоритме управления.

6. Разработан алгоритм управления одиночным квадрокоптером по траектории с использованием ПД регулятора.

7. Разработан алгоритм управления одиночным квадрокоптером по скорости.

## ГЛАВА 3. ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ

### 3.1. Общие принципы в управлении мультиагентной системой

В диссертационной работе вышеприведенные принципы были обобщены в виде структуры требований и критериев для оценки качества коллективного движения и способа группового управления.

Первое требование заключается в том, что способ децентрализованного управления агентом должен соответствовать 6 критериям: безопасность, сплоченность, локальность, масштабируемость, децентрализация, взаимозаменяемость. Суть каждого критерия представлено в Таблице 5.

Таблица. 5. Набор критериев для оценки качества группового движения.

№	Критерий	Определение
1	Безопасность	Агенты держатся на безопасном расстоянии друг от друга.
2	Сплоченность	Двигаются на относительно близких и схожих дистанциях.
3	Локальность	Агенты получают лишь локальную информацию в зоне слышимости, которая определяется дальностью связи.
4	Масштабируемость	Алгоритм работает вне зависимости от количества агентов.
5	Децентрализация	Каждый агент имеет свою независимую систему управления.
6	Взаимозаменяемость	Агенты взаимозаменяемы. Допускается потеря или приобретение новой связи.

Оценка критерия сплоченности будет производиться в зависимости от расстояний между агентами. В данном случае, чем компактнее движется группа квадрокоптеров, тем она более сплочённая. В качестве оценки сплоченности

будем использовать среднеарифметическое расстояние до ближайшего соседнего агента с допустимым среднеквадратическим отклонением:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(t) \pm \sigma(t)$$

где  $d_i(t)$  – расстояние от  $i$ -го агента до ближайшего агента, как функция от времени,  $n$  – количество агентов в группе,  $\sigma(t)$  – среднеквадратичное отклонение. Для соблюдения критерия сплоченности поставим ограничения:

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(t) < d_c \\ \sigma(t) < \sigma_0 \end{cases}$$

где  $d_c$  – максимально допустимое среднеарифметическое расстояние до ближайшего агента,  $\sigma_0$  – максимально допустимое среднеквадратическое отклонение. Очевидно, что должно выполняться неравенство:  $d_c - \sigma_0 > d_s$ .

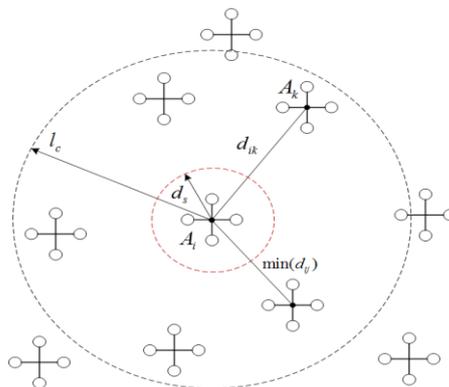


Рис. 17. Ограничения согласно критериям безопасности и локальности.

В качестве условия критерия локальности поставим ограничение на радиус связи  $l_c$  каждого агента, в пределах которого может обмениваться информацией с другими агентами.

Второе требование заключается в том, что МАС, состоящая из квадрокоптеров, должна быть способна осуществлять групповой полет в трехмерном пространстве в двух режимах: режим строевого движения и режим «роевого движения» (Рис. 18).

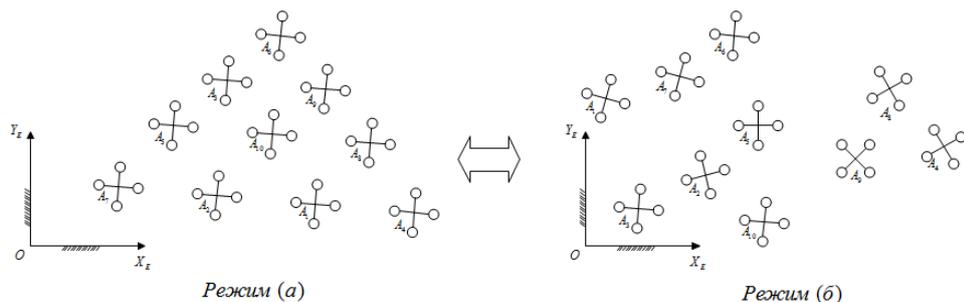


Рис. 18. Иллюстрация режимов строевого движения в формации «клин» (режим (а)) и «роевого движения» (режим (б)).

Третье требование является условием смешанной стратегии управления группой квадрокоптеров и заключается в том, чтобы предусмотреть возможность для оператора выбирать одного произвольного агента для удаленного управления по траектории или по скорости с координационного центра. В режиме роевого движения МАС такой подход позволит влиять на поведение группы «изнутри» с помощью агента, управляемого оператором.

### 3.3.1. Методы строевого управления

Первый подход основан на применении теории жесткости графов [29], [52]. Целевая структура строя задается с помощью графа, вершины которого соответствуют желаемому расположению агентов, а ребра – целевым расстояниям  $r_0^{ij}$  между парами агентов. Таким образом, каждый агент, зная координаты соседних агентов, стремится соответствовать набору пространственных ограничений  $r^{ij}(t) \rightarrow r_0^{ij}$  при движении строем, при условии, что система ограничений является осуществимой. Недостатками данного подхода являются негибкость, невозможность задавать ориентацию строя относительно направления движения, риск нарушения свойств жесткости графа при выходе из строя ведущего агента.

Второй подход основан на правилах, предполагающих приведение к единому значению определенного параметра состояния агента путем усреднения [49]. Одной из задач поиска является задача «рандеву»,

закрывающееся в сборе всех агентов в одной точке. Задача «рандеву» со сдвигом является модификацией задачи сбора в одной точке и предполагает построение геометрической структуры, которая задается кососимметрической матрицей сдвигов  $b_{ij}$ .

Третий подход связан с применением виртуальных формаций/лидеров [38],[41]. Ключевая идея заключается в том, что каждый агент следует за некоторой точкой (виртуальным лидером), движущимся по определенному закону движения, координаты которой рассчитываются в центре управления и передаются агенту посредством связи.

### 3.3.2. Методы роевого управления

Первое правило «Сплоченность» заключается в том, что агенты стараются держаться как можно ближе друг к другу.

Второе правило «Разделение» обеспечивает, чтобы агенты стремились разойтись и сохранить безопасное расстояние друг от друга.

Третье правило «Выравнивание скоростей» заключается в том, что агенты из одной группы стремятся двигаться с одинаковой скоростью (Рис. 19).

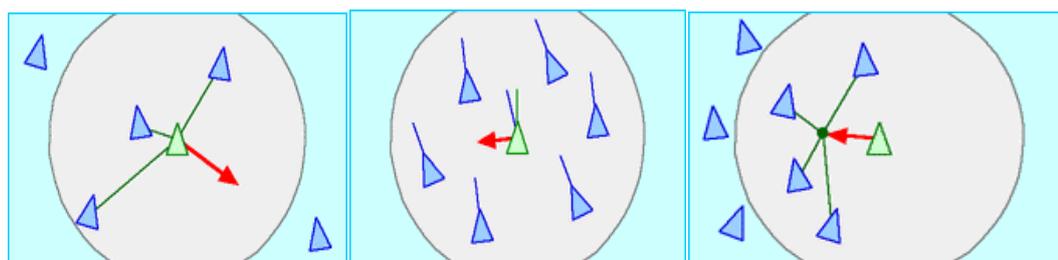


Рис. 19. Визуализация трех правил К. Рейнольдса (слева – направо): «Разделение», «Выравнивание скоростей», «Сплоченность».

Сегодня одним из наиболее распространённых способов для решения задачи «стаяного» движения является метод потенциальных функций. Суть метода заключается в том, что закон управления агентом определяется на основе искусственных сил, зависящих от потенциальной функции или потенциальных силовых полей, которые приводят либо к притяжению агентов,

либо отталкиванию. Управляющее воздействие при этом может рассчитываться по следующему закону:

$$u_i = \sum_{r_{ij} > r_0} c_1 * r_{ij} + \sum_{r_{ij} \leq r_0} \frac{c_2 * r_{ij}}{r_{ij}^2}$$

где  $r_{ij}$  – вектор расстояния между  $i$ -м и  $j$ -м агентом,  $c_1$  и  $c_2$  – настраиваемые константы метода,  $r_0$  – радиус силового поля (при  $r_{ij} \leq r_0$  агенты отталкиваются, при  $r_{ij} > r_0$  агенты притягиваются).

### 3.3.3. Модификация алгоритма Крейга Рейнольдса

За основу алгоритма децентрализованного управления в МАС были взяты правила К. Рейнольдса. Модель Рейнольдса применимо в случаях, когда допустимо «роевое» поведение группы. При необходимости движения агентов с заданной геометрической топологией, требуется модификация алгоритма. Исходя из этого, добавим определение «Формация» (Рис. 20) для обеспечения строевого движения, подобно системе из материальных точек связанных упругими пружинами. В такой модели при отклонении материальной точки, возникают силы, возвращающие его в исходную позицию, сохраняя геометрическую топологию.

Очевидно, что агент, как твердое тело, в отличие от материальной точки, кроме координат положения, имеет угловую ориентацию.

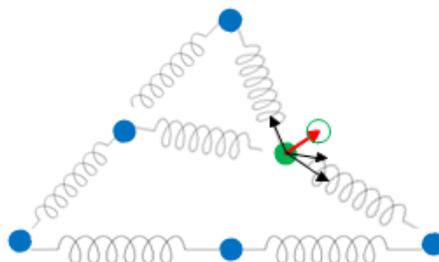


Рис. 20. Иллюстрации возникновения упругих сил при отклонении (правило «Формация»).

Важно отметить, что существуют ограничения по применению модифицированного алгоритма для некоторых видов строя, связанные с особенностями пружин.

### 3.3.4. Плоская кинематическая задача

Рассмотрим МАС, состоящую из идентичных агентов со следующим вектором состояния и управляющим воздействием:

$$\begin{cases} x = [x & y & \varphi] \\ u = [V_x & V_y & \omega] \end{cases}$$

где  $x$  и  $y$  – координаты агента,  $V_x$  и  $V_y$  – проекции скорости агента на ПСК,  $\varphi$  и  $\omega$  – угол и угловая скорость вокруг собственной оси. Уравнения движения для агента имеет вид:  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{u}$ .

Каждый агент получает информацию о положении других агентов, находящихся в его зоне слышимости. На основе этого агент регулирует скорость движения в соответствии модифицированному алгоритму Рейнольдса (Рис. 21).

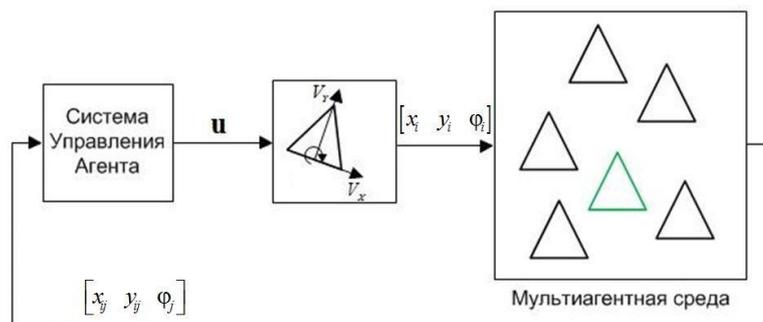


Рис. 21. Кинематическое управление агентом при двумерном групповом движении.

Управляющее воздействие по скорости для произвольного  $i$ -го агента зададим как сумму четырех корректирующих компонентов, соответствующих четырем правилам:  $u = q_v + q_c + (1 - \gamma) * q_{P_1} + \gamma * Q_{P_2}$  где  $q_v, q_c, q_{P_1}, Q_{P_2}$  – компоненты управления согласно соответствующим правилам «Выравнивание скорости», «Разделение», «Сплоченность», «Формация». Параметр  $\gamma$  определяет режим полета группы: 0 – роевое движение, 1 – строевое движение. В развернутом виде управляющие сигналы рассчитываются по следующим уравнениям:

$$\begin{cases} u_1 = k_V V_{C_i x} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{min}, |x_{ij}| < l_{min}} \left( -\frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} (l_{min} - |x_{ij}|) \right) + (1-\gamma)k_R r_{C_i x} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{P_x} \\ u_2 = k_V V_{C_i y} + k_C \sum_{|r_{ij}| < l_{min}, |y_{ij}| < l_{min}} \left( -\frac{y_{ij}}{|y_{ij}|} (l_{min} - |y_{ij}|) \right) + (1-\gamma)k_R r_{C_i y} + \gamma k_{P_2} \varepsilon_{P_y} \\ u_3 = k_\varphi ((1-\gamma)(\bar{\varphi} - \varphi_i) + \gamma \varepsilon_\varphi) \end{cases}$$

где  $k_V, k_C, k_R$  – коэффициенты усиления,  $k_{P_2}$  – коэффициент жесткости пружины,  $r_{C_i}$  и  $v_{C_i}$  – вектор положения и скорости центра масс группы агентов в зоне слышимости и системе координат  $i$ -го агента,  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$  – проекции расстояния до соседнего  $j$ -го агента,  $l_{min}$  – минимально безопасное расстояние между агентами,  $\varepsilon_P$  – ошибка текущего положения агента относительно заданного.

### 3.4.1. Плоская динамическая задача

Далее решим плоскую динамическую задачу группового управления. Рассмотрим аналогичную МАС, состоящую из идентичных агентов со следующим вектором состояния и управляющим воздействием:

$$\begin{cases} x = [x \quad y \quad \varphi \quad V_x \quad V_y \quad \omega] \\ u = [V_x \quad V_y \quad \omega] \end{cases}$$

где  $F_x$  и  $F_y$  – проекции равнодействующей силы на оси локальной системы координат агента,  $L_z$  – момент вокруг оси  $Z$  (Рис. 22). Уравнения движения агента будет иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (1/m)F_x \\ \ddot{y} = (1/m)F_y \\ \ddot{\varphi} = (1/I_{ZZ})L_z \end{cases}$$

где  $m$  – масса агента,  $I_{ZZ}$  – момент инерции вокруг оси  $Z$ .

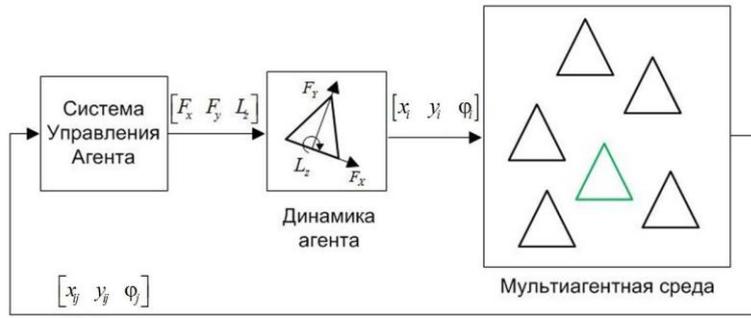


Рис. 22. Динамическое управление агентом при двумерном групповом движении.

Управляющее воздействия по ускорению вычисляется аналогичным образом с учетом динамических свойств:

$$u = [m \quad m \quad 0]^T * (q_v + q_c) [m \quad m \quad I_{zz}]^T * ((1 - \gamma) * q_{P_1} + \gamma * m q_{P_2})$$

На Рис. 23 представлена схема управления,  $P_{2 \times q_N}^B = [r_{ij}]_{2 \times q_N}$  – матрица координат соседних агентов в ПСК рассматриваемого  $i$ -го агента,  $q_N$  – количество соседних агентов в зоне слышимости  $i$ -го агента.

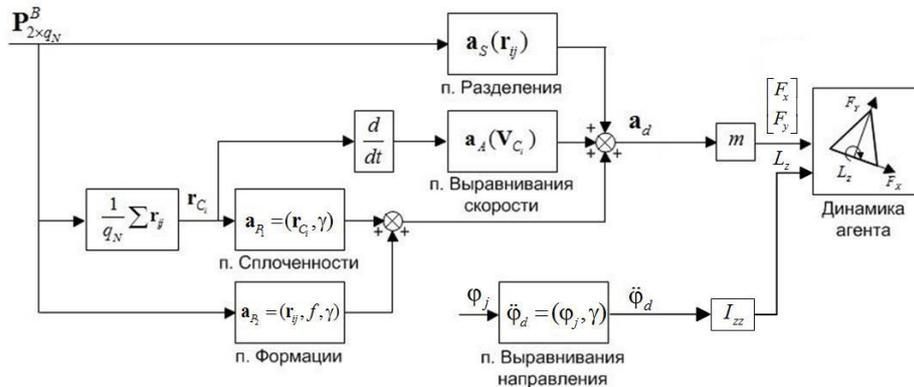


Рис. 23. Схема управления по ускорению на базе модифицированных правил Рейнольдса.

Компьютерная апробация способа динамического управления плоской МАС, результаты которой приведены в четвертой главе, продемонстрировала работоспособность алгоритма.

### 3.4.2. Трехмерная динамическая задача

Рассмотрим движение ограниченного количества идентичных квадрокоптеров  $A_1, A_2, \dots, A_n$  с управляющим воздействием

$(u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4)^T = (F_{Z_B} \ M_{X_B} \ M_{Y_B} \ M_{Z_B})^T$ , уравнением движения (2.7) и вектором состояния  $x = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \varphi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]$ , помещенных во внешнюю среду  $E$  для коллективного выполнения миссий, задаваемых оператором на стратегическом уровне. Пусть количество агентов  $n$  будет равно 10 (Рис. 24). В момент времени  $t_0$  агенты имеют начальные координаты  $r_1(t_0), r_2(t_0), \dots, r_{10}(t_0)$ .

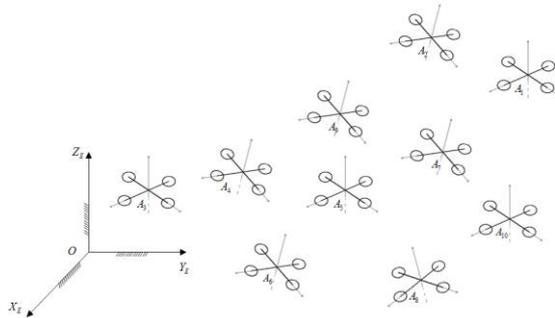


Рис. 24. Иллюстрация мультиагентной системы, состоящей из 10 одинаковых летающих агентов.

Оператор выбирает режим поведения квадрокоптера (Рис. 25): при  $h=1$  включается режим лидера, тогда управление по скорости или по траектории производится оператором, при  $h=0$  включается режим ведомого, тогда агент полностью автономен и регулирует своё движение в соответствии с модифицированными правилами Рейнольдса, внешней средой и режимом движения группы.

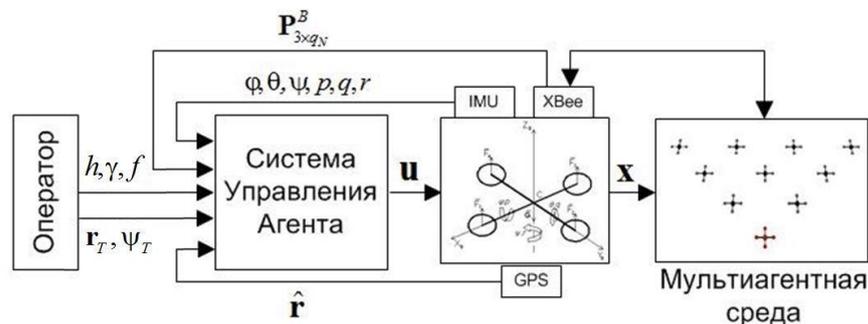


Рис. 25 Взаимодействие квадрокоптера с внешней средой.

Оператор также может назначать режим полета группы  $\gamma$  (строевое или роевое) и тип строя  $f$  (клин, колонна, круг, др.).

В основе алгоритма управления квадрокоптером в МАС (Рис. 26) лежат ранее разработанные модули управления одиночным квадрокоптером и модуль управления агентом в МАС в плоской динамической задаче.

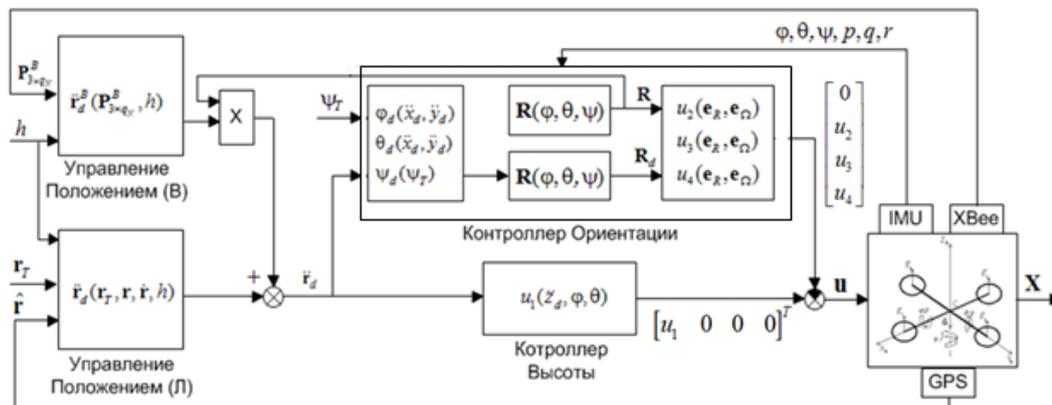


Рис. 26. Схема управления квадрокоптером в МАС.

Квадрокоптер в зависимости от режима  $h$  («ведомый» или «лидер») переключает блок управления положением. Если квадрокоптер является лидером, то включен блок управления (Л), где выходной сигнал формируется согласно закону управления одиночным квадрокоптером. Если же квадрокоптер является ведомым, то включен блок управления (В) и желаемое ускорение формируется по аналогии уравнения для плоской динамической задачи с учетом перехода в трехмерное пространство:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_d^B = \mathbf{a}_V + \mathbf{a}_C + (1-\gamma)\mathbf{a}_R + \gamma\mathbf{a}_{B_2} + \mathbf{K}_d \varepsilon_d \\ \mathbf{a}_V = \mathbf{K}_V \mathbf{V}_C \\ \mathbf{a}_C = \mathbf{K}_C \sum_{|r_{ij}| < l_{\min}} \left( -\frac{\mathbf{r}_{ij}}{|r_{ij}|} (l_{\min} - |r_{ij}|) \right) \\ \mathbf{a}_R = \mathbf{K}_R (1-\gamma)\mathbf{r}_C \\ \mathbf{a}_{B_2} = \mathbf{K}_{B_2} \gamma \varepsilon_P \end{cases}$$

Результаты компьютерной апробации способа управления трехмерной МАС, состоящей из автономных квадрокоптеров, в том числе в задаче

мониторинга площадей нефтегазодобывающих объектов приведены в четвертой главе и демонстрируют работоспособность алгоритма.

### **Выводы по третьей главе**

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке децентрализованного способа группового управления группой автономных квадрокоптеров. В ходе работы получены следующие результаты:

1. Приведены общие принципы в управлении МАС и сформулированы требования и критерия для оценки качества коллективного движения и способа группового управления.

2. Проведен обзор методов строевого управления и роевого управления.

3. Произведена модификация алгоритма К. Рейнольдса для возможности движения строем и изменения ориентации геометрической структуры МАС относительно направления движения.

4. Решена плоская задача кинематического децентрализованного управления МАС.

5. Решена плоская задача динамического децентрализованного управления МАС.

6. Решена трехмерная задача децентрализованного управления квадрокоптером в МАС в режиме строевого и роевого движения.

## ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Четвертая глава посвящена разработке моделей системы управления и среды моделирования, а также анализу результатов компьютерной апробации алгоритма управления одиночным квадрокоптером и способа децентрализованного управления группой квадрокоптеров.

### 4.1. Экспериментальный образец

Для компьютерного моделирования использовался прототип существующего квадрокоптера с размахом в  $\frac{1}{2}$  метра и следующими масс-инерционными и геометрическими характеристиками:

$$\begin{cases} \mathbf{I} = \text{diag}(0.002352, 0.002352, 0.004704) \\ m = 0.32 \text{ кг} \\ L = 0.209 \text{ м} \end{cases}$$

где  $\mathbf{I}$  – тензор инерции,  $m$  – масса квадрокоптера,  $L$  – расстояние между центром масс и осями пропеллеров.

Кроме датчиков IMU и GPS для определения угловой ориентации и местоположения в глобальной системе координат, экспериментальный квадрокоптер оборудован радио-модулем для получения команд от оператора и обмена информацией с другими летательными аппаратами, а также установлена бортовая камера. Шумы и задержка сигналов в датчиках, возникающих при реальных условиях, в большинстве экспериментов не учитывались.

Следует отметить, что в соответствии с параметрами существующих квадрокоптеров были установлены ограничения по максимальному значению подъемной силы, по скорости – не более 10 м/с, радиусу связи – в пределах 100 метров, времени полета – не более 40 минут.

В среде кинематического и динамического моделирования Universal Mechanism квадрокоптер был задан как твердое тело согласно вышеприведенным параметрам.

#### 4.2.1. Разработка модели системы управления и среды моделирования

Модель системы управления была построена в Matlab на основе соотношений (2.10-2.12) и схемы управления на Рис. 2.4. Матрицы усиления были подобраны экспериментально:

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(2,2,2), \mathbf{K}_d = \text{diag}(2,2,2), \mathbf{K}_R = \text{diag}(20,20,20), \mathbf{K}_\Omega = \text{diag}(5,5,5);$$

В качестве среды моделирования использовался UM, где было помещено твердое тело с характеристиками экспериментального образца квадрокоптера. Силы, действующие на квадрокоптер, были заданы в соответствии с математической моделью движения квадрокоптера. Значения управляющих сигналов  $(F_z \ M_x \ M_y \ M_z)^T$  генерировались в программном пакете MatLab на основе обратных связей по вектору состояния из UM.

#### 4.2.2. Подключение модели системы управления и среды моделирования

С MatLab была установлена двухсторонняя связь UM (Рис. 27) для осуществления динамического и кинематического моделирования.

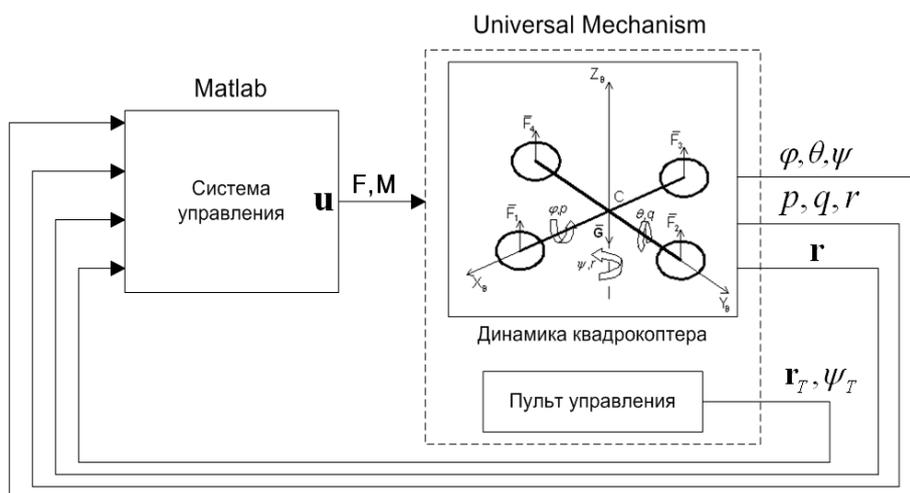


Рис. 27. Схема подключения «Matlab» и «Universal Mechanism»

Среди параметров, передаваемых из UM  $\rightarrow$  Matlab, числятся углы вращения, проекции угловой скорости на ПСК и вектор положения квадрокоптера.

### 4.2.3. Постановка экспериментов и результаты моделирования

В ходе компьютерного моделирования управления движением одиночного квадрокоптера по траектории и по скорости были исследованы различные режимы полета. Рассмотрим два режима:

Первый режим полета – движение по точкам (Рис. 28). С помощью пульта управления в УМ была задана следующая траектория движения:

$$[\mathbf{r}_T(t), \psi_T(t)] = \begin{cases} [1, 1, 3, 0] & \text{при } t \in [0; 6] \\ [2, -1, 1, 0] & \text{при } t \in (6; 100] \end{cases}$$

Второй режим полета – движение по окружности с радиусом 5 метров под наклоном  $45^\circ$  относительно горизонтальной плоскости (Рис. 28).

С помощью пульта управления в УМ была задана следующая траектория движения:

$$\begin{cases} x_T(t) = 5 \sin(0.628t) \\ y_T(t) = 5 \cos(0.628t) + 5 \\ z_T(t) = 5 \cos(0.628t) + 5 \\ \psi_T(t) = 0 \end{cases}$$

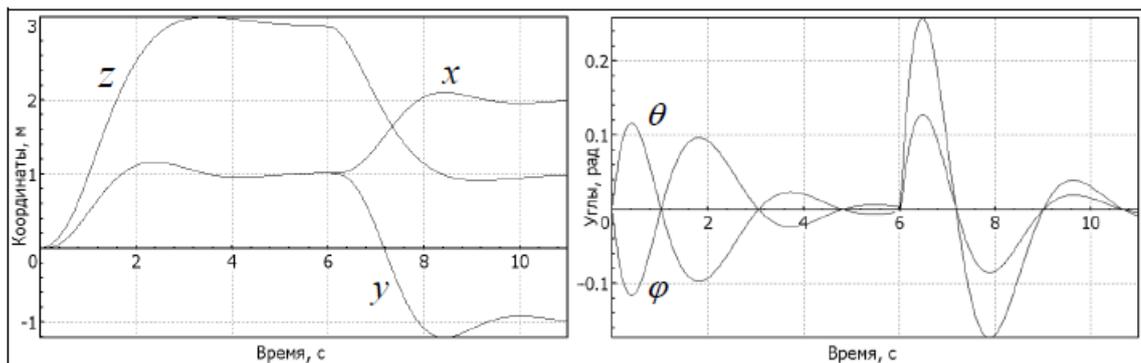


Рис. 28. Выполнение траектории: движение по точкам.

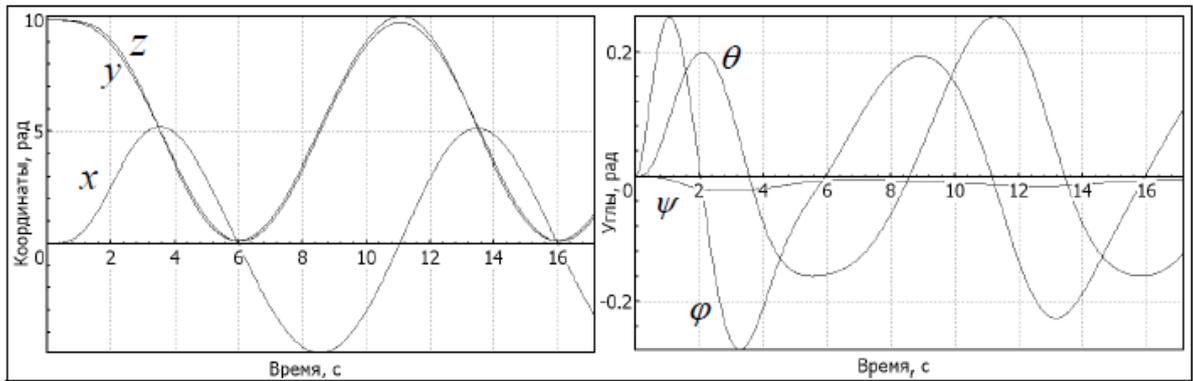


Рис. 29. Выполнение траектории: окружность под наклоном.

В обоих экспериментах начальные условия были нулевыми. Результаты моделирования, представленные на Рис. 28 и Рис. 29, демонстрирует работоспособность алгоритма управления движением одиночного квадрокоптера.

#### 4.4.1. Разработка модели системы управления и среды моделирования

В Universal Mechanism агенты были заданы, как твердые тела с массой 1 кг и тензором инерции  $I_a = \text{diag}(1,1,1)$ , движение которых ограничено в плоскости.

Модель системы кинематического управления была построена в Matlab на основе соотношений. Аналогичным образом была построена модель системы динамического управления на основе соотношений и схемы управления на Рис. 29. Коэффициенты усиления были подобраны экспериментально:  $k_V = 1, k_c = 15, k_{P_1} = 20, K_{P_2} = 5$ . Безопасное расстояние между агентами  $l_{\min}$  было установлено равным 1.5 метра. Скорость движения была ограничена 10 м/с.

Подробная иллюстрация среды моделирования UM и модели системы управления Matlab для кинематического и динамического управления МАС в плоскости приведена в Приложении П2.

#### 4.4.2. Постановка экспериментов и результаты моделирования

Экспериментальные исследования методов кинематического и динамического управления агентов в МАС проводились при различных штатных режимах группового движения в плоскости.

Рассмотрим сначала пример кинематического управления в режиме строевого движения группы из 6 агентов в формации «клин», когда лидеру задана плоская синусоидальная траектория:

$$\begin{cases} y_L = 3 \sin(1.5t) \\ x_L = 4t \end{cases}$$

Расположение агентов в системе координат лидера в формации «клин» было следующей:

$$\mathbf{D}_L = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{16} \\ y_{11} & y_{12} & \dots & y_{16} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -2 & -2 & -2 \\ 0 & -1 & -2 & -2 & 0 & 2 \end{bmatrix}^T$$

где  $x_{i1}$  и  $y_{i1}$  – координаты  $i$ -го агента в системе координат лидера. Для каждого агента были заданы параметры строя (расположение соседних агентов) в собственной системе координат.

Результаты компьютерного моделирования вышеприведённого примера представлены на Рис. 30 и Рис. 31.

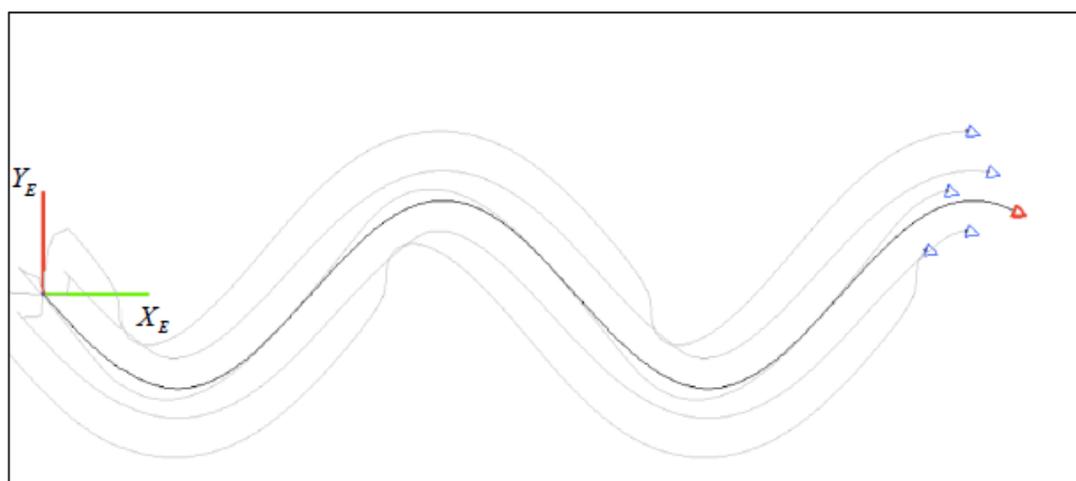


Рис. 30. Фазовая траектория строевого движения шести агентов при кинематическом управлении.

Черным цветом на Рис. 30 представлена траектория лидера, серым – траектория ведомых агентов, которые успешно сохраняют форму строя в процессе движения: среднее отклонение положения агента в группе относительно лидера составляет 0.2 м (Рис. 31). Безопасное расстояние между агентами было соблюдено.

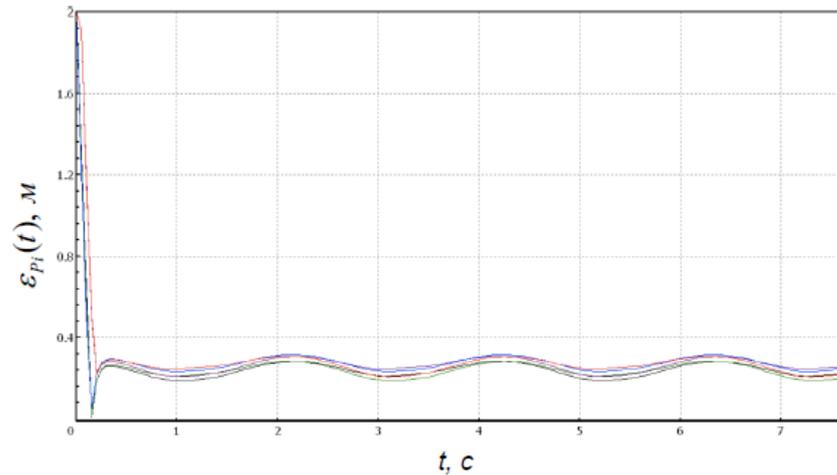


Рис. 31. Отклонение агентов от заданной позиции в строю при кинематическом управлении.

Можно заметить, что ошибка по положению в строю дальних от лидера агентов незначительно выше.

Теперь рассмотрим строевое движение в плоскости, когда управляющее воздействие и вектор состояния агентов имеют вид:

$$\begin{cases} x = [x & y & \varphi & V_x & V_y & \omega] \\ u = [F_x & F_y & F_z] \end{cases}$$

Для плоской динамической задачи рассмотрим пример движения аналогичной группы из шести в формации «клин». Результаты компьютерного моделирования представлены на Рис. 32 и Рис. 33. Управление лидером в примере осуществляется оператором с помощью пульта управления, представленном на Рис. 32.

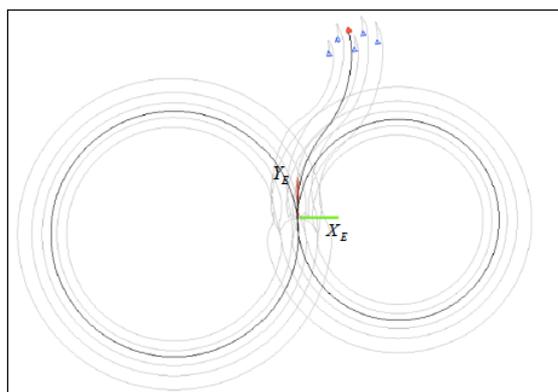


Рис. 32. Фазовая траектория строевого движения шести агентов с учетом их динамики.

Следующим шагом исследуем влияние возможных шумов в датчиках на способ децентрализованного группового управления. На Рис. 33 видно, что под влиянием зашумления сигналов, агенты описывает менее ровный круг по сравнению с предыдущим примером.

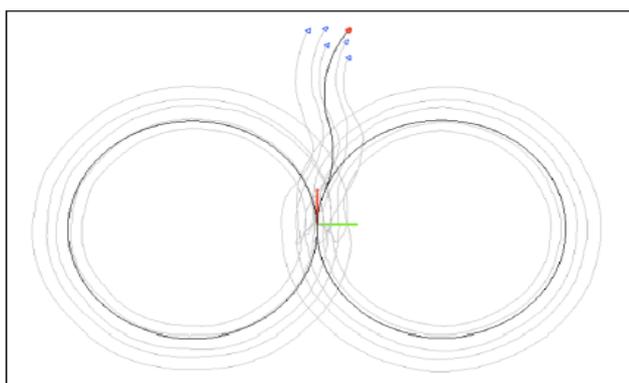


Рис. 33. Фазовая траектория строевого движения шести агентов при зашумлении сигналов по координатам.

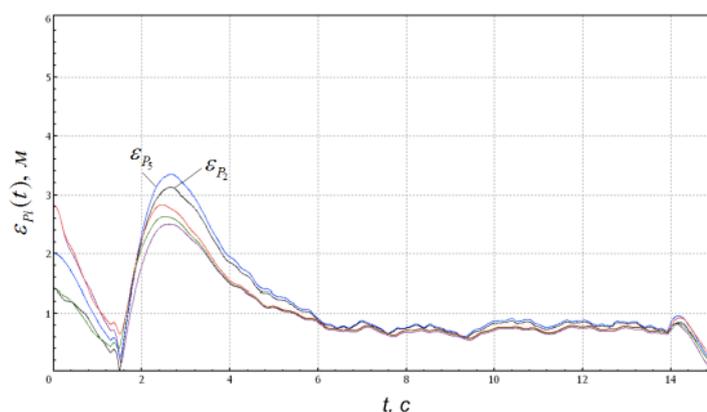


Рис. 34. Отклонение агентов от заданной позиции в строе при зашумлении сигналов по координатам.

На Рис. 34 видно, что ошибка траектории ведомых агентов от желаемой траектории значительно увеличилось сравнительно с предыдущим примером. Другим отличием является то, что наибольшее отклонение от желаемой траектории имеют агенты  $i=2$  и  $i=5$ , у которых показания датчиков были подтверждены шуму.

#### 4.5.1. Подключение модели системы управления и среды моделирования

Аналогично моделированию движения одиночного квадрокоптера, для моделирования движения группы автономных квадрокоптеров была установлена двухсторонняя связь между средой моделирования UM и 10 идентичными моделями Matlab (Приложение ПЗ), реализующие децентрализованное управление квадрокоптером. При этом из UM в Matlab передавались такие параметры, как координаты, скорость и угловые параметры агента, а также координаты и угол рыскания соседних агентов в ПСК искомого агента (Рис. 35).

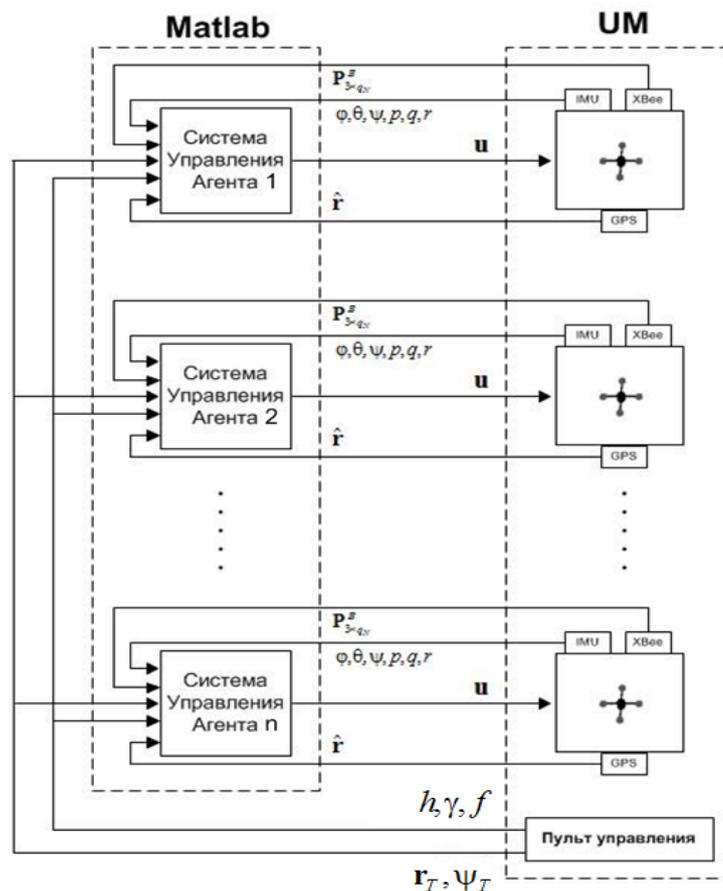


Рис. 35. Схема подключения «Matlab» и «Universal Mechanism»

#### 4.5.2. Постановка экспериментов и результаты моделирования

В ходе компьютерного моделирования были исследованы различные штатные режимы группового полета квадрокоптеров.

На графике (Рис. 36) представлены результаты моделирования группового движения квадрокоптеров в режиме полета строем в форме клина, когда лидеру задана плоская синусоидальная траектория с амплитудой 5 метров:

$$\begin{cases} x_L = 5 \sin(0.5t) \\ y_L = 0.5t \\ z_L = 0 \end{cases}$$

Группа из 10 квадрокоптеров при средней скорости 3.5 м/с продемонстрировала сплоченное коллективное движение: среднеарифметическое расстояние между агентами колебалось около  $d_{ij} = 1.8$ м при максимальном за время полета среднеквадратичном отклонении  $\max \sigma(t) = 1$ м. Сближение агентов происходило на поворотах.

Критерий безопасности также был соблюден: минимальная дистанция между парой агентов  $\min(d_{ij}) > 1.4$  м.

В режиме роевого движения, когда каждый агент стремится в центр масс соседних агентов, риск столкновения возрастает. Тем не менее, управляя лидером по скорости, попытка оператора столкнуть с другим квадрокоптером не удалась.

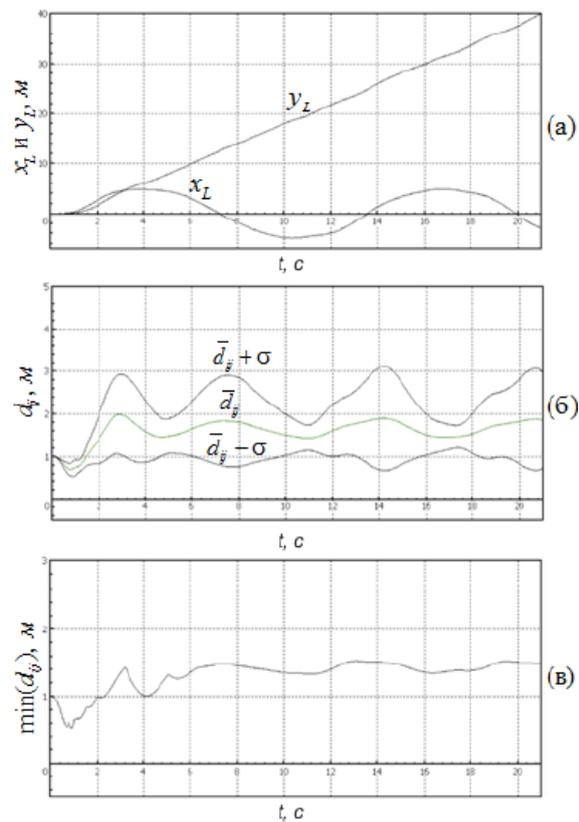


Рис. 36. Оценка критериев сплоченности и безопасности группового движения: (а) – траектория лидера, (б) – среднее и среднеквадратичное отклонение между агентами за время полета, (в) – минимальное расстояние между парой агентов за время полета.

Теперь рассмотрим моделирование ранее обозначенной задачи мониторинга площадей нефтегазодобывающих объектов группой квадрокоптеров. Результаты компьютерного моделирования мониторинга объектов площади размером 200 кв. метров с помощью 10 квадрокоптеров в режиме строевого движения представлены на Рис. 37 (черным цветом указана траектория лидера) и Рис. 38. Каждый агент при этом пролетел 900м: вперед 200м, направо 500м и назад 200м. Время выполнения задачи составило около 3-х минут, что подтверждает ранее приведенные расчеты по скорости группы мультикоптеров.

Для захвата большей ширины кадра, группа квадрокоптеров была выстроена в линию с расстоянием 50 м между агентами. Для данного примера

сделано допущение, что дальность связи агентов может достигать 500 метров. Таким образом, все квадрокоптеры получали координаты лидера и регулировали свою позицию относительно ведущего него.

Для каждого агента в собственной системе координат было задано взаимное расположение относительно других агентов. Расположение агентов в системе координат лидера имел вид:

$$\mathbf{D}_L = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{110} \\ y_{11} & y_{12} & \dots & y_{110} \\ z_{11} & z_{13} & \dots & z_{110} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -50 & -100 & -150 & -200 & -250 & -300 & -350 & -400 & -450 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

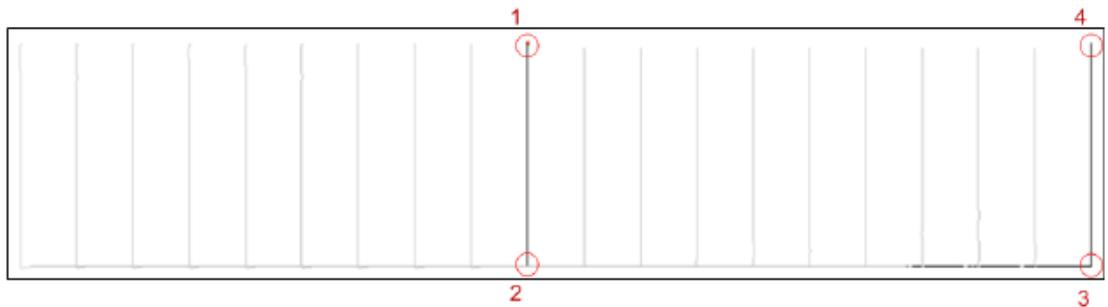


Рис. 37. Фазовый портрет движения группы квадрокоптеров при мониторинге площади нефтегазодобывающих объектов размером в 0,2 кв. км.

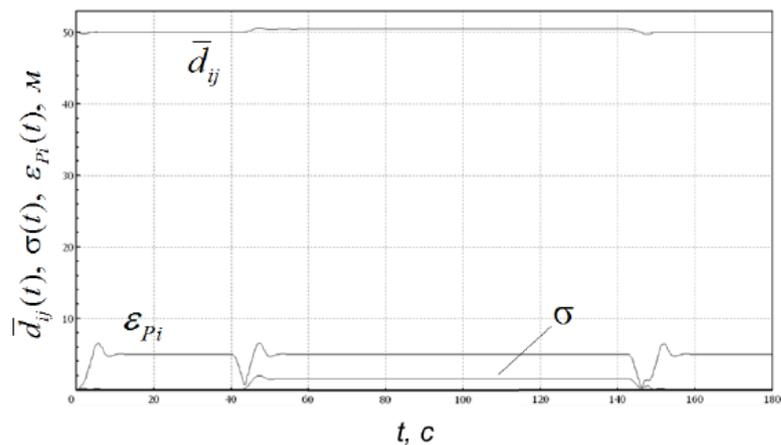


Рис. 38. Среднеарифметическое расстояние между двумя агентами, среднеквадратичное отклонение и отклонение от желаемой траектории группы квадрокоптеров при выполнении задачи мониторинга.

На Рис. 38 видно, что среднеарифметическое расстояние между агентами составило  $d_{ij} = 50$  м при максимальном за время полета среднеквадратичном отклонении  $\sigma = 2$  м. Ошибка  $\epsilon_{pi}$  ведомых агентов от желаемой траектории

варьировалась около 5 м, что связано с небольшим одинаковым запаздыванием агентов от единого лидера.

Следует отметить, что прямой обмен данными на расстоянии 500м с помощью радио-модулей Xbee невозможен. Рассмотрим текущий пример с учетом технических ограничений коммуникационной базы. При строевом движении, в условиях, когда ведомый агент не находит лидера в зоне покрытия связи, то в приоритетном порядке в качестве объекта слежения выбирается соседний квадрокоптер, относительно которого также задано взаимное расположение. Результаты компьютерного моделирования аналогичной задачи с учетом ограничений по дальности связи  $l_c = 100$  м агента представлены на Рис. 39 и Рис. 40.

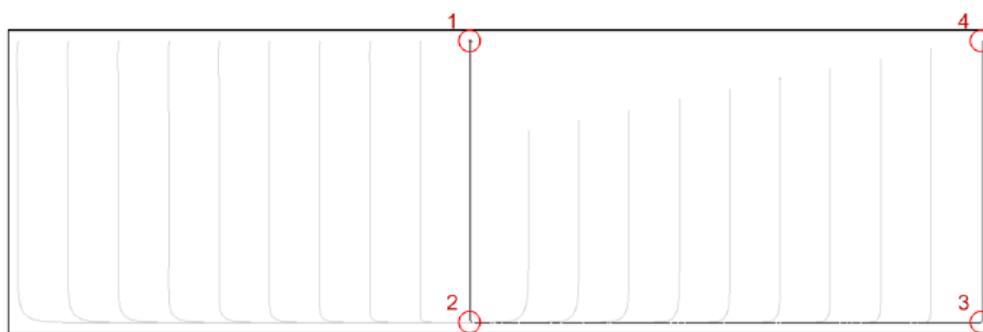


Рис. 39. Мониторинг площади нефтегазодобывающих объектов при ограниченной коммуникации.

На Рис. 39 черным цветом показана траектория движения лидера последовательно по точкам 1-4. При ограничении радиуса связи, движение агентов происходит согласно цепной реакции. В результате, чем дальше агент от лидера, тем большую ошибку по положению он имеет (Рис. 40). Самый дальний агент отстает от целевой позиции в формации на 70 м.

Уменьшение ошибки происходит при поворотах лидера, когда сбавляется скорость.

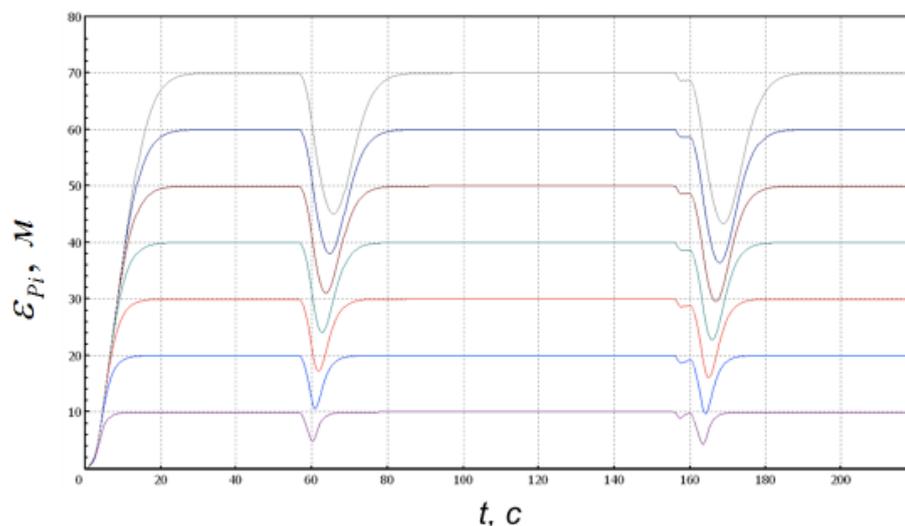


Рис. 40. Отклонение агентов от заданной позиции в строе при мониторинге нефтегазодобывающих объектов.

Среднеарифметическое расстояние между агентами составило  $d_{ij} = 55\text{м}$  при максимальном за время полета среднеквадратичном отклонении  $\sigma = 4\text{м}$  (Рис. 41).

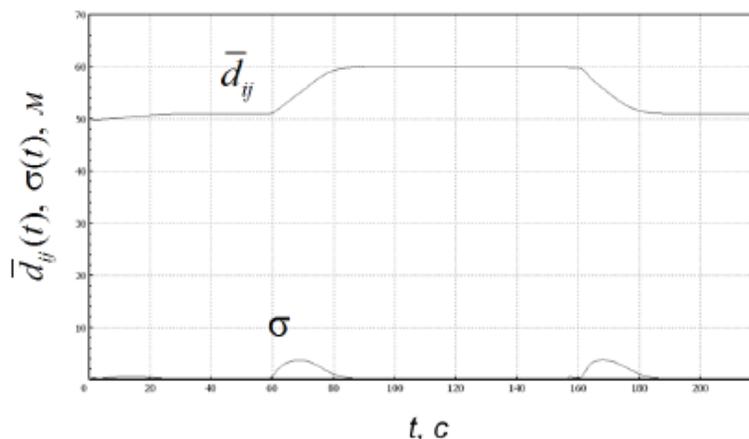


Рис. 41. Среднеарифметическое расстояние между двумя агентами и среднеквадратичное отклонение в задаче мониторинга нефтегазодобывающих объектов при ограниченной коммуникации.

Следующим шагом на основе того же примера с помощью моделирования проанализируем влияние помех и шумов в датчиках положения на способ управления.

Для оценки влияния шумов на движение ведомого квадрокоптера, назначим одного ведущего (идентификатор 1), относительно которого регулируется местоположение, для двух ведомых агентов (идентификатор 2 и идентификатор 3) с той разницей, что 3-й агент получает координаты ведущего квадрокоптера с зашумлением сигнала (Рис. 42).

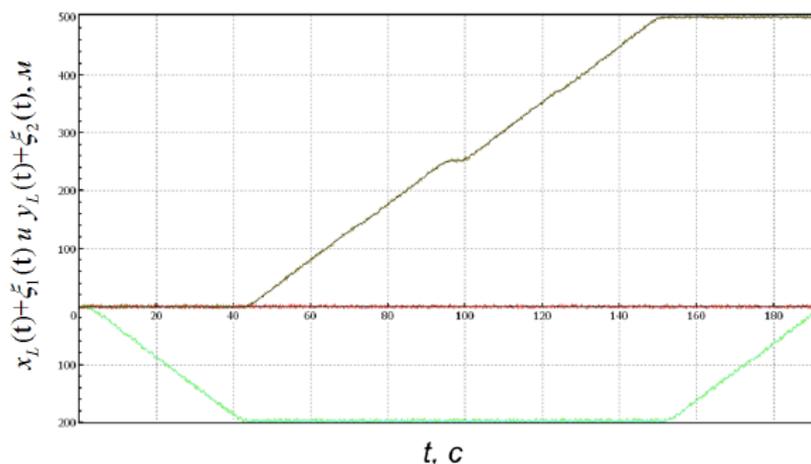


Рис. 42. Зашумление GPS сигнала координат ведущего агента при мониторинге нефтегазодобывающих объектов площадью 0,2 кв. км.

Применен аддитивный белый гауссов шум с математическим ожиданием равным нулю, среднеквадратичным отклонением 4 м и частотой в 2 Гц ко всем сигналам, получаемым от соседних агентов (координаты их местоположения).

По результатам компьютерного моделирования группового мониторинга нефтегазодобывающих объектов при добавлении шумов в датчиках положения в соответствии с погрешностью современных датчиков GPS работоспособность способа децентрализованного управления квадрокоптерами сохранилась.

## Выводы по четвертой главе

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке моделей системы управления и компьютерному моделированию движения. В ходе работы получены следующие результаты:

1. Построена модель системы управления одиночным квадрокоптером в программном пакете MatLab согласно разработанному алгоритму управления по траектории и по скорости.
2. Создана среда моделирования в Universal Mechanism, где квадрокоптер задан как твердое тело с масс-инерционными характеристиками, а также установлена двухсторонняя связь с MatLab, где рассчитывается управляющее воздействие.
3. Проведены ряд компьютерных исследований режимов полета квадрокоптера, результаты которых продемонстрировали работоспособность алгоритма управления одиночным квадрокоптером.
4. Произведены эргономические исследования для оценки эффективности функционирования системы «оператор-квадрокоптер».
5. С целью компьютерной апробации способов кинематического и динамического управления МАС в плоскости построены модель системы управления, среда моделирования и проведены компьютерные исследования, демонстрирующие качественное групповое движения согласно сформулированным критериям качества.
6. Построены модель системы управления квадрокоптером в МАС, среда моделирования движения группы квадрокоптеров и проведены компьютерные исследования, демонстрирующие работоспособность способа децентрализованного управления квадрокоптером. В частности, способ управления апробирован в практической задаче мониторинга нефтегазодобывающих объектов группой квадрокоптеров.
7. Исследовано влияние помех и шумов в датчиках положения на способ управления группой.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

### «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8АМ5Б	Провоторов Павел Андреевич

<b>Институт</b>	<b>Кибернетики</b>	<b>Кафедра</b>	<b>СУМ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	Управление в технических системах

#### **Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i></li> <li>2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i></li> <li>3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i></li> </ol>	<p>. Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос, наблюдение.</p>
--	---

#### **Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Проведение предпроектного анализа и определение возможных альтернатив проведения НТИ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Определение структуры и трудоёмкости работ в рамках НТИ, разработка графика проведения НТИ, планирование бюджета НТИ
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Оценка экономической эффективности проекта, оценка научно-технического уровня НИР.

#### **Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей):

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

#### **Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент каф. менеджмента ИСГТ	Петухов О.Н.	к.э.н., доцент		

#### **Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8АМ5Б	Провоторов Павел Андреевич		

## 5.1 Организация и планирование работ

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень выполняемых работ с указанием доли участия исполнителей

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1. Постановка целей и задач исследования	НР, С	НР – 80% С – 20%
2. Обзор научной литературы	С	С – 100%
3. Разработка содержания ВКР	НР, С	НР – 20% С – 80%
4. Разработка календарного плана выполнения работ	НР, С	НР – 30% С – 70%
5. Разработка схем: структурной и функциональной	НР, С	НР – 10% С – 90%
6. Выбор алгоритмов управления	НР, С	НР – 20% С – 80%
7. Проведение исследования по тематике работы	С	С – 100%
8. Обработка полученных результатов	НР, С	НР – 20% С – 80%
9. Оформление расчетно-пояснительной записки	С	С – 100%
10. Оформление графического материала	С	С – 100%
11. Подведение итогов	НР	НР – 100%

На первом этапе происходит постановка цели и задачи исследования – использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и

несанкционированных врезок нефтепроводов. Тематика выбирается научным руководителем и обсуждается со студентом.

На втором этапе студент производит поиск научной литературы по предоставленной тематике для ознакомления и изучения необходимого материала. В дальнейшем данный материал будет использоваться для проведения исследований и разработки устройства.

На третьем этапе студент совместно с научным руководителем разрабатывают общее содержание ВКР. Данный документ является основополагающим при проведении дальнейшего исследования и разработки.

На четвертом этапе реализуется календарный план выполнения работ, обусловленный сроком обучения в магистратуре.

На пятом этапе студент занимается разработкой функциональной, структурной и схем. Данные схемы показывают общую структуру устройства и связи между его компонентами. В дальнейшем модернизация квадрокоптеров будет основываться на данных документах.

На шестом этапе производится выбор алгоритмов управления. Затем студент начинает выполнение исследовательской части работы (седьмой этап) – в данном случае исследование заключается в достижении требуемых показателей качества переходного процесса.

На восьмом, девятом и десятом этапе студент, под руководством научного руководителя занимается интерпретацией и обработкой результатов, а также оформлением расчетно-пояснительной записки и графического материала (графические материалы результатов исследования, презентация проекта).

Одиннадцатый этап заключается в подведении итогов проведенной работы, получении студентом обратной связи от научного руководителя и комиссии на защите дипломного проекта.

### 5.1.1 Продолжительность этапов работ

Так как отсутствует нормативная база по проводимым работам, а также достоверная информация о процессе выполнения подобных работ иными исполнителями, воспользуемся экспертным способом оценки продолжительности выполнения запланированных работ.

Произведем оценку минимального и максимального времени выполнения каждого из этапов. Рассчитаем ожидаемое время выполнения работ, воспользовавшись формулой:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5},$$

где  $t_{ожi}$  – ожидаемое время выполнения  $i$ -го этапа работ в чел.-дн.,  $t_{\min}$  – минимальная продолжительность работы, дн.;  $t_{\max}$  – максимальная продолжительность работы, дн.

Ожидаемое, минимальное и максимальное время исполнения в предложенной выше формуле, оцениваются в рабочих днях на человека. Произведем перевод этих величин в календарные дни, воспользовавшись следующей формулой:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К},$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;  $T_{К}$  – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );  $T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 52$ );  $T_{ПД}$  – праздничные дни ( $T_{ПД} = 10$ ).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,2$$

В свою очередь рабочие дни рассчитываются по следующей формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д},$$

$K_{BH}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{BH} = 1$ ;  $K_D$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_D = 1-1,2$ ; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Для простоты расчетов примем  $K_D$  и  $K_{BH}$ , равными единице. Тогда формула для расчета календарных дней преобразуется в следующую:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_K = t_{ож} \cdot T_K = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} \cdot 1,2$$

Воспользовавшись данными из таблицы 1, приведенными выше формулами, произведем расчет продолжительности выполнения работ научным руководителем и студентом в календарных днях. Результаты расчетов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Расчет трудозатрат на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	С	НР	С
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1. Постановка целей и задач исследования	НР, С	4	5	4,4	3,52	0,88	5,2096	1,3024
2. Обзор научной литературы	С	7	10	8,2	0	8,2	0	12,136
3. Разработка содержания ВКР	НР, С	30	40	34	6,8	27,2	10,064	40,256
4. Разработка календарного плана выполнения работ	НР, С	6	8	6,8	2,04	4,76	3,0192	7,0448
4. Разработка схем: структурной, функциональной	НР, С	7	14	9,8	0,98	8,82	1,4504	13,0536
6. Выбор алгоритмов управления	НР, С	15	25	19	3,8	15,2	5,624	22,496
7. Проведение исследования по тематике работы	С	8	12	9,6	0	9,6	0	14,208
8. Обработка полученных результатов	НР, С	7	10	8,2	1,64	6,56	2,4272	9,7088
9. Оформление расчетно-пояснительной записки	С	14	18	15,6	0	15,6	0	23,088
10. Оформление графического материала	С	4	8	5,6	0	5,6	0	8,288
11. Подведение итогов	НР	4	5	4,4	4,4	0	6,512	0
<b>Итого:</b>				<b>125,6</b>	<b>23,18</b>	<b>102,42</b>	<b>34,3064</b>	<b>151,5816</b>

### 5.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Произведем оценку текущих результатов работы. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом. Степень готовности рассчитывается по следующей формуле:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}},$$

- где  $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;  $TP_{общ.}$  – общая трудоемкость проекта;  $TP_i^H$  – накопленная трудоемкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоемкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе, здесь  $j = \overline{1, m}$  – индекс исполнителя,  $m = 2$ .

Таблица 8 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этапы работы	$TP_i, \%$	$CG_i, \%$
1. Постановка целей и задач исследования	3,5	3,5
2. Обзор научной литературы	6,53	10,03
3. Разработка технического задания (ТЗ)	27,07	37,1
4. Разработка календарного плана выполнения работ	5,42	42,52
5. Разработка схем: структурной, функциональной и внешних проводок	7,8	50,32
6. Разработка принципиальной эл. схемы и выбор компонентов	15,13	65,45
7. Проведение исследования по тематике работы	7,64	73,09
8. Обработка полученных результатов	6,53	79,62
9. Оформление расчетно-пояснительной записки	12,43	92,05
10. Оформление графического материала	4,45	96,5
11. Подведение итогов	3,5	100

## **5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта**

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

В ходе выполнения проекта отсутствуют расходы на командировочные, услуги связи, услуги сторонних организаций и арендная плата за пользование имуществом. Таким образом основу расходов данного проекта составляют:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

### **5.2.1 Расчет затрат на материалы**

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых

непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования.

На первом этапе работ необходимо провести теоретические исследования. Для этого необходим ряд программных пакетов, таких как Microsoft Word, MathCAD, MATLAB, Universal Mechanism. Большинство данных продуктов предоставляются ТПУ бесплатно для студентов и профессоров, а остальные находятся в свободном доступе на интернет ресурсах. Таким образом затраты на материальные расходы данного этапа исследований включают в себя расходы на бумагу, тетради и пр. На втором этапе проводится исследования. Для этого использовался персональный компьютер с программой MATLAB, которая была предоставлена бесплатно.

В материальные затраты также входят транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), которые обуславливаются затратами на совершение купли-продажи материалов, их доставку. Обычно ТЗР составляют от 5% до 20% от общей цены материалов. Положим норму ТЗР равной 10%.

Таблица 9 – Расчет затрат на материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы
Квадрокоптер DJI Phantom 4	шт.	10	82000	820000
Методическое пособие “Школа пилотов”	шт.	1	2000	2000
DJI Аккумулятор Li-pol 15.2V 5350mAh, 4s1p для Phantom 4	шт.	10	10812	108120
Итого:				930120

### 5.2.2 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### 5.2.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\text{Дневная з/плата} = \frac{\text{Месячный оклад}}{25 \text{ дней}} ;$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 10. При расчете учитывалось, что в году 302 рабочих дня и, следовательно, в месяце 25 рабочих дней. районный коэффициент  $K_{РК}=1,7$  и северная надбавка  $K_c= 0,5$  ( $K = 2,2$ ).

Таблица 10 – Расчет затрат на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	16751,29	993,25	36	1,69	60429,33
И	11 200	1002,3	50	2,2	56326,2
<b>Итого</b>					116755,35

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили  $Z_{ЗП} = 116755,35$  руб.

#### 5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данная статья учитывает затраты на электроэнергию, которая потребляется всем оборудованием в течение работы над проектом. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot ЦЭ,$$

где  $P_{об}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;  $ЦЭ$  – тариф на 1 кВт·час ( $ЦЭ = 3,1$  руб/кВт·ч);  $t_{об}$  – время работы оборудования, час. Время работы оборудования определяется по формуле:

$$t_{об} = T_{РД} * K_t,$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{РД}$ , определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение  $t_{об}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Таблица 11 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	$K_t$	Время работы оборудования, ч	Затраты на электроэнергию
Персональный компьютер	0,35	0,9	1680,4	1823,234
Принтер	0,25	0,001	0,7	0,54
<b>Итого</b>				<b>1823,77</b>

#### 5.2.5 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), который включает в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30% от полной заработной платы по проекту и рассчитывается по формуле  $C_{соц} = C_{эл} * 0,3$ . Для проведения исследования затраты на социальный налог составляют  $C_{соц} = 116755,35 * 0,3 = 35026,5$  руб.

## 5.2.6 Расчет амортизационных расходов

Расчет амортизационных расходов производится по следующей формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A * Ц_{ОБ} * t_{рф} * n}{F_D},$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;  $Ц_{ОБ}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР,  $F_D$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году,  $t_{рф}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;  $n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Персональный компьютер и принтер входят в группу – вычислительная техника, следовательно, они имеют срок полезного использования 2-3 года.

Так как к сроку начала работ компьютер и принтер эксплуатировались более 5 и 10 лет соответственно, то срок их полезного использования истек, следовательно, амортизационные расходы на ПК и принтер оборудования равны нулю.

Паяльная станция была приобретена к началу выполнения работ и данный тип оборудования входит в пятую группу – специальное технологическое оборудование для производства электронной и радиотехники. Срок полезного использования таковой составляет от 7 до 10 лет. Зададим конкретное значение  $С_A$ , равное 8 годам.

Таким образом, амортизационные расходы на использование оборудования составят:

$$C_{AM} = \frac{N_A * Ц_{ОБ} * t_{рф} * n}{F_D} = 0,00 \text{ руб.}$$

### 5.2.7 Расчет прочих (накладных) расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1 = (930120 + 116755,35 + 1823,77 + 35026,5 + 0) \cdot 0,1 = 154332,42 \cdot 0,1 = \mathbf{108372,562 \text{ руб.}}$$

### 5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Рассчитав сумму всех расходов на выполнение запланированных работ, произведем расчет общей себестоимости проекта. Результаты расчетов представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет общей себестоимости проекта

Статья затрат	Обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	930120
Заработная плата	$C_{\text{зн}}$	116755,35
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	35026,5
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	1823,77
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	0,00
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	108372,562
<b>ИТОГО:</b>		<b>1192098,18</b>

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = \mathbf{1192098,18}$  руб.

### 5.2.9 Расчет прибыли, НДС и цены разработки НИР

Так как информация для применения сложных методов расчетов прибыли отсутствует, то прибыль может варьироваться в пределах от 5% до 20% от себестоимости продукта. Заложим в проект прибыль, равную 13% от себестоимости. Тогда:

$$P = 0,13 * C = \mathbf{154972,76 \text{ руб.}}$$

Рассчитаем НДС как 18% от суммы затрат на разработку и заложенной прибыли, т.е.:

$$НДС = (P + C) * 0,18 = 242472,76 \text{ руб.}$$

Цена разработки НИР – это сумма трех составляющих: полной себестоимости проекта, прибыли и НДС, т.е.:

$$C_{НИР} = 1192098,18 + 154972,76 + 242472,76 = 298274,85 \text{ руб.}$$

### 5.3.1 Оценка экономической эффективности проекта

Результатом проведения НИР является использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов. Данная разработка позволит оператору обнаруживать любые места утечек на аварийных участках с автоматизированного рабочего места (АРМ). Таким образом, данная разработка может облегчить и ускорить нахождение аварийных мест на месторождениях.

Результатом данной работы является проект, не предназначенный для продажи и коммерциализации.

### 5.3.2 Оценка научно-технического уровня НИР

В данном разделе произведем оценку научно-технического уровня разработки при помощи вычисления интегрального индекса научно-технического уровня  $I_{НТУ}$ . Расчет данного индекса производится как взвешенная сумма количественных оценок НИР по трем признакам: уровень новизны, теоретический уровень и возможность реализации.

Таблица 13 – Критерии оценки уровня новизны НИР

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны – $n_i$	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 14 – Критерии оценки теоретического уровня НИР

Теоретический уровень полученных результатов – $n_2$	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 15 – Критерии оценки возможности реализации НИР по времени

Время реализации – $n_3$	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Разрабатываемая система по оценке таблицы 9 имеет уровень новизны равный 5, т.к. подобные системы существуют, однако с такой точки зрения не применялись, поэтому необходимо было разработать подходящий алгоритм управления.

Критерии оценки теоретического уровня НИР однозначно равен 6, т.к. результатом данной работы является алгоритм работы контроллера, организующего работу роботов.

Критерий оценки возможности реализации НИР по времени равен 10, т.к. реализация разработки имеет ограниченный срок 2,5 года.

Таким образом, произведем расчет интегрального индекса НТУ НИР:

$$I_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 k_i \cdot n_i = 0,4 \cdot 5 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 7,6$$

Так как индекс НТУ равен 7,6 балла, то это означает, что НТУ соответствует высокому уровню проведенной НИР.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8АМ5Б	Провоторову Павлу Андреевичу

<b>Институт</b>	<b>ИК</b>	<b>Кафедра</b>	<b>СУМ</b>
Уровень образования	Магистрант	Направление/специальность	Управление в технических системах

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов
--	---

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– метеопараметры;</li> <li>– напряженность зрения;</li> <li>– напряженность труда;</li> <li>– освещенность;</li> <li>– электромагнитные излучения;</li> <li>– шум.</li> <li>– движущиеся механизмы, подвижные части производственного оборудования;</li> <li>– электрический ток.</li> <li>– Разработка организационных и технических мер по нормализации уровней факторов и защите от их действия</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта ВКР и области его использования на ОС;</li> <li>– разработка решений по обеспечению экологической безопасности</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Выбор и описание возможных ЧС; типичная ЧС – пожар.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Извеков В.Н.	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5Б	Провоторов Павел Андреевич		

# СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

## Аннотация

Представление понятия «Социальная ответственность» сформулировано в международном стандарте (МС) IS CSR-08260008000: 2011 «Социальная ответственность организации». В соответствии с МС - Социальная ответственность - ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность);
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность).

## Введение

В данной ВКР представлена разработка использования группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов. В основе работы лежит алгоритм децентрализованного управления группой квадрокоптеров с их безопасным движением, с помощью которого в реальном времени оператору на пульт управления поступает изображение карты местности месторождений и выявления утечек или несанкционированных врезок на объекте. Аппаратная часть квадрокоптера включает в себя четыре пропеллера, бесколлекторный двигатель, контроллер, систему стабилизации, датчик GPS, бортовые камеры,

лазерный сканатор, инфракрасный датчик и пульт управления на который будут поступать видеоизображения для оператора.

Группа роботов будет использоваться в тех местах, где человеку затруднительно оказаться в случаях оперативной проверки, например болотистая местность, паводок, заметенный снегом участок и т.д.

В данном случае, так как большинство месторождений находятся на болотистой местности, то целесообразней будет использовать группы роботов для мониторинга аварийных участков. А после выяснения причин по фото или видео изображениям можно будет принимать меры и высылать людей если это необходимо.

В текущем разделе указаны основные вредные и опасные факторы рабочей зоны, их анализ и способы защиты от них, аспекты охраны окружающей среды, защиты от чрезвычайных ситуаций, а также правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

## 6.Производственная безопасность

### 6.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Согласно номенклатуре, опасные и вредные факторы по ГОСТ 12.0.003-74 делятся на следующие группы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические.

Перечень опасных и вредных факторов представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Перечень опасных и вредных факторов технологии производства

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
<ul style="list-style-type: none"><li>•Управление механизмами поста управления, работа с ПЭВМ;</li><li>•Выполнение визуальных осмотров всех основных и вспомогательных механизмов до начала их использования при выполнении работ;</li><li>•Ведение технологического процесса приема и укладки металла в приемные карманы (стеллажи), склады цеха.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Повышенная температура;</li><li>• Относительная влажность;</li><li>• Скорость воздуха;</li><li>• Повышенная напряженность зрения;</li><li>•Повышенная напряженность труда в течение смены;</li><li>•Естественное и искусственное освещение;</li><li>•Электромагнитные излучения;</li><li>•Шум.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Движущиеся механизмы, подвижные части производственного оборудования;</li><li>•Электрический ток.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4-548-96;</li><li>• Нормы естественного и искусственного освещения предприятий, СНиП 23-05-95;</li><li>• Допустимые уровни шумов в производственных помещениях. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ;</li><li>• Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03;</li><li>• Защитное заземление, зануление, ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ.</li></ul>

Эти факторы могут влиять на состояние здоровья, привести к травмоопасной или аварийной ситуации, поэтому следует установить эффективный контроль за соблюдением норм и требований, предъявленных к их параметрам.

## **6.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследования**

В условиях современного интенсивного использования ЭВМ важное значение имеет изучение психофизиологических особенностей и возможностей человека с целью создания вычислительной техники, обеспечивающей максимальную производительность труда и сохранение здоровья людей. Игнорирование эргономики может привести к довольно серьезным последствиям.

При внедрении усовершенствованной системы управления технологическим процессом важную роль играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени оператора.

Основным документом, определяющим условия труда на персональных ЭВМ, являются «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». Санитарные нормы и правила СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, которые были введены 30 июня 2003 года.

В Правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

## **6.3 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов (техника безопасности и производственная санитария)**

### **6.3.1 Механические опасности**

К механическим опасностям можно отнести:

- механизмы и подвижные части оборудования, неустойчивые конструкции;
- режущие, колющие и падающие предметы;
- повышенный уровень шума, колебаний и вибраций.

Основные последствия механических опасностей:

- защемление или раздавливание;
- порезы;
- отрезание или разрубание;
- захват или наматывание;
- затягивание или задерживание;
- попадание под удар;
- местный укол или полное прокалывание;
- поверхностное повреждение наружных тканей под действием трения;

К средствам защиты работающих от механического травмирования (физического опасного фактора) относятся:

- ограждения (кожухи, козырьки, дверцы, экраны, щиты, барьеры и т. д.);
- предохранительные – блокировочные устройства (механические, электрические, электронные, пневматические, гидравлические и т. д.);
- тормозные устройства (рабочие, стояночные, экстренного торможения);

- сигнальные устройства (звуковые, световые), которые могут встраиваться в оборудование или быть составными элементами.
- сигнальные цвета и сигнальная разметка, знаки производственной безопасности.

Сигнализация является одним из звеньев непосредственной связи между машиной и человеком. Она способствует облегчению труда, рациональной организации рабочего места и безопасности работы. Сигнализация может быть звуковая, световая, цветовая и знаковая. Сигнализация должна быть расположена и выполнена так, чтобы сигналы, предупреждающие об опасности, были хорошо различимы и слышны в производственной обстановке всеми лицами, которым может угрожать опасность.

ГОСТ Р 12.4.026-2001 «ССБТ. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная» устанавливает термины с соответствующими определениями, для правильного понимания их назначения, правила применения и характеристики знаков безопасности, сигнальных цветов и сигнальной разметки.

### **6.3.2 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ**

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) эти помещения должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ с ВДТ на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup> и с ВДТ на базе плоских дискретных экранов (жидкокристаллические, плазменные) 4,5 м<sup>2</sup>.

### **6.3.3 Микроклимат**

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в таблице 17, в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 и СанПиН 2.2.4.548-96.

Таблица 17 – Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория работы	Температура, С	Относительная влаж. воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	22-24	40-60	0,1
Теплый	Ia	23-25	40-60	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работы	Температура воздуха, °С	Относительная влаж. воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	20-25	15-75	0,1
Теплый	Ia	21-28	15-75	0,1-0,2

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию.

В холодное время года предусматривается система отопления. Для отопления помещений используются водяные системы центрального отопления. При недостаточной эффективности центрального отопления должны быть использованы масляные электрические нагреватели.

Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. Применение таких решеток способствует также повышению электробезопасности в помещениях. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли.

#### **6.3.4 Освещение**

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Освещению следует уделять особое внимание, так как при работе наибольшее напряжение получают глаза.

Освещение делится на естественное, искусственное и совмещенное. Совмещенное сочетает оба вида освещения.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк (СНиП 23-05-95, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03). Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Следует ограничивать прямую блескость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>. Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях должен быть не более 20.

Согласно СНИП 23-05-95 нормы на освещение для оператора поста управления берутся для производственных помещений. Эти нормы представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Нормы на освещение для оператора

Характер зрительной работы	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Искусственное освещение		Естественное освещение КЕО <sub>н</sub> , % при боковом
			Освещенность при системе общего освещения, лк	Коэффициент пульсации, К <sub>п</sub> , %	
Различение объектов высокой точности	Б	1	300	15	1,0

### 6.3.5 Расчет системы искусственного освещения на рабочем месте оператора поста управления

Расчет системы искусственного освещения проводится для прямоугольного помещения, размерами: длина А = 4 (м), ширина В = 3 (м), высота Н = 2,4 (м), количество ламп N = 4 (шт).

Вычисления будут, производится по методу светового потока, предназначенного для расчета освещенности общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей. Согласно отраслевым нормам освещенности уровень рабочей поверхности над полом составляет 0,8 (м) и установлена минимальная норма освещенности E = 300 (Лк).

Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta), \quad (1)$$

Где: E<sub>н</sub> – нормируемая минимальная освещённость по СНИП 23-05-95, (Лк);

S – площадь освещаемого помещения, (м<sup>2</sup>);

$K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным  $Z = 1,1$ ;

$n$  – число светильников;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока, (%);

$\Phi$  – световой поток, излучаемый светильником.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен ( $\rho_{ст}$ ) и потолка ( $\rho_{п}$ ).

Индекс помещения определяется по формуле

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} \quad (2)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно.

**Произведем расчет:**

$$h = H - 0,8 = 2,4 - 0,8 = 1,6 \text{ (м)}, \quad (3)$$

где  $h$  – расчетная высота подвеса светильников над рабочей поверхностью.

Экономичность осветительной установки зависит от отношения, представленного в формуле:

$$l = \frac{L}{h}, \quad (4)$$

где  $L$  – расстояние между рядами светильников, м.

Рекомендуется размещать люминесцентные лампы параллельными рядами, принимая  $l = 1,4$ , отсюда расстояние между рядами светильников:

$$L = l \cdot h = 1,4 \cdot 1,6 = 2,24 \text{ (м)} \quad (5)$$

Два ряда светильников будут расположены вдоль длинной стены помещения. Расстояние между двумя рядами светильников и стенами вычисляется по формуле:

$$L = \frac{(B-L)}{2} = \frac{(3-2,24)}{2} = 0,38 \text{ (м)} \quad (6)$$

Определим индекс помещения вычисляя по формуле (5.2) получаем:

$$i = \frac{12}{(4+3) \cdot 1,6} = 1,07$$

Найдем коэффициенты отражения поверхностей стен, пола и потолка.

Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен  $R_{ст} = 50\%$ . Так как поверхность потолка светлый окрашенный, то коэффициент отражения поверхности потолка  $R_{п} = 30\%$ .

Учитывая коэффициенты отражения поверхностей стен, потолка и индекс помещения  $i$ , определяем значение коэффициента  $\eta = 36\%$ .

Подставив все значения в формулу (1), по которой рассчитывается световой поток одного источника света, получаем:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 12 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,36} = \frac{5940}{1,44} = 4125 \text{ (лм)}$$

По полученному световому потоку подбираем лампу, наиболее подходящей является лампа ЛБР-80-1 со световым потоком 4160 (лм).

Выразим  $E$  из формулы (5.1):

$$E = \frac{(F \cdot N \cdot \eta)}{(k)} = \frac{(4160 \cdot 4 \cdot 0,36)}{(1,5 \cdot 12 \cdot 1,1)} = \frac{5990,4}{19,8} = 302,5 \text{ (лм)} \quad (7)$$

Как видно из расчета, минимальная освещенность в пределах нормы.

Для того чтобы доказать, что использование люминесцентной лампы ЛБР-80-1 является наиболее рациональным, рассчитаем необходимое количество светильников по формуле:

$$N = \frac{(E \cdot k \cdot S \cdot Z)}{(n \cdot \eta \cdot F)}, \quad (8)$$

где  $E$  – норма освещенности  $E = 300$  (Лк);

$k$  – коэффициент запаса учитывающий старение ламп и загрязнение светильников,  $k = 1,5$ ;

$S$  – площадь помещения;

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения,  $Z = 1,1$ ;

$n$  – число рядов светильников,  $n = 2$ ;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока,  $\eta = 0,36$ ;

$F$  – световой поток, излучаемый светильником.

Подставим численные значения в формулу (5.8), получим количество светильников в одном ряду:

$$N = \frac{(300 \cdot 1,5 \cdot 12 \cdot 1,1)}{(2 \cdot 4160 \cdot 0,36)} = \frac{5940}{2995,2} \approx 1,98 \approx 2 \text{ (шт)}$$

Длина одного светильника равна 1,5 (м), в одном светильнике 2 лампы ЛБР-80-1. План размещения светильников представлен на рисунке 43.

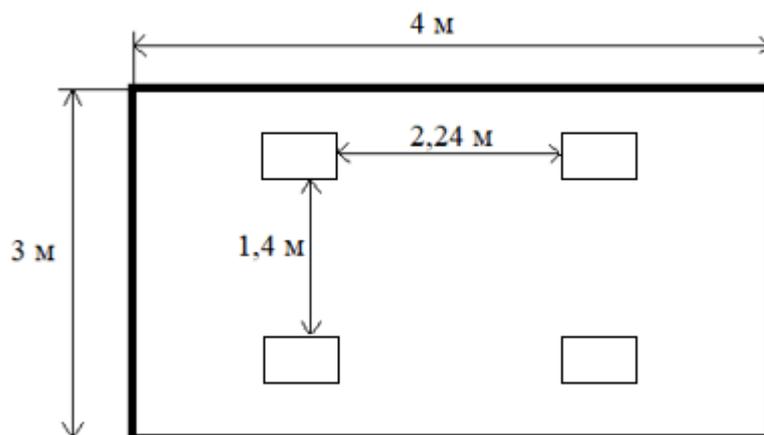


Рисунок 43 - план размещения светильников.

Так как в рассматриваемом помещении количество ламп 4 (шт), по одному светильнику в двух рядах, следовательно, нормы безопасности по искусственному освещению в данном случае соблюдены.

### 6.3.6 Шум

Для исследуемого объекта (производство и пункт управления) основными источниками шумов являются производственное оборудование

(внешние источники) и оборудование поста управления (внутренние источники).

ПДУ шума для объектов типа поста управления нормируются ГОСТ 12.1.003-83 и СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Значения ПДУ согласно этим документам представлены в таблице 20. (для постоянных шумов)

Таблица 20 – Нормированные значения уровня звукового давления

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ПУ	83	74	68	63	60	78	55	54	65

Для оценки соблюдения ПДУ шума необходим производственный контроль (измерения и оценка). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия по защите от действия шума (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

### 6.3.7 Электромагнитные излучения

Электромагнитным излучением называется излучение, прямо или косвенно вызывающее ионизацию среды. Контакт с электромагнитными излучениями представляет серьезную опасность для человека, по сравнению с другими вредными производственными факторами.

Источниками электромагнитных излучений служат радиотехнические и электронные средства связи, телевидение и радиовещание, трансформаторы, антенны, генераторы сверхвысоких частот, воздушные линии электропередач, навигационные средства и др.

Нормы электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ приведены в таблице 21 и таблице 22, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Таблица 21 – Временные допустимые ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Таблица 22 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		

Для оценки соблюдения уровней необходим производственный контроль (измерения). В случае превышения уровней необходимы организационно-технические мероприятия (защита временем, расстоянием, экранирование источника, либо рабочей зоны, замена оборудования, использование СИЗ).

### 6.3.8 Психофизиологические факторы

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03).

Существуют следующие меры по снижению влияния монотонности:

- необходимо применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня;
- соблюдать эстетичность производства.

### 6.3.9 Электрический ток

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды.

Согласно ПУЭ пост управления №8 по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Основными мероприятиями по защите от электропоражения являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- защитного заземления;
- защитного зануления;
- защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Защитное заземление или зануление электроустановок с повышенной опасностью регламентируется согласно ГОСТ12.1.013-78. Устройства защитного отключения, предназначенные для отключения электроустановок регламентируются согласно ГОСТ 12.4.155-85.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Контроль выполнения требований электробезопасности должен проходить на следующих этапах:

- проектирование;

- реализация;
- эксплуатация.

К организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность работ в электроустановках можно отнести:

1. Оформление работ – нарядом – допуском, распоряжением, которые определяют категорию и характер работы, место, время, квалификационный состав бригады, условия безопасности работы и ответственных работников (руководитель или производитель работ и наблюдающий и допускающий).

2. Допуск к работе осуществляет допускающий. Руководитель работ инструктирует бригаду непосредственно на рабочем месте, при необходимости, показывает безопасные приемы выполнения работ. Работники расписываются за инструктаж.

3. Надзор во время работы осуществляет руководитель работ без права участия в работе. В зависимости от категории работ наблюдающий должен иметь III или IV группу по электробезопасности.

4. Перерывы в работе, перевод бригад на новое рабочее место. В этом случае наряд остается на руках у производителя, он же осуществляет допуск к работе после перерыва. Перевод бригады осуществляется допускающим, а при его отсутствии, ответственным руководителем.

5. Окончание работ. Рабочее место приводится в порядок, принимается руководителем, который после вывода бригады производителем работ, расписывается в наряде и отдает его оперативному персоналу.

6. Инструктаж – доведение до персонала содержания основных требований и организации безопасного труда и соблюдения правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок, разбор происшедших или возможных ошибок на рабочих местах инструктируемых, углубление знаний и навыков безопасного производства работ, поддержание и расширение знаний по правилам пожарной безопасности.

## **6.4 Экологическая безопасность**

### **6.4.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

В результате выполнения ВКР был разработан алгоритм децентрализованного управления квадрокоптерами, который функционирует на основе микроконтроллера. Рассмотрим влияние микроконтроллера на окружающую среду.

Увеличение производства находится в прямой зависимости от состояния энергетики. Развитие энергетики оказывает существенное влияние на природную среду, являясь источником различных видов загрязнений воздуха, воды, земной поверхности и ее недр, а также основным потребителем топливных ресурсов, определяющим уровень его добычи.

### **6.4.2 Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду**

Полетный контроллер DJI Naza-M Lite спроектирован для использования в стационарных, защищенных от внешних воздействий условиях. Условия эксплуатации превосходят требования DIN IEC 60721-3-3.

- класс 3М3 (механические требования)
- класс 3К3 (климатические требования)

Контроллер DJI Naza и их компоненты соответствуют требованиям стандартов ГОСТ Р МЭК 60950-2002, ГОСТ 26329-84 (п. п. 1.2; 1.3), ГОСТ Р 51318.22-99, ГОСТ 51318.24-99, ГОСТ Р 51317.3.2-99, ГОСТ Р 51317.3.3-99. Основное влияние на окружающую среду заключается в образовании и поступлении твердых отходов в виде отработанных ПК, их компонентов и содержащихся в них вредных веществ.

### **6.4.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

Снижение загрязнения возможно за счет совершенствования оборудования, производящего электроэнергию, применения более экономичных и результативных технологий, использования новых методов

получения электроэнергии и внедрения современных методов и способов очистки и обезвреживания отходов производства. Кроме того, эта проблема должна решаться и за счет эффективного и экономного использования электроэнергии самими потребителями, а это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии.

Контроллеры, могут утилизироваться, так как не содержат токсических материалов.

Организация, в которой предполагается использовать разработанную систему, влияет на окружающую среду как потребитель электроэнергии, поскольку здесь работает большое количество электрооборудования и осветительных приборов.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением.

В современных компьютерах, повсеместно используются режимы с пониженным потреблением электроэнергии при длительном простое.

## **6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **6.5.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

На объекте возможные следующие ЧС:

- наводнение;
- удар молнии;
- пожар на объекте;
- взрыв.

Для предупреждения ЧС на объекте приняты следующие меры:

- защитное заземление;
- изоляция контактов;

Для повышения устойчивости объекта к данной ЧС приняты следующие меры:

- используется внешний стабилизатор напряжения.

В случае возникновения на объекте ЧС будут произведены следующие действия:

- немедленное аварийное отключение устройства;
- обесточивание всей лаборатории во избежание короткого замыкания.

Рабочее место оператора поста управления, должно соответствовать требованиям Ф3 Технический регламент по ПБ и норм пожарной безопасности (НПБ 105-03) и удовлетворять требованиям по предотвращению и тушению пожара по ГОСТ 12.1.004-91 и СНиП 21-01-97.

По пожарной, взрывной, взрывопожарной опасности помещение (ПУ№8) относится к категории В – горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть.

### **6.5.2 Анализ причин, которые могут вызвать ЧС на производстве при внедрении объекта исследований**

Пожар в помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. К электрическому характеру можно отнести короткое замыкание, перегрузку проводов, большое переходное сопротивление, искрение и т.д. Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

### **6.5.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- обеспечение правильных путей эвакуации;
- наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Для тушения пожаров на участке производства необходимо применять углекислотные (ОУ-5 или ОУ-10) и порошковые огнетушители (например, типа ОП-10).

Помещение оборудовано пожарными извещателями. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации представляющий собой заранее разработанный план (схему), в которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, а также порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации по п. 3.14 ГОСТ Р 12.2.143-2002.

Согласно Правилам пожарной безопасности, в Российской Федерации ППБ 01-2003 (п. 16) в зданиях и сооружениях (кроме жилых домов) при одновременном нахождении на этаже более 10 человек должны быть разработаны и на видных местах вывешены планы (схемы) эвакуации людей в случае пожара.

План эвакуации людей при пожаре из помещения, где расположен диспетчерский пункт (пост управления), представлен на рис. 44.

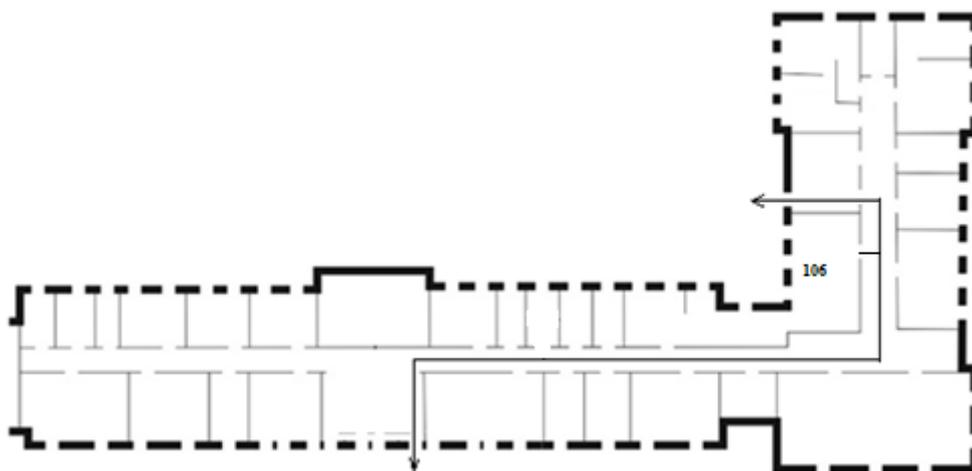


Рисунок 44 - План эвакуации при пожаре

Ответственность за нарушение Правил пожарной безопасности, согласно действующему федеральному законодательству "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ, несет руководитель объекта.

## **6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.6.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Нормы трудового права – это правила трудовых отношений, установленные или санкционированные государством посредством законодательных актов.

Нормы трудового права регулируют любые отношения, связанные с использованием личного труда. К формам реализации можно отнести трудовые отношения, организация труда и управление им, трудоустройство работников, коллективные отношения, повышение квалификации сотрудников, обеспечение мер по охране труда граждан, контроль за соблюдением законодательства, социальная и правовая защита работников, материальная ответственность работника и работодателя.

### **6.6.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

#### **6.6.2.1 Эргономические требования к рабочему месту оператора ПЭВМ**

Проектирование рабочих мест, снабженных видеотерминалами, относится к числу важных проблем эргономического проектирования в области вычислительной техники.

Организация рабочего места программиста или оператора регламентируется следующими нормативными документами:

ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ, ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и рядом других.

Главными элементами рабочего места программиста или оператора являются стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя.

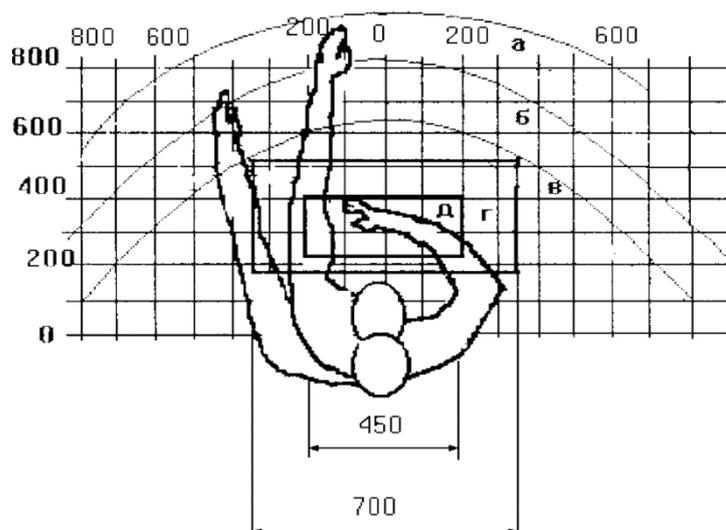


Рисунок 45 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

- а - зона максимальной досягаемости;
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в - зона легкой досягаемости ладони;
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости:

- дисплей размещается в зоне "а" (в центре);
- системный блок размещается в предусмотренной нише стола;
- клавиатура - в зоне "г"/"д";
- манипулятор "мышь" - в зоне "в" справа;
- документация: необходимая при работе - в зоне легкой досягаемости ладони – "в", а в выдвижных ящиках стола - литература, неиспользуемая постоянно.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой с нескользящим, неэлектризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнения.

## Основные результаты и заключение

В ходе работы над диссертацией были получены следующие основные результаты:

1. Выведена динамическая модель движения квадрокоптера. Динамическая модель движения была получена из совокупности второго закона Ньютона, уравнения Эйлера, и уравнения, устанавливающего взаимосвязь вектора угловой скорости с матрицей поворота.
2. Предложен алгоритм управления движением одиночного квадрокоптера по траектории и по скорости. В ходе диссертационной работы последовательно были разработаны два разных алгоритма управления одинарным квадрокоптером: на базе АКОР и на основе ПД регулятора. Метод с использованием ПД регуляторов оказался более простым и надежным, поскольку позволяет исключить возможную сингулярность и вычитание углов, как в случае с АКОР.
3. Предложены ряд требований к способу управления и критериев для оценки качества коллективного движения, основанные на принципах стайного поведения животных.
4. За основы взяты принципы управления Рейнольдса, и в целях обеспечения строевого движения алгоритм дополнен правилом формации, регулирующей групповое движение по аналогии с системой материальных тел, соединенных упругими пружинами.
5. Модифицированный алгоритм Рейнольдса использован для решения плоской кинематической задачи и плоской динамической задачи управления МАС.
6. Разработан децентрализованный способ управления группой квадрокоптеров для полета в двух режимах в трехмерном пространстве и отвечающий шести ключевым критериям. В основу легли ранее разработанные модули управления одиночным квадрокоптером и модуль управления агентом в МАС для плоской динамической задачи.

7. Построена модель системы управления и проведена компьютерная апробация. В ходе компьютерного моделирования были исследованы ряд штатных режимов группового движения квадрокоптеров. Эксперименты продемонстрировали работоспособность алгоритма и соответствие критериям сплоченного и безопасного коллективного движения при выполнении различных траекторий в группе из 10 квадрокоптеров при скоростях в пределах 5 м/с. Способ управления апробирован с помощью компьютерного моделирования в практической задаче мониторинга группой квадрокоптеров нефтегазодобывающих объектов площадью в 0,2 кв км за время 3 минуты. Проанализировано влияние помех и шумов в датчиках положения на способ управления.

## Список использованных источников

1. Белинская Ю. С., Четвериков В. Н. Управление четырехвинтовым вертолетом // Наука и образование. М.: Изд-во МГТУ. 2012, С. 157-171.
2. Белоконь С.А. Управление параметрами полёта квадрокоптера при движении по заданной траектории / С.А. Белоконь[и др.]. Автометрия, № 5 2012, С. 32-41.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления, 4-е изд., СПб.: Профессия. 2007. 771 с.
4. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов, М.: Физматлит, 2009, 280 с.
5. Buchholz T. T., Gretarsson D. Construction of a Four Rotor Helicopter Control System: S.M. Thesis. Technical University of Denmark. 2009. 158 p.
6. Cutler M., How J. P. Actuator Constrained Trajectory Generation and Control for Variable-Pitch Quadrotors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (GNC), Minneapolis, Minnesota. 2012. 13 p.
7. Cutler M. Design and control of an autonomous variable-pitch quadrotor helicopter: master of science thesis. MIT. 2012. 106 p.
8. Lee T., Leok M., McClamroch N., et al. Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3) // 49<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control. 2010. P. 5420–5425.
9. Lee T., Leok M., McClamroch N., et al. Control on complex maneuvers for a quadrotor UAV using Geometric Methods on SE(3) // Optimization and Control. 2011. 8 p.
10. Иванов Д.Я. Применение больших групп роботов, как одно из перспективных направлений развития робототехники/Application of large robots groups of as one of the promising directions of robotics development // Робототехника. Взгляд в будущее. // Труды международного научно-технического семинара.– Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2010. – С.72-74

11. Иванов Д.Я. Перспективы применения больших групп роботов в экстремальной робототехнике // Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и второй молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 215-220.

12. Воробьев В.В. Решение задачи групповой рекогносцировки с использованием локального взаимодействия роботов // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)»(9 октября 2015г., г. Санкт-Петербург, Россия): Труды семинара. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 34–41.

13. Сапрыкин Р.В. Алгоритмы информационного взаимодействия интеллектуальных мобильных роботов при картографировании внешней среды функционирования // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 3 (164). С. 164–174.

14. Будаев Д.С. [и др.]. Разработка прототипа согласованного управления группой беспилотных аппаратов с применением мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №10. С. 18–28.

15. Иванов Д. Формирование строя группой беспилотных летательных аппаратов при решении задач мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. №4. С. 219–224.

16. Кремлев А.С., Колюбин С.А., Вражевский С.А. Автономная мультиагентная система для решения задач мониторинга местности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. № 4 (56). С. 61–65.

17. Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М. Собольников С.А. Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2011. №11. С.27-32.

18. Ермолов И.Л., Подураев Ю.В., Собольников С.А. Система планирования действий в группе мобильных роботов при создании подвижной коммуникационной сети // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». 2012.

19. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: сборник трудов. 2010. № 30–1. С. 605–639.

20. Ogren P., Fiorelli E., Leonard N.E. Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment // Ieee Transactions on Automatic Control. 2004. № 8 (49). pp. 1292–1302.

21. Mellinger D. Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors // GRASP Lab, University of Pennsylvania. 2011. 6 p.

22. Hong S.K. Fuzzy logic based closed-loop strap down attitude system for unmanned aerial vehicle (UAV) // Elsevier B.V. 2005. P. 110–126.

23. Naidoo Y. Helicopter Modelling and Control / Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. // Int J Adv Robotic Sy. 2011. Vol. 8, № 4. P. 139–149.

24. Kushleyev A., Mellinger D., Kumar V. Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors // GRASP Lab, University of Pennsylvania, 2013. 8 p.

25. Vasarhelyi G. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots / Vasarhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G. // IEEE IROS conference. 2014.P. 1402–1411.

26. Hoffmann G. Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed / Hoffmann G., Huang H., Waslander S. // Control engineering practice 19(9). 2011. P. 1023-1036.

27. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие. / Е.И. Юревич, Юревич Е.И-е изд., СПб: БХВ-Петербург, 2010. 326 с.

28. Каляев И.А., Капустян С.Г., [и др.] Разработка и исследование методов и средств повышения безопасности и эффективности функционирования распределенных информационно-управляющих систем

сложных технических объектов. Тема: «Теоретические исследования в рамках поставленных перед НИР задач» // Отчет о НИР (Промежут.) /НИИ МВС ЮФУ, Рук. И.А. Каляев; №ГР 01200852907, Инв. №02200952319.- Таганрог, 2008.- 213 с.

29. Клочков В.В., Никитова А.К. Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования. 2007. № 6. С. 144–152.

30. Анисимов А.Н., Петрашко О.И., Панов В.В. Перспективные возможности боевого применения комплексов с БЛА тактическими подразделениями СВ, ВДВ и МП // В мире научных открытий. 2015. № 8. С. 162-174.

31. Карякин В.В. Беспилотные летательные аппараты - новая реальность войны // Проблемы национальной стратегии. 2015. №3 (30). С. 130–145.

32. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: Развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 39–46.

33. Трубников Г.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в гражданских целях [Электронный ресурс].

34. Божко Н.А., Баховчук А.М., Мытько Л.Р. Применение беспилотных летательных аппаратов при проектировании и содержании автомобильных дорог // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Международной научно-технической конференции. 2015. № 3. С. 60.

35. Клочков В.В., Никитова А.К. Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования. 2007. № 6. С. 144–152.

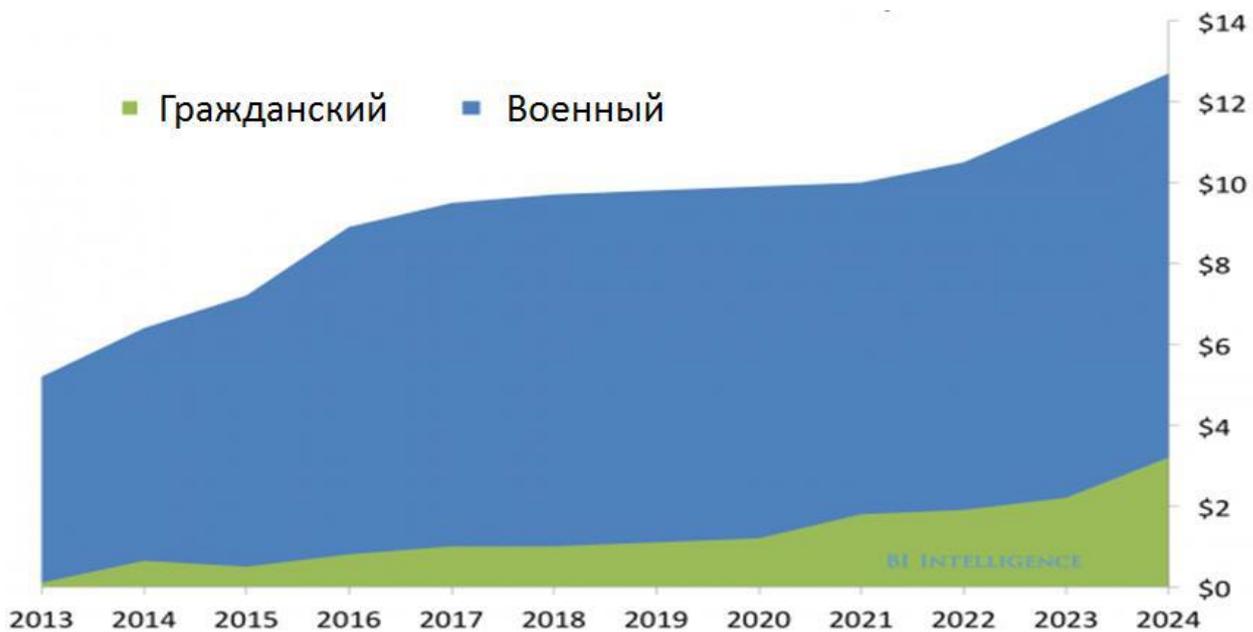
36. Присяжнюк С.П. Беспилотные летательные аппараты в лесопромышленном комплексе: возможности новых технологий // Геоинформатика. Специальный выпуск №1. 2012. № 1. С. 6–11.

37. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга продуктивности почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 95–106.
38. Цариченко С.Г., Родинченко Н.С. Беспилотные летательные аппараты, как средство повышения эффективности оперативно-тактической деятельности пожарно-спасательных подразделений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 14–24.
39. Соколов В.Б., Теряев Е.Д. Беспилотные летательные аппараты: некоторые вопросы развития и применения (обзор по материалам публикаций в Интернете) // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 2. С. 12–23.
40. Перспективы развития боевой беспилотной авиации [Электронный ресурс].
41. Попов В.А., Федутинов Д.В. Развитие направления миниатюрных беспилотных летательных аппаратов за рубежом // ФГУП «ГосНИИАС» [Электронный ресурс].
42. Bouabdallah S. Design and Control of Quadrotors With Application To Autonomous Flying. Doctoral dissertation. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. 2007. 155 P.
43. Vasarhelyi G. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots / Vasarhelyi G., Virágh Cs., Somorjai G. // IEEE IROS conference. 2014. P. 1402–1411.
44. Mellinger D. Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors // GRASP Lab, University of Pennsylvania. 2011. 6 p.
45. Naidoo Y. Helicopter Modelling and Control / Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. // Int J Adv Robotic Sy. 2011. Vol. 8, № 4. P. 139–149.
46. Пыркин А.А. Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели / А.А. Пыркин[и др.] // СПб.: Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 47-51.

47. Shi Y., Eberhart R. A Modified particle swarm optimizer // IEEE International Conference. 1998. P. 69–73.
48. Vicsek T., Czirok A., Jacob E. B., et al. Novel type of phase transitions in system of self-driven particles // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 75, № 6. P. 1226–1229.
49. Vicsek T., Zafeiris A. Collective motion // Physics Reports 517. 2012. P. 71–140.
50. Голубев Ю.Ф., Основы теоретической механики, 2-е изд., М.: Изд-во МГУ. 2000. 720 с.
51. Зенкевич С.Л., Галустян Н.К. Угловая стабилизация квадрокоптера // Экстремальная робототехника: сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2012. С. 164-171.
52. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С., Основы управления манипуляционными роботами, М.: Изд-во МГТУ, 2004, 480 с.
53. Гайдук А.Р. [и др.]. Групповое управление БЛА. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. №11. С. 24-36.
54. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Система планирования движения группы мобильных микророботов на основе генетических алгоритмов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 163–173.
55. Ермолов И.Л., Илюхин Ю.В., Собольников С.А. Планирование траекторий движения в группе автономных мобильных коммуникационных роботов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. №4. С. 96–100.
56. Жук А.П. [и др.]. Анализ методов защиты от несанкционированного доступа беспроводных каналов связи робототехнических систем // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. №2 (8). С.38-42.
57. Habrahabr | Алгоритм роя частиц [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/post/105639/>

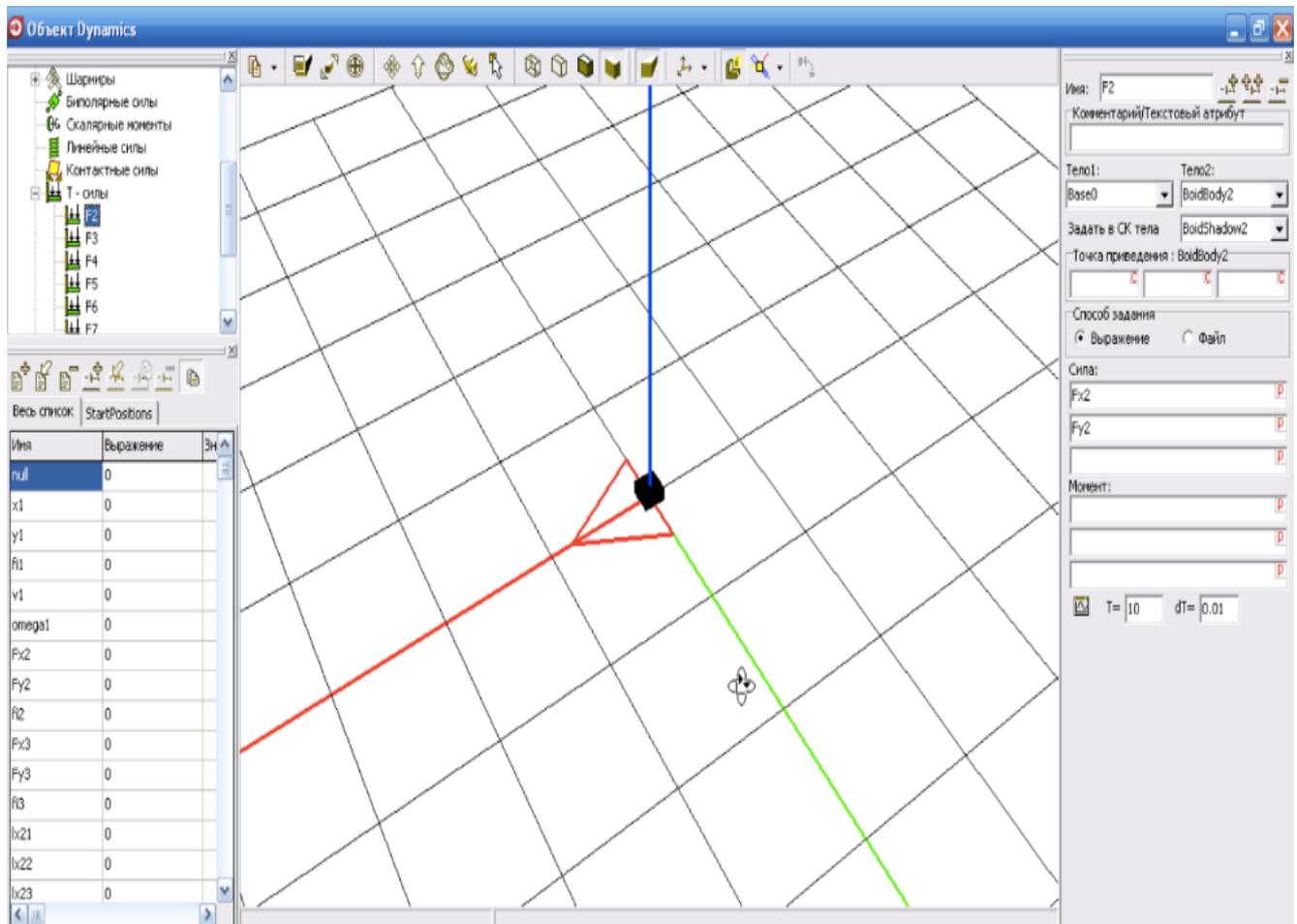
## Приложение А

### Рынок беспилотных летательных аппаратов



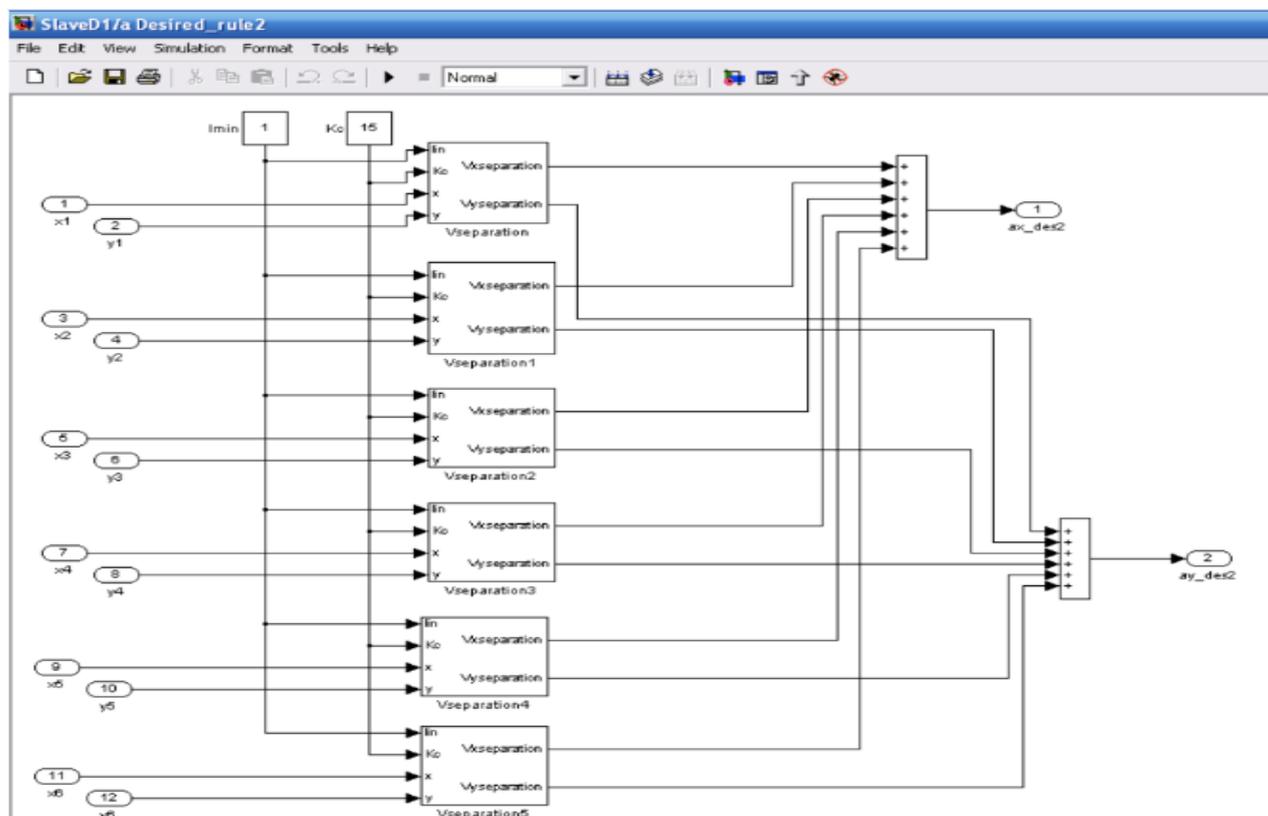
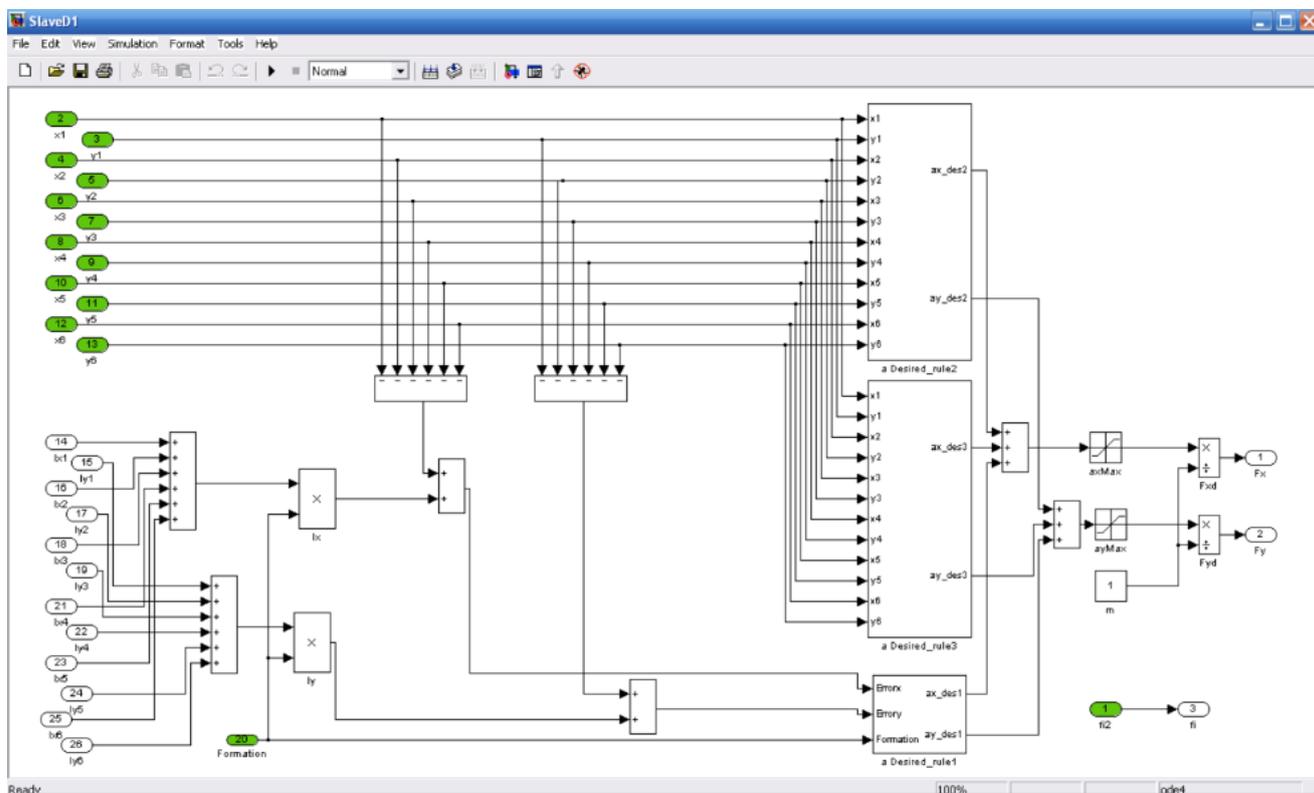
## Приложение Б

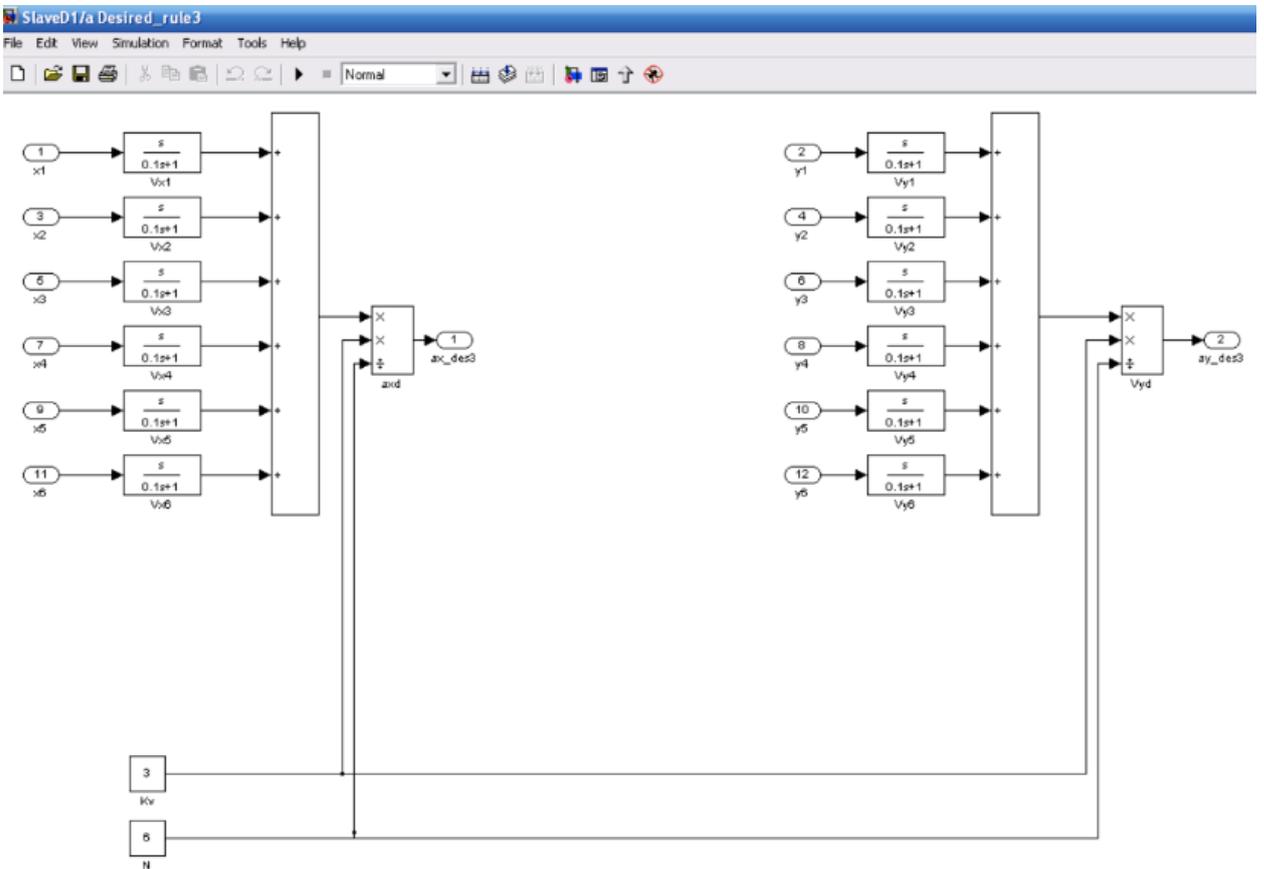
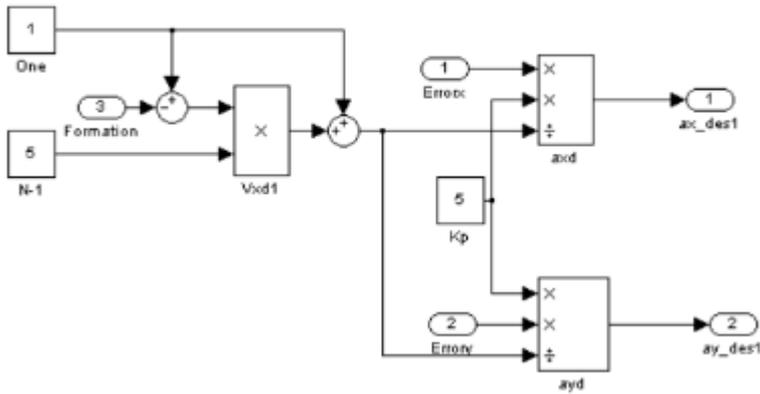
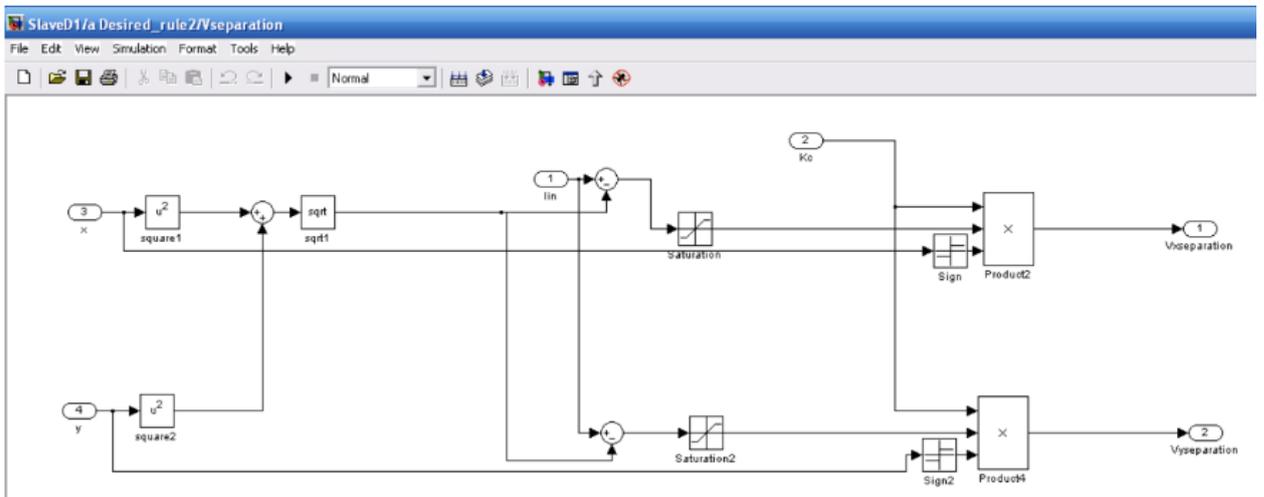
### Среда моделирования и модель системы управления мультиагентной системой в плоскости



## Приложение В

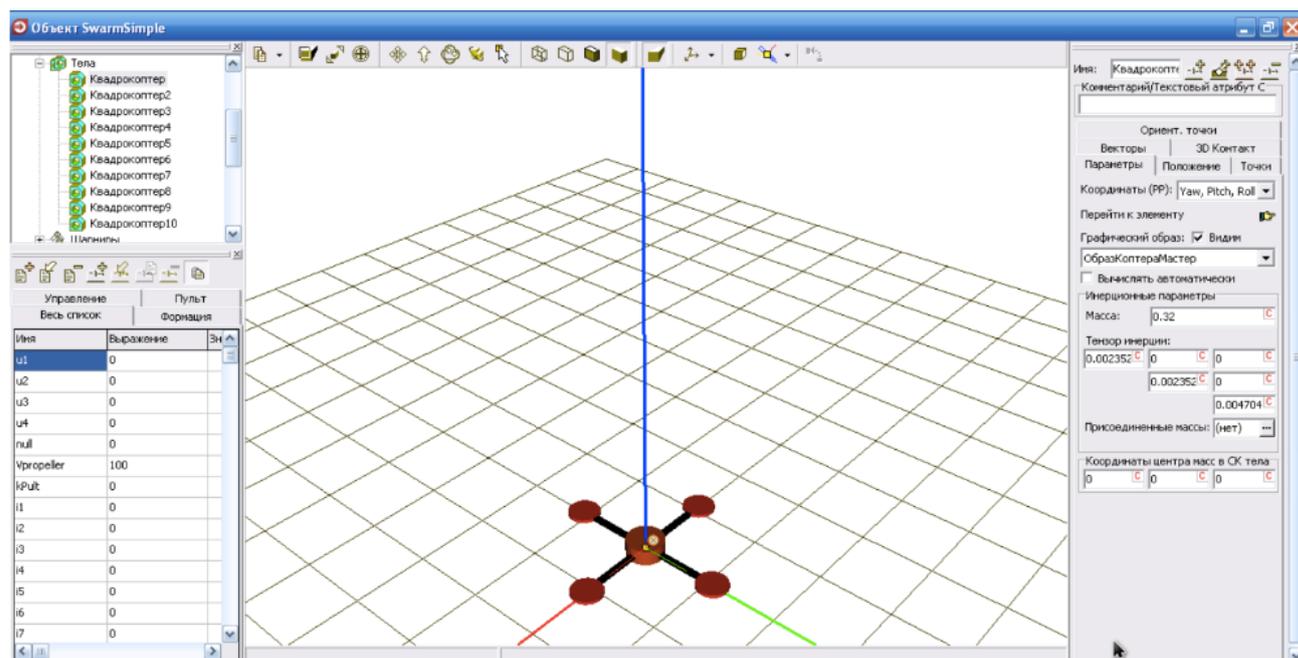
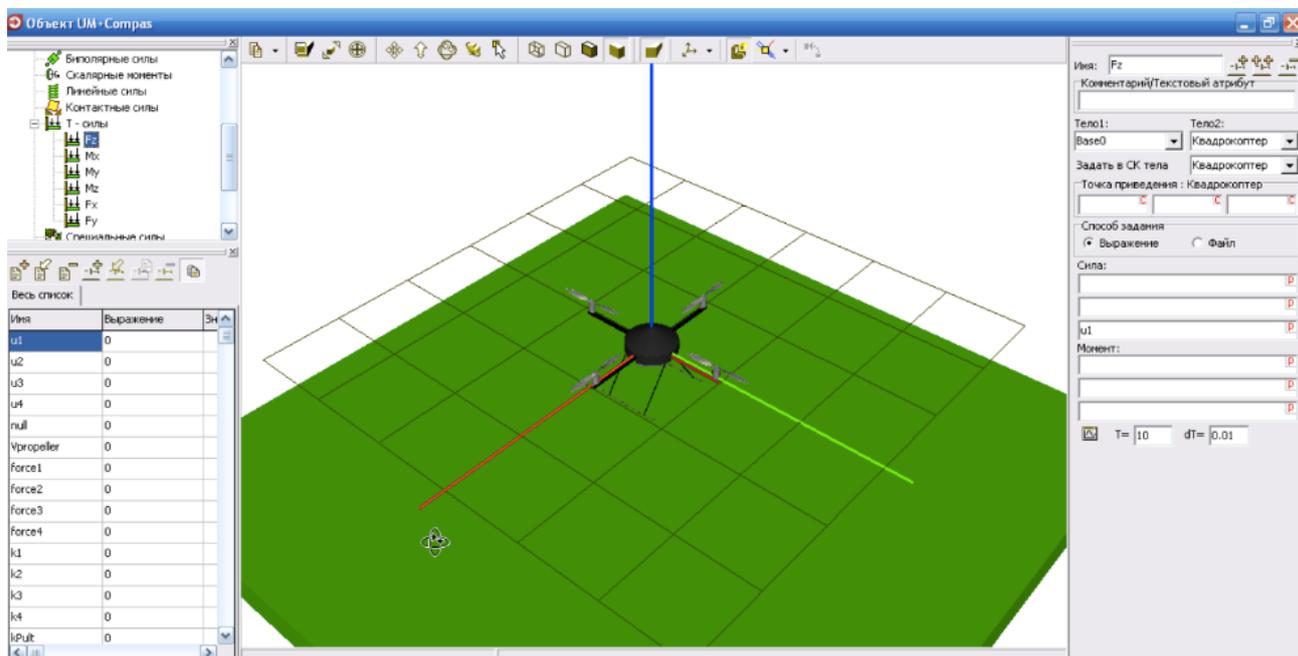
Модель системы управления агентом в программном пакете MatLab, построенная на основе модифицированного алгоритма Рейнольдса.





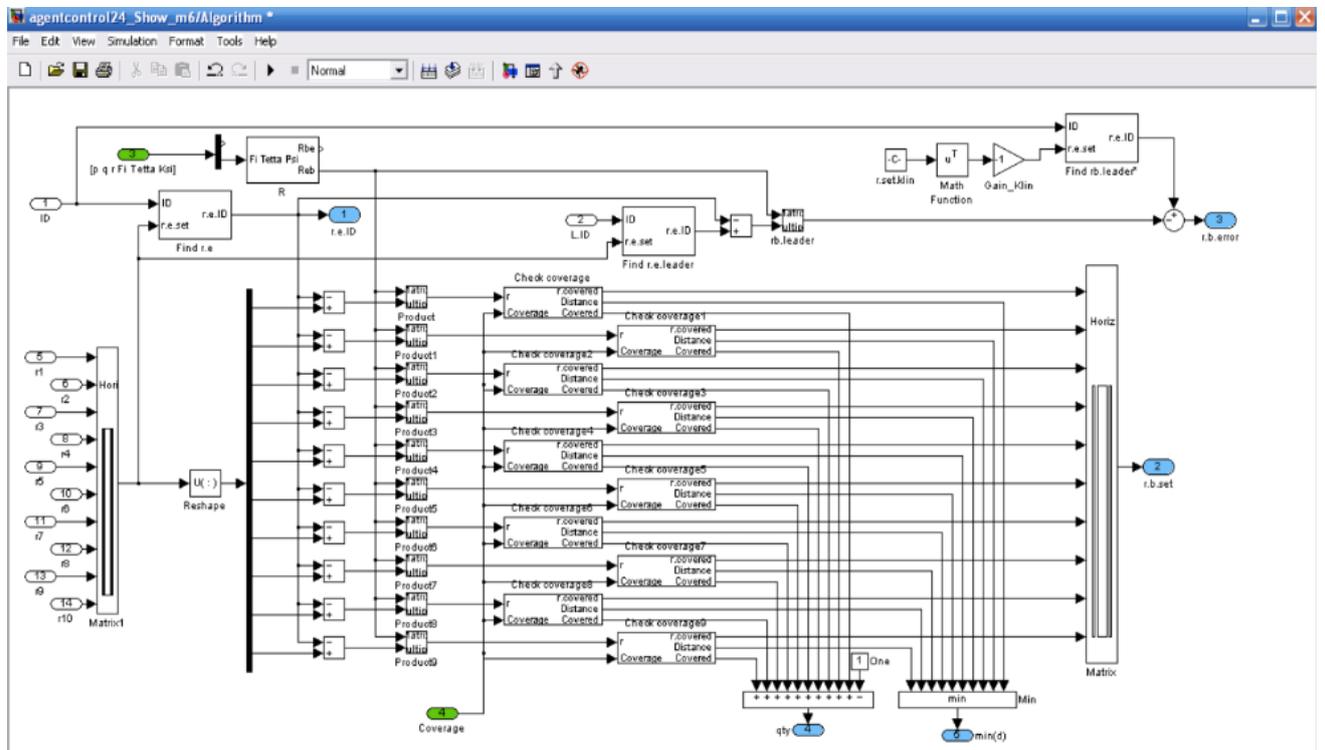
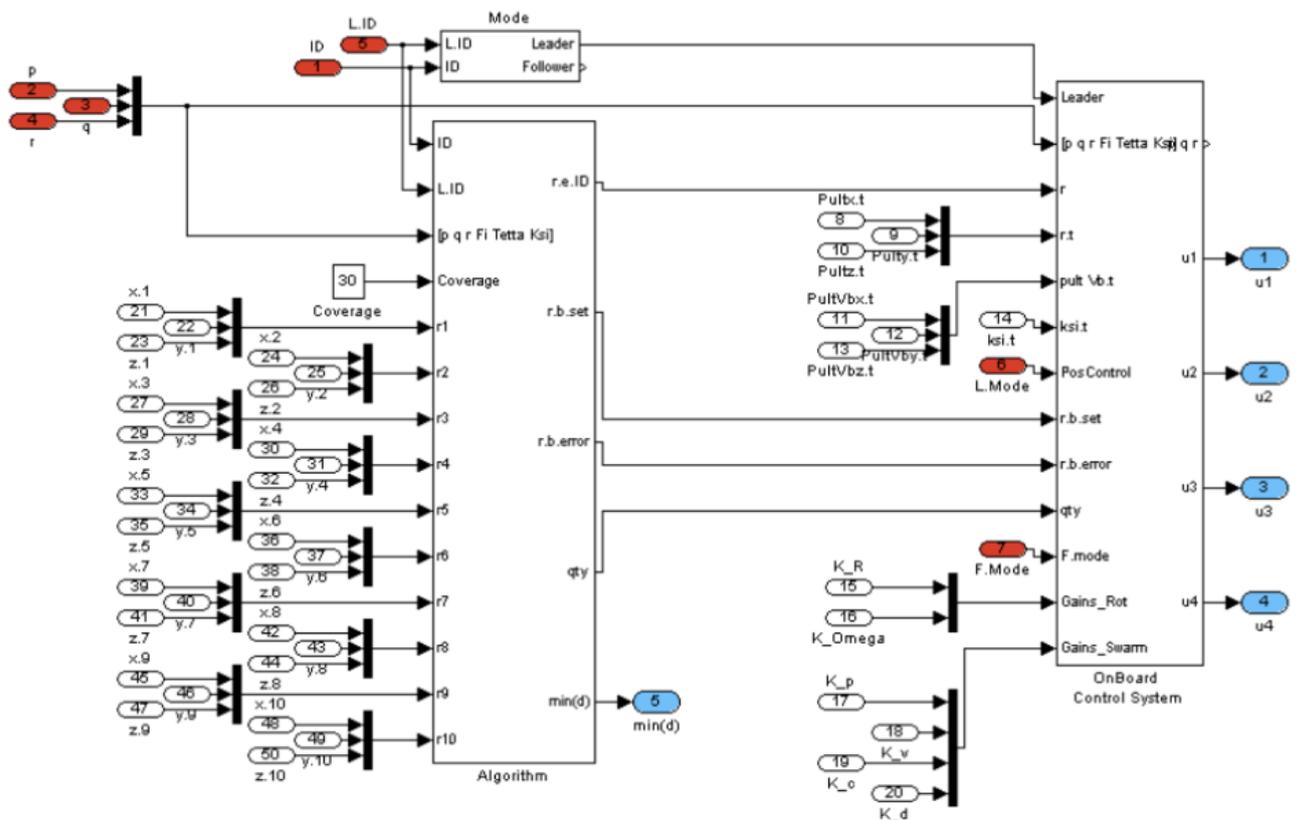
## Приложение Г

Среда моделирования и модель системы управления квадрокоптером в мультиагентной системе.

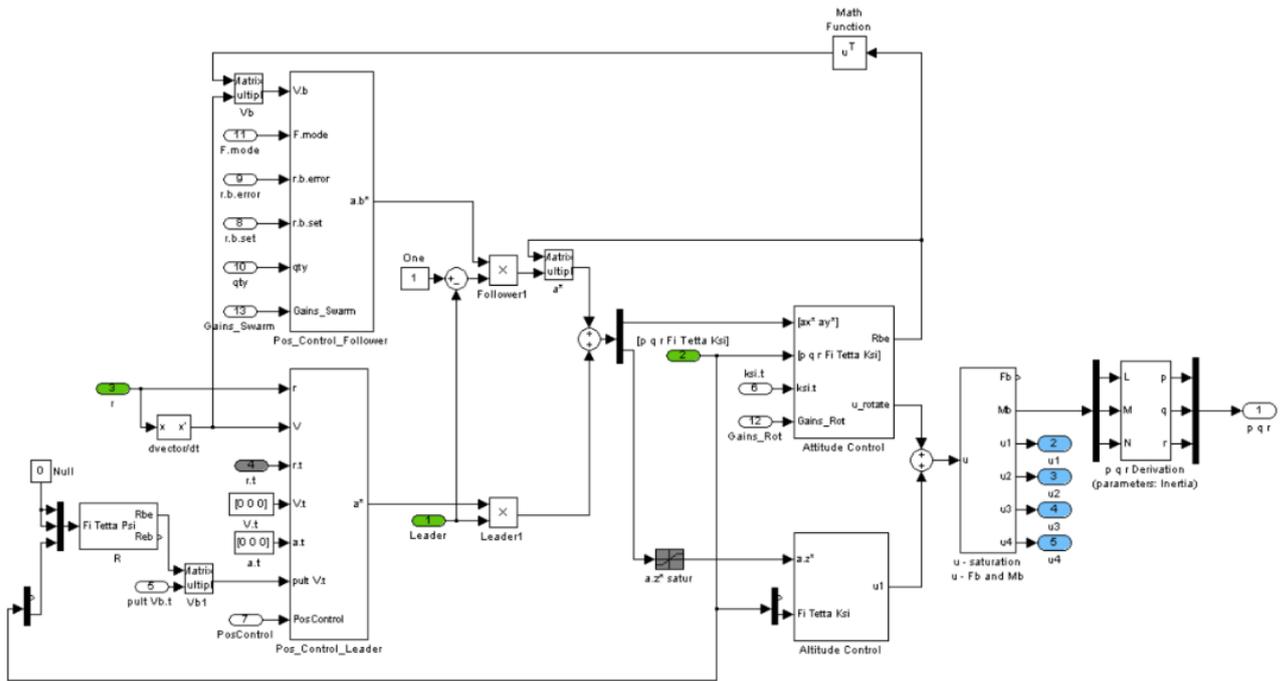


## Приложение Д

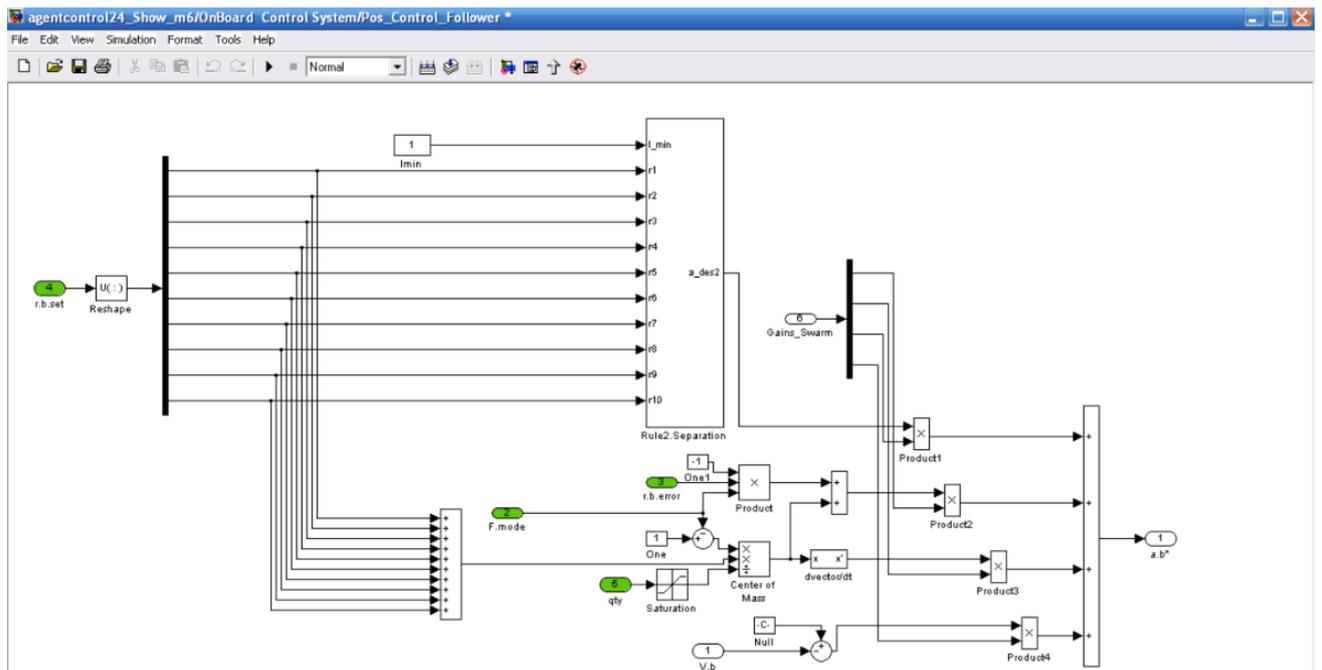
Верхний уровень модели системы децентрализованного управления квадрокоптером в программном пакете MatLab.



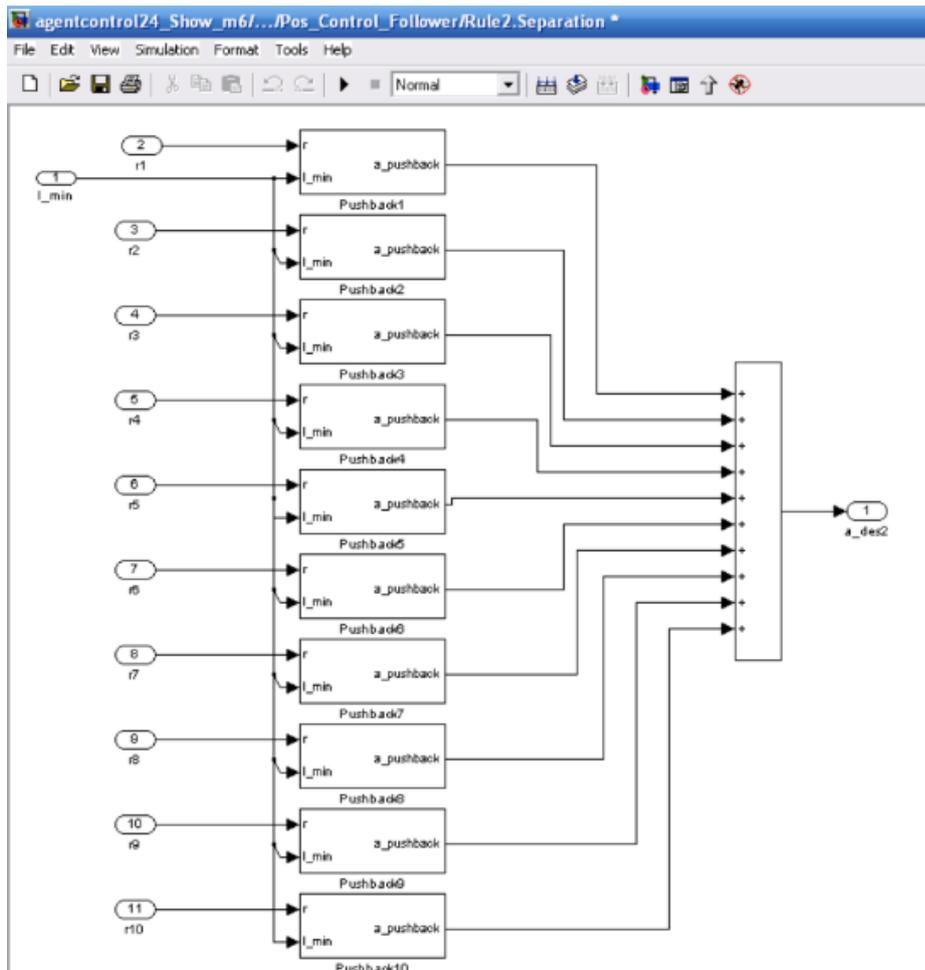
Блок “Algorithm” служит для определения матрицы координат пяти ближайших агентов



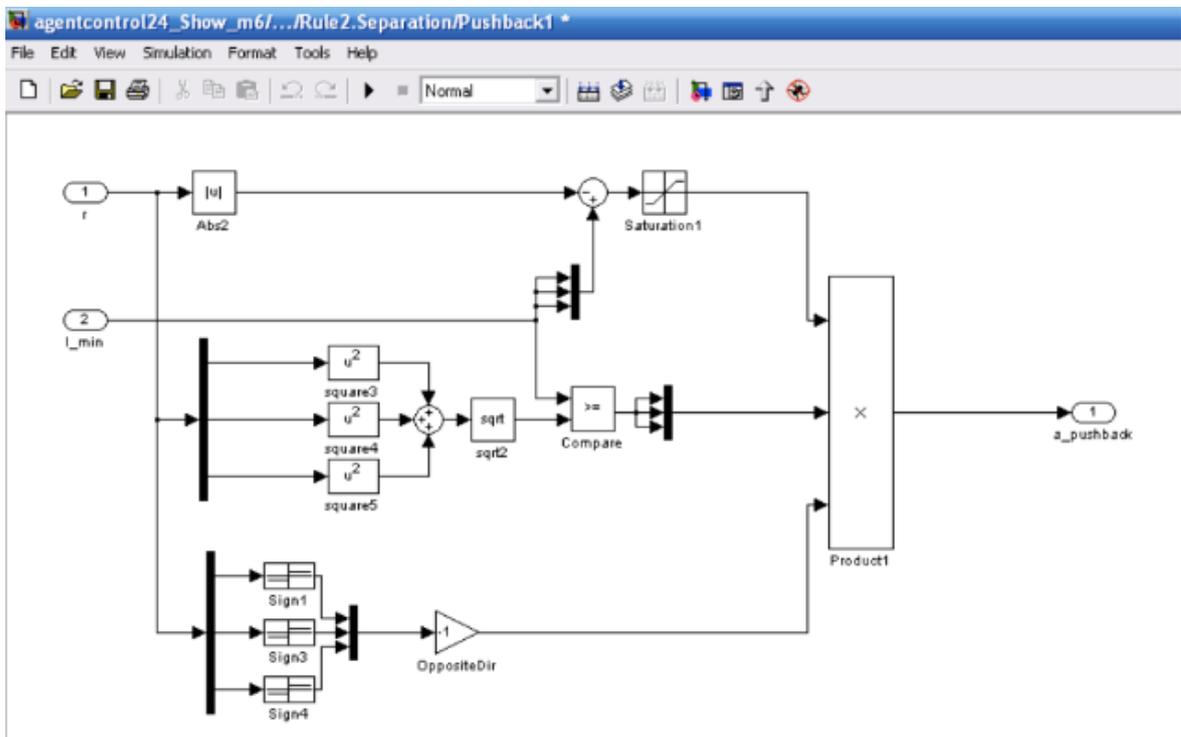
Блок “OnBoard Control System”, реализующий алгоритм управления квадрокоптером в МАС



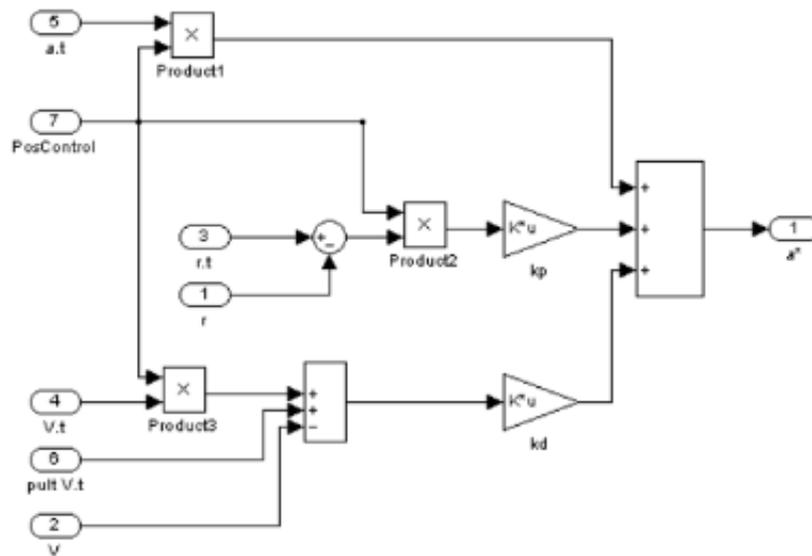
Блок управления положением в режиме ведомого агента.



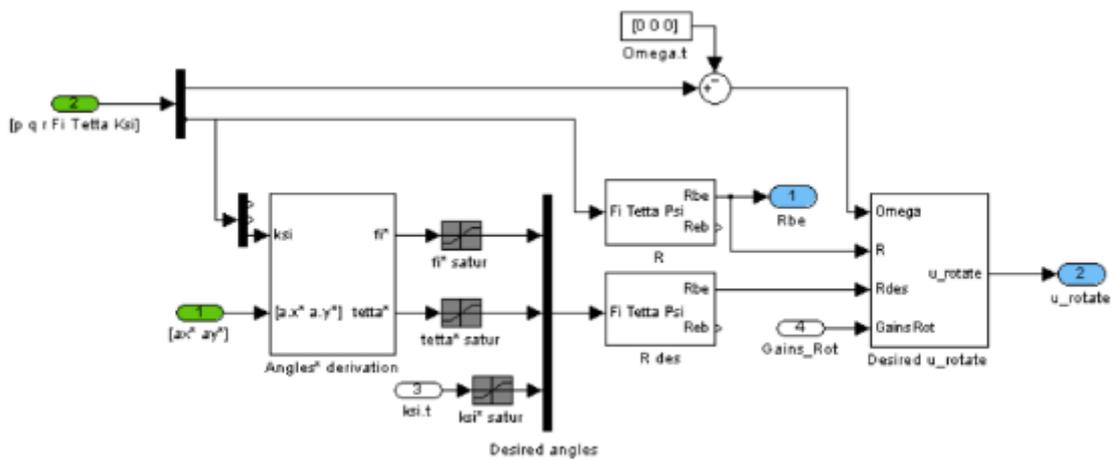
Блок расчета компонента управления согласно правилу «разделение».



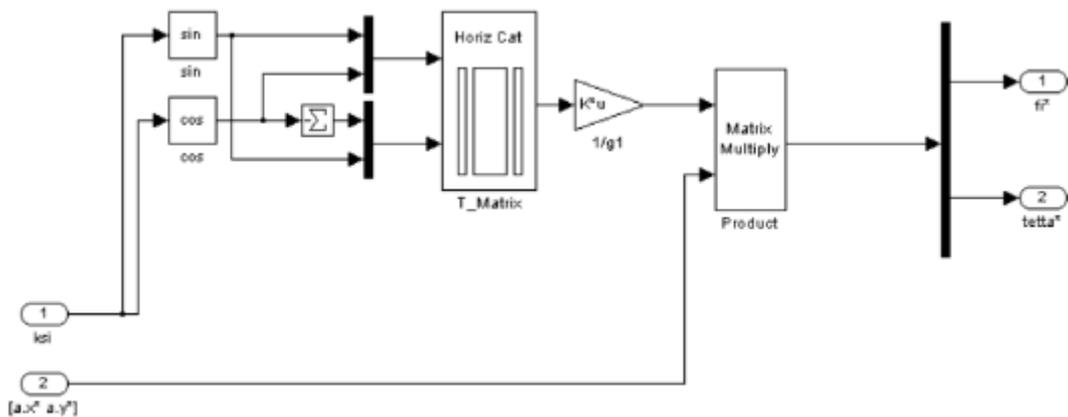
Блок расчета желаемого ускорения для ухода от столкновения в зависимости от расстояния между парой агентов.



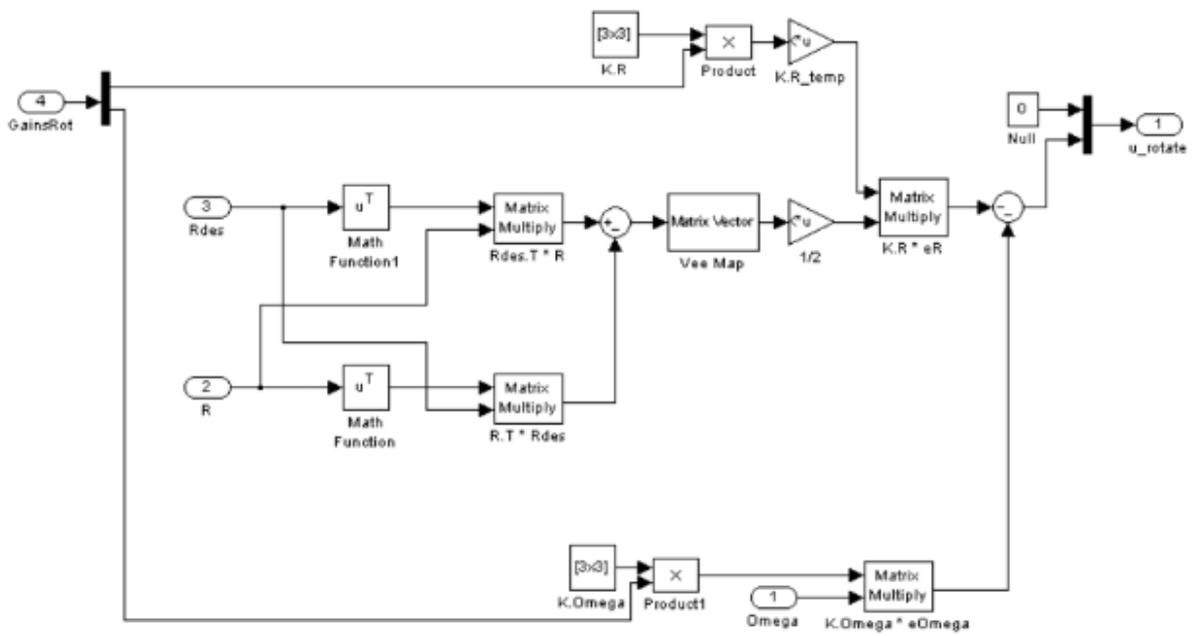
Блок управления положением в режиме ведущего агента.



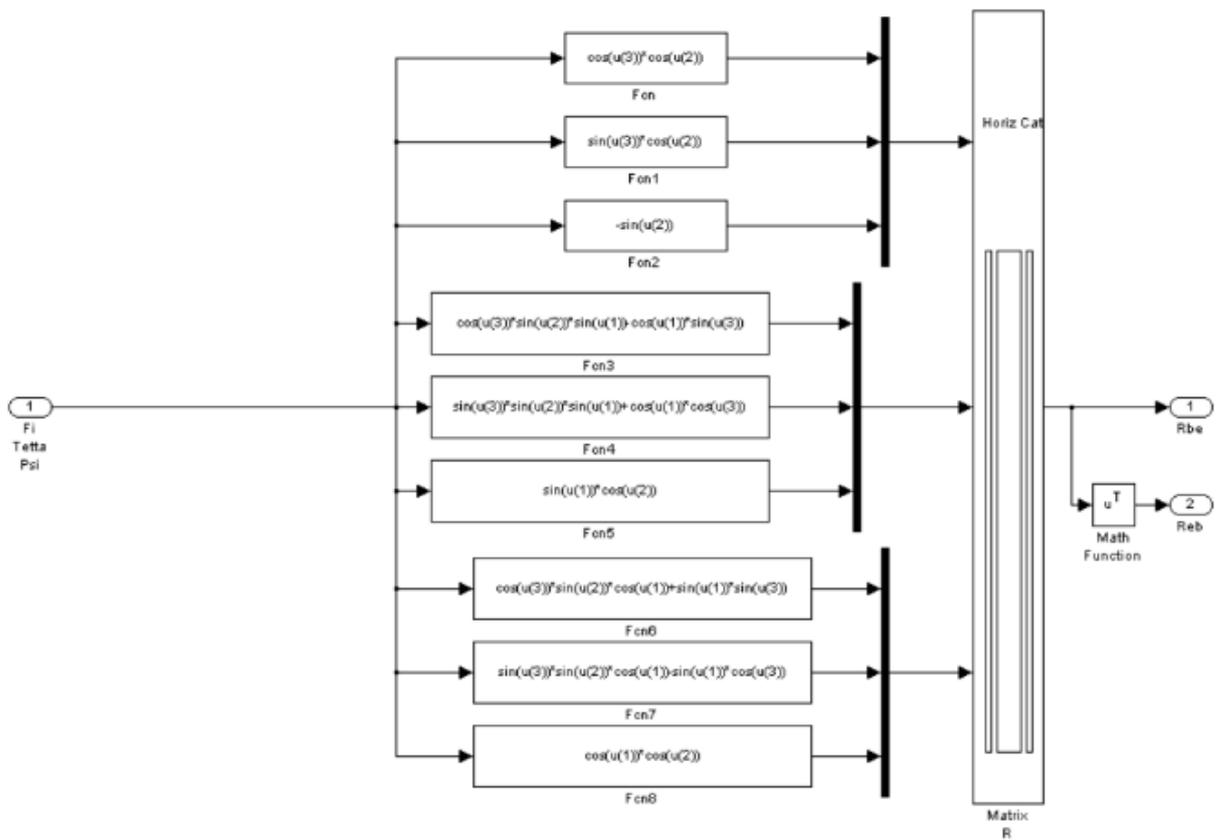
Блок управления угловой ориентацией квадрокоптера.



Блок управления высотой квадрокоптера.



Блок расчета главного момента управления на основе ошибки матрицы поворота.



Блок расчета матрицы поворота.

## Приложение Е

### Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Helicopter Modelling & Control

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM5Б	Провоторов Павел Андреевич		

Консультант кафедры

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель каф. ИЯ ИК	Пичугова Инна Леонидовна			

Консультант – лингвист кафедры

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель каф. ИЯ ИК	Пичугова Инна Леонидовна			

# **Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Helicopter Modelling & Control**

## **Abstract**

### **1. Introduction**

#### **1.1 Background**

The following dynamics model pertains to a quad-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) helicopter which is intended to be used as a search and rescue field robot. The use of a rotorcraft allows for high degrees of manoeuvrability, including the ability to hover. The ultimate aim is to develop a self-stabilizing and self-navigating UAV capable of performing autonomous take-offs and landings similar to the unmanned aerial system (UAS) developed at Stellenbosch University. This way, the UAV is able to transmit data to operators situated at a safe vantage point at the scene of a disaster. In most cases, the state of such disaster sites is too dangerous for human expedition. By using robots, the site can be properly analysed and better decisions can be made with regards to the execution of a rescue operation. The use of a hovering robot as a search and rescue robot means that rescue team response times can be kept to a minimum. This is important as it is crucial to seek victims as soon as possible to ensure the best possible survival rate. One of the most successful multi-rotor platforms is the Draganflyer X-Pro. This was used as a platform for research conducted at the Royal Institute of Technology in Stockholm, Sweden. The reason for pursuing a multi-rotor rotorcraft is due to the small rotor spans allowable, thus minimising the damage in the event of a collision. The large rotor spans of conventional helicopters are too dangerous to manoeuvre in confined spaces as well as near injured victims.

It must be noted that this is not the only method for deriving a mathematical model for a system such as this, but is the preferred method for the author. Research conducted at the University of South Florida presented a heuristic technique that applies simulated annealing search to derive mathematical equations.

#### **1.2 Quad-rotor Helicopter Structure**

The structure of a quad-rotor helicopter is a simple one, basically comprising of four rotors attached at the ends of a symmetric cross. A proposed structure is presented in figure 1.

The key features that should be taken into account in such a structure are symmetry and rigidity. To avoid unstable flight, the structure should be as rigid as possible, while maintaining the lightest possible weight. The best way to achieve this is through lightweight alloys or composites. Symmetry is also of great importance for stability. The centre of gravity (COG) should be kept as close to the middle of the rotorcraft as possible, as depicted in figure 3.



Figure 1. Proposed quad-rotor helicopter structure

### **1.3 System Integration**

The electronic system integration is presented in figure 2. The key components are a microcontroller, electronic speed controllers (ESC's), an attitude and heading reference system (AHRS), a communication interface between the UAV and the user, a vision system and suitable power distribution.

The microcontroller receives data from the AHRS, vision system and communication interface, which is then processed so that orders can be executed to the ESC's to control the motor.

The AHRS measures the inertial movements of the UAV. It comprises of an inertial measurement unit (IMU) and a global positioning system (GPS). The IMU

contains 3-axis accelerometers and gyroscopes to measure translational and rotational body motion respectively. It also consists of a magnetometer, which acts as a digital compass and determines the heading of the UAV. The GPS is used to determine the location of the rotorcraft. Another component which could be added to the AHRS is a pressure sensor to measure altitude. However, these sensors are only suitable for high altitude applications and therefore, it would be more appropriate to use rangefinder to determine the altitude of the UAV. These rangefinders could be either sonar or laser and form as part of the vision system. The vision system is used to detect possible obstacles in the path of the rotorcraft, as well as transfer visual data to the user via the communication interface.

Lithium Polymer (LiPo) batteries are the most suitable power source in such applications due to their lightweight properties. Power is distributed to all the electronics in the system via a power distribution board (PDB).

#### **1.4 Flight Dynamics**

Like a conventional helicopter, a quad-rotor helicopter is a six-degree-of-freedom, highly non-linear, multivariable, strongly coupled, and under-actuated system. The main forces and moments acting on a quad-rotor helicopter are produced by its rotors. It is arguably a simpler setup from its dual rotor counterpart, as quad- rotor helicopters can be controlled exclusively by variation in motor speed. Two pairs of rotors rotate in opposite directions to balance the total torque of the system. Figure 3, shows a free body diagram of a typical quad-rotor type helicopter. As shown, only two reference frames are used (the earth fixed frame, E, and the body frame, B), unlike that of a conventional helicopter which has three. The reason for this is that the rotors of a quad-rotor helicopter are fixed; whereas the main rotor of a conventional helicopter has actuators to control the roll and pitch angles, which moves independent of the fuselage.

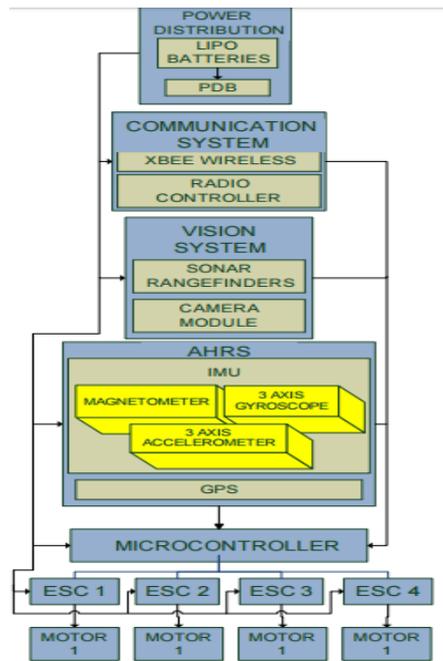


Figure 2. Electronic system integration

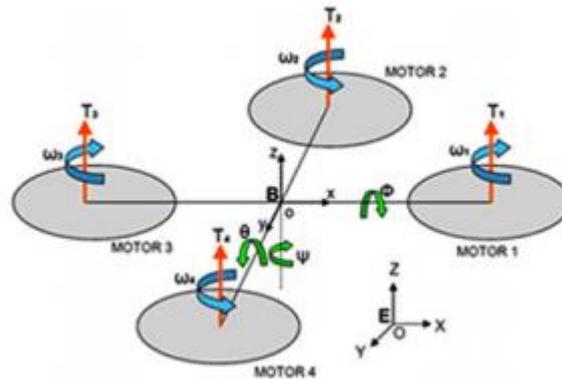


Figure 3. Free body diagram of a quad-rotor helicopter

A quad-rotor setup is controlled by manipulating thrust forces from individual rotors as well as balancing drag torque. For hovering, all rotors apply a constant thrust force, thus keeping the aircraft balanced. To control vertical movement, the motor speed is simultaneously increased or decreased, thus having a lower or higher total thrust but still maintaining balance. For attitude control, the yaw angle ( $\psi$ ) may be controlled by manipulating the torque balance, depending on which direction the aircraft should rotate. The total thrust force still remains balanced, and therefore no altitude change occurs. In a similar way, the roll angle ( $\phi$ ) and pitch angle ( $\theta$ ) can be manipulated applying differential thrust forces on opposite rotors.

Although this may seem simple in theory, practically, there will be many factors which need to be taken into account. One of the greatest challenges will be to achieve stability in an outdoor environment. Especially a disaster area where there will be many obstacles and possibly harsh winds.

## **1.5 Rotor Aerodynamics**

As with conventional helicopters, most of the aerodynamic significance of quad-rotor helicopters lies within their rotors. The propellers, motors and batteries determine the payload and flight time performance of the aircraft. The rotors, especially, influence the natural dynamics and power efficiency. Research at the Australian National University has shown that an approximate understanding of helicopter rotor performance can be obtained from the momentum theory of rotors. This performance is very important. As a search and rescue robot, the rotorcraft will be exposed to harsh environments where it should be able to produce enough thrust force to counter any bursts of external forces applied to it in order for it to stabilise itself. Further, it should be able to carry the payload of equipment such as cameras, sensors, etc.

## **2. Rotor Aerodynamics: Momentum theory and blade element theory**

Momentum theory can be used to provide relationships between thrust, induced velocity and power in the rotor. Using energy conservation, it can be shown that in hover,

$$T = 2\rho Av_i^2 \quad (1)$$

Where  $T$  is the thrust,  $\rho$  is the density of air,  $A$  is the area of the rotor, and  $v_i$  is the induced air velocity at the rotor. Blade element theory is particularly useful for airfoil and rotor performance. The forces and moment developed on a uniform wing are modelled by,

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 c \quad (2)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 c \quad (3)$$

$$M = C_M \frac{1}{2} \rho v^2 c^2 \quad (4)$$

Where, for unit span, L is the lift produced, D is the profile drag and M is the pitching moment. v is the velocity of the wing through the air and c is the chord length. CL, CD and CM are dimensionless coefficients of lift, drag and moment, respectively. They are dependent upon the wing's Reynolds Number (RE), Mach number and angle of attack ( $\alpha$ ). For a rotor with angular velocity  $\omega$ , the linear velocity at each point along the rotor is proportional to the radial distance from the rotor shaft,

$$v = \omega R \quad (5)$$

By integrating lift and drag along the length of the blade, equivalent rules may be produced for the entire rotor.

$$F_i = b \omega_i^2 \quad (6)$$

$$\tau_i = d \omega_i^2 \quad (7)$$

Where b and d are the thrust and drag moment constants respectively.

$$b = C_T \rho A R^2 \quad (8)$$

$$d = C_Q \rho A R^3 \quad (9)$$

$F_i$  is the thrust produced by rotor i,  $\tau_i$  is the drag moment and R is the rotor radius. CT and CQ are dimensionless thrust and drag moment coefficients. It is also evident from equation (6) and equation (7) that the thrust force and rotor torque is directly proportional to the angular velocity of the rotor. This is a useful relationship, as the rotor angular velocity can be controlled by the motor, thus, the thrust force and drag moment can also be controlled by the motor. Smaller rotors require higher speeds and more power than larger rotors for the same thrust. The respective total thrust force and rotor torque of the system is,

$$f = \sum_{i=1}^4 F_i \quad (10)$$

Besides the thrust force and the drag moment, which are the predominant aerodynamic forces and moments created by a rotor, there exist three other external aerodynamic influences which act on a propeller. The first is called ground effect. This refers to the variation of the thrust co-efficient when the rotor is in close proximity to the ground. The ground effect thrust force may be described as,

$$F_{IGE} = C_T^{IGE} \rho A (\omega_i R)^2 \quad (11)$$

Where,  $C_T^{IGE}$  is the thrust co-efficient near ground level. Another influential aerodynamic force occurs as a result of horizontal forces acting on all the blade elements, known as the hub force,

$$H = C_H \rho A (\omega_i R)^2 \quad (12)$$

$C_H$  is the hub force co-efficient. The third influence, referred to as rolling moment  $R_m$ , is the combined moment due to the lift at each point along the radius of the rotor,

$$R_m = C_{R_m} \rho A (\omega_i R)^2 R \quad (13)$$

Where,  $R_{mc}$  is the rolling moment co-efficient.

### 3. Co-ordinate Reference Frames and the Rotation Matrix

There are two co-ordinate reference frames when analysing quad-rotor helicopter dynamics. The first is the earth fixed frame, labelled E in figure 3. The other is the body reference frame, labelled B, which is a rotating co-ordinate frame with the origin, situated at the centre of gravity of the rotorcraft. All rotation occurs about the origin, and can be described by specifying an axis of rotation as well as an angle by which the frame is being rotated. This type of rotation is described in Euler's Theorem, which states that the relative orientation of any pair of co-ordinate frames is uniquely determined by a rotation by angle,  $\Phi$ , about a fixed axis through the common origin, called the Euler axis. This unique rotation is termed the principal angle. A graphical representation can be shown in figure 6,

where the vector  $e$  is the Euler axis and the rotation angle  $\Phi$  represents the principal angle.

Since the body motion sensors will be attached directly to the reference frame, the readings will be with relation to the rotated frame. Therefore, it is important to obtain these co-ordinates in order to successfully model the system. This is done through a rotation matrix. If unit vectors,  $i$ ;  $j$  and  $k$ , in the direction of the  $x$ ;  $y$  and  $z$  axes respectively, are rotated to the orientation of  $x'$ ;  $y'$  and  $z'$ , with unit vectors  $i'$ ,  $j'$  and  $k'$  respectively, then these new unit vectors can be represented in terms of the original orientation with the use of a rotation matrix,

$$\begin{bmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (14)$$

Where,

$$R = \begin{bmatrix} i' \cdot i & i' \cdot j & i' \cdot k \\ j' \cdot i & j' \cdot j & j' \cdot k \\ k' \cdot i & k' \cdot j & k' \cdot k \end{bmatrix} \quad (15)$$

#### 4. Quad-Rotor Dynamics Modelling

The Euler-Lagrange method is used to model the flight dynamics of the rotorcraft. The model stands under the assumptions that the motor dynamics are relatively fast and may therefore be neglected. Also, the rotor blades are assumed to be perfectly rigid and no blade flapping occurs. Although this does occur in reality, the effects of this phenomenon are minuscule and will be considered later in the research. External wind forces are also not considered at this stage. The equations of motion are developed in terms of the translational and rotational parameters of the six-degree-of-freedom system, using generalised co-ordinates in a vector  $q$ ,

$$q = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (22)$$

These co-ordinates can be separated into translational,  $\xi$ , and rotational,  $\eta$ , co-ordinates where,

$$\xi = [x \ y \ z]^T \text{ and } \eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T \quad (23)$$

Therefore,

$$q = [\xi \ \eta]^T \quad (24)$$

A Lagrangian is obtained by modelling the energy of the system, where the difference between kinetic and potential energy is taken. Kinetic energy of the system is modelled for both translational and rotational motion. The potential energy of the system is related only to the altitude of the rotorcraft. The Lagrangian, L, can be expressed as

$$L = T - U \quad (25)$$

Where, T is the kinetic energy and U is the potential energy of the system. The total kinetic energy of the system is the sum of the energy due to the translational motion and rotational motion. Therefore, the final expression obtained for the Lagrangian is,

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{\xi}^T m \dot{\xi} + \frac{1}{2} \dot{\eta}^T I \dot{\eta} - mgz \quad (26)$$

This can be reduced to,

$$\begin{aligned} L(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \\ &+ \frac{1}{2} (I_{xx} \dot{\phi}^2 + I_{yy} \dot{\theta}^2 + I_{zz} \dot{\psi}^2) - mgz \end{aligned} \quad (27)$$

For this analysis, the Euler-Lagrange equation with an external generalised force is used.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = F \quad (28)$$

Where, the force F represents all the external forces acting on the body of the rotorcraft. Again, this can be split into translational,  $F_\xi$  and rotational,  $\tau$  components. Where,

$$F_\xi = [F_x \ F_y \ F_z]^T \quad (29)$$

And,

$$\tau = [\tau_\phi \quad \tau_\theta \quad \tau_\psi]^T \quad (30)$$

Therefore,

$$F = [F_\xi \quad \tau]^T \quad (31)$$

The PDE's can be expressed as,

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \\ I_{xx}\ddot{\phi} + \dot{I}_{xx}\dot{\phi} \\ I_{yy}\ddot{\theta} + \dot{I}_{yy}\dot{\theta} \\ I_{zz}\ddot{\psi} + \dot{I}_{zz}\dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (32)$$

And,

$$\frac{\partial L}{\partial q} = [0 \quad 0 \quad -mg \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (33)$$

The only forces acting on the body are those from the rotor. The translational forces are the thrust forces resulting from each rotor, and the rotational forces are due to the drag moment as well as the moment caused by thrust forces from opposite rotors about the centre of gravity. It must be noted that hub force, ground effect and gyro effects were not taken into account, as the model was developed for the purpose of designing a control system around it, and thus should be kept as simple as possible, with only the main effects being taken into account. Therefore the translational force is,

$$F_{rotor} = [0 \quad 0 \quad f]^T \quad (34)$$

Where,  $f$  is the total thrust force. However, this force is always in the  $z$ -direction of the body reference frame. In order to obtain a force that will correlate with the global co-ordinates and sensor readings, the rotation matrix discussed in equation (21) is used. This allows the author to compare sensor

readings with calculated values to find a correlation between theoretical and measured parameters. Therefore,

$$F_{\xi} = R.F_{rotor} \quad (35)$$

It can be seen that,

$$F_{\xi} = \begin{bmatrix} -f \sin \theta \\ f \sin \phi \cos \theta \\ f \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (36)$$

For the rotational component  $\tau$ , moments are taken from about the centre of gravity in the roll and pitch directions.

Therefore,

$$\tau_{\phi} = (F_{M3} - F_{M1})l \quad (37)$$

$$\tau_{\theta} = (F_{M2} - F_{M4})l \quad (38)$$

Where,  $l$  is the linear distance from the centre of the rotor to the centre of gravity. In the direction of yaw, the sum of all the drag moments produced by the rotors are taken into account,

$$\tau_{\psi} = \sum_{i=1}^4 \tau_{Mi} \quad (39)$$

Where,  $\tau_{Mi}$  is the torque produced by rotor  $i$ . Therefore, the total force function can be represented as the following vector,

$$F = \begin{bmatrix} -f \sin \theta \\ f \sin \phi \cos \theta \\ f \cos \phi \cos \theta \\ (F_{M3} - F_{M1})l \\ (F_{M2} - F_{M4})l \\ \sum_{i=1}^4 \tau_{Mi} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Thus, the Euler-Lagrange equation, together with equations (32), (33) and (40) yields,

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \\ I_{xx}\ddot{\phi} + \dot{I}_{xx}\dot{\phi} \\ I_{yy}\ddot{\theta} + \dot{I}_{yy}\dot{\theta} \\ I_{zz}\ddot{\psi} + \dot{I}_{zz}\dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f \sin \theta \\ f \sin \phi \cos \theta \\ f \cos \phi \cos \theta \\ (F_{M3} - F_{M1})l \\ (F_{M2} - F_{M4})l \\ \sum_{i=1}^4 \tau_{Mi} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Therefore,

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{m} \sin \theta \\ \frac{f}{m} \sin \phi \cos \theta \\ \frac{f}{m} \cos \phi \cos \theta - g \\ \frac{1}{I_{xx}}((F_{M3} - F_{M1})l - \dot{I}_{xx}\dot{\phi}) \\ \frac{1}{I_{yy}}((F_{M2} - F_{M4})l - \dot{I}_{yy}\dot{\theta}) \\ \frac{1}{I_{zz}}\left(\sum_{i=1}^4 \tau_{Mi} - \dot{I}_{zz}\dot{\psi}\right) \end{bmatrix} \quad (42)$$

Near hover, the angular rates can be taken to be negligible.

## 5. Quad-Rotor Control

Attitude ( $\phi$ ,  $\theta$  and  $\psi$ ) and altitude ( $z$ ) had to be taken into account in order to stabilise the rotorcraft. Position ( $x$  and  $y$ ) is dependent on the roll and pitch angle orientation. Thus, the position can be controlled via attitude control. Therefore, the system is an under actuated one, having six degrees of freedom and only four control inputs. Essentially, all manoeuvres that are executed by the rotorcraft are resultant from the manipulation of thrust and drag moment created by the four rotors. These parameters are related using the relationship described in equation (6) and equation (7). It is evident from this that by controlling the rotational speed of the motors, one can effectively control the rotorcraft. Therefore, the following are chosen for control inputs based on works conducted at Lausanne and Stanford University

$$u_1 = b(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (43)$$

$$u_2 = b(\omega_3^2 - \omega_1^2)l \quad (44)$$

$$u_3 = b(\omega_2^2 - \omega_4^2)l \quad (45)$$

$$u_4 = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (46)$$

Where,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  and  $u_4$  are control inputs for altitude, roll, pitch and yaw respectively. From this, the simplified model derived in equation (42) becomes,

$$\ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{m}\sin\theta \\ \frac{f}{m}\sin\phi\cos\theta \\ \frac{f}{m}\cos\phi\cos\theta - g \\ \frac{1}{I_{xx}}u_2 \\ \frac{1}{I_{yy}}u_3 \\ \frac{1}{I_{zz}}u_4 \end{bmatrix} \quad (47)$$

It is evident from equation (47) that the simplified system is linear and not coupled. Thus, a linear PD controller design was chosen to be used. The control inputs described in equation (43) to equation (46) may be represented in vector form,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ -bL & 0 & bL & 0 \\ 0 & bL & 0 & -bL \\ d & -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Equation can be rearranged to be found in terms of the rotational speed vector,

$$\begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4b} & -\frac{1}{2bL} & 0 & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & 0 & \frac{1}{2bL} & -\frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & \frac{1}{2bL} & 0 & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & 0 & -\frac{1}{2bL} & -\frac{1}{4d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (48)$$

From this, the desired motor speed may be computed so that it can then be sent to the motor controllers. The columns of the matrix in equation (48) correspond to each control input, and the rows correspond to the square of the rotational speed of each motor. Thus, the square root of each row must be computed before the values can be sent to the controller. There are four feedback control loops (figure 7) which are separate from each other, which for a PD controller, takes the form,

$$U = k_p(\text{proportional error}) + k_d(\text{derivative error})$$

The PD controllers for altitude, roll, pitch and yaw respectively are,

$$U_1 = k_{p_{ALT}} (y_{ref} - y) + k_{d_{ALT}} (\dot{y}_{ref} - \dot{y}) \quad (49)$$

$$U_2 = k_{p_{ROLL}} (\phi_{ref} - \phi) + k_{d_{ROLL}} (\dot{\phi}_{ref} - \dot{\phi}) \quad (50)$$

$$U_3 = k_{p_{PITCH}} (\theta_{ref} - \theta) + k_{d_{PITCH}} (\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}) \quad (51)$$

$$U_4 = k_{p_{YAW}} (\psi_{ref} - \psi) + k_{d_{YAW}} (\dot{\psi}_{ref} - \dot{\psi}) \quad (52)$$

These feedback control loops will be implemented using a microcontroller as explained in figure 4.

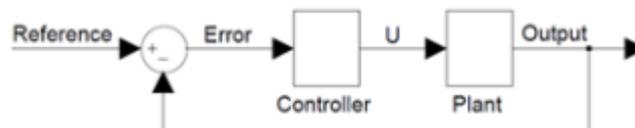


Figure 7. Feedback control loop

## **Conclusion**

The rotorcraft behaviour described by the simulated model does correlate with what is expected in reality. However, the physical parameters documented are not completely accurate due to the restraining force exerted by the air not being taken into account. In reality, the velocity of the rotorcraft will reach a terminal velocity at some point, and not continue to increase. This phenomenon will be investigated in the near future, as it serves as a subject of importance to the research. However, it extends out of the limits of this paper. The information obtained from the dynamics model was used for the development of the control system. The rotorcraft will be almost impossible to operate without the implementation of a stabilizing control system. Even the slightest variation of rotor speed can result in a possible crash due to the rotorcraft spinning out of control. Speed controllers for the electric motors have to be as accurate as possible, with control feedback times kept to a minimum. This will be a challenging task and will require very sensitive gyroscopes, accelerometers and magnetometers to detect when the rotorcraft has strayed off path and requires correction. To successfully manoeuvre the rotorcraft in the translational x and y directions, the control system must also be used to ensure a torque balance so that the correct heading is obtained. The assistance of a GPS module will also enhance the directional control of the rotorcraft. The correct angle of attack as well as a preservation of the total upward thrust must also be executed to ensure stability while preserving the direction of the craft.

**РЕЦЕНЗИЯ**  
**на магистерскую диссертацию**

Студент	Провоторов Павел Андреевич
---------	----------------------------

Направление / специальность	27.04.04 Управление в технических системах
-----------------------------	--

Кафедра	Систем управления и мехатроники	Институт	Кибернетики
---------	---------------------------------	----------	-------------

Тема работы
<b>Использование группы квадрокоптеров для обнаружения утечек и несанкционированных врезок нефтепроводов</b>

Представленная на рецензию работа содержит пояснительную записку на 128 листах на формате А4.

Работа выполнена в соответствии с заданием и в полном объеме.

Рецензируемая работа содержит 6 глав.

В первой главе:

Представлен аналитический обзор методов управления квадрокоптерами и постановка задачи.

Во второй главе:

Представлен алгоритм управления одиночным квадрокоптером. Линеаризована динамическая модель с целью использования линейных уравнений движения в алгоритме управления.

В третьей главе:

Представлено децентрализованное управление квадрокоптером в мультиагентной системе. Произведена модификация алгоритма К. Рейнольдса для возможности движения строем и изменения ориентации геометрической структуры МАС относительно направления движения.

В четвертой главе:

Представлена модель системы управления, среда моделирования и экспериментальные исследования.

В пятой главе:

Освещены вопросы финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Произведен расчет общей себестоимости разработки и проведена оценка научно-технического НИР.

В шестой главе:

Рассмотрены возможные ЧС которые могут возникнуть на производстве и мероприятия по предотвращению ЧС.

Оценка работы рецензентом в целом:

В связи с тем, что в настоящее время роботы находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности, применение групп малоразмерных автономных роботов позволит расширить функциональные возможности и повысить эффективность применения таких роботов. Использование группы малоразмерных автономных роботов позволит проводить мониторинг нефтегазодобывающих объектов для обнаружения аварийных участков, слежение за мероприятиями по капитальному ремонту нефтепровода, а также периодичный облет нефтепровода для предотвращения еще не случившейся аварийной ситуации.

В результате проведенной работы построена модель системы децентрализованного управления группой квадрокоптеров с двумя режимами строевым и роевым. Работа выполнена качественно с использованием современного программного обеспечения. С помощью теоретического материала Провоторов Павел в полной мере проработал данную выпускную квалификационную работу и сформулировал выводы в работе достаточно обосновано. Данная работа может применяться в практической деятельности в нефтегазовой отрасли, с целью предотвращения аварийных ситуаций. К недостатку можно отнести не в полной мере рассмотренную зарубежную литературу по исследуемой проблеме, однако найденные недостатки не влияют на качество работы по данной проблеме.

Выполненная работа может быть признана законченной квалификационной работой, соответствующей всем требованиям, а ее автор,

Провоторов Павел Андреевич

заслуживает оценки:

отлично

и присуждения квалификации магистра по:

направление / специальность

27.04.04 Управление в технических системах

Начальник службы ИКТ ОАО «Томскнефть» ВНК

Мехтиев Э.М.

(подпись, организация-места работы рецензента)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

