



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалавр)

На тему Разработка модели управления группой подвижных подводных объектов

Исполнитель Бойцов Иван Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор технических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор технических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

« ___ » _____ 2023 г.

Санкт–Петербург

2023

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ	6
1.1 Краткое описание подводных аппаратов	6
1.2 Классификация подводных необитаемых аппаратов	8
1.3 Задачи, реализуемые группами подвижных подводных объектов	10
1.4 Обзор подходов к управлению группами подвижных подводных объектов.....	12
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЧАСТИ.....	21
2.1 Кинематическая составляющая математической модели	22
2.2 Динамическая составляющая математической модели	24
2.3 Описание регулировки степени тангажа и глубины погружения	27
2.4 Описание модели обхода препятствий	31
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ПОДВОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ	36
3.1 Создание модели устройства регулировки тангажа и глубины погружения.....	38
3.2 Управление группой подвижных подводных объектов по подходу «лидер-ведомый» на плоскости.	43
3.3 Управление группой подвижных подводных объектов по подходу «лидер-ведомый» в трехмерном пространстве	48
3.4 Преодоление препятствий.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	57

ВВЕДЕНИЕ

Роботы используются во многих областях науки, техники промышленности. В частности, они используются на территориях, загрязненных радиоактивными или химическими веществами, в военных действиях, при освоении подводного мира или космоса, а также в других местах, где деятельность человека затруднена или невозможна. Вопросу создания роботов различного назначения посвящено большое количество исследований, проводимых в России и за рубежом. В результате основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики при создании роботов, такие как распознавание объектов и сцен, моделирование среды, планирование траекторий движения и перемещений для достижения целей, управление движением с учетом динамики робота, хорошо изучены.

С другой стороны, отдельный робот, каким бы интеллектуальным он ни был, имеет относительно небольшие возможности для выполнения задач (небольшой радиус действия, ограниченные бортовые источники питания, небольшое количество функций, которые он может выполнять, ограниченный набор исполнительных механизмов, возможность выполнения конкретной задачи при работе в экстремальных условиях (маловероятно), понятно, что они могут быть использованы только для решения конкретных задач или выполнения относительно простых операций,

Очевидным решением указанной проблемы является объединение нескольких роботов в одну группу.

Преимуществами использования роботов в группах являются большой радиус действия, достигаемый за счет распределения роботов по всей рабочей зоне, и более широкий спектр функций, достигаемый за счет размещения отдельных исполнительных устройств на каждом роботе, и, наконец, более высокая вероятность выполнения работы за счет возможности перераспределения целей между роботами в группе в случае отказа некоторых роботов.

Таким образом, сложные задачи, такие как, например, масштабная разведка и обнаружение других планетарных поверхностей, сборка сложных конструкций в космосе или под водой, участие в боевых или вспомогательных операциях, разминирование территории, могут быть эффективно решены только при условии группового взаимодействия роботов. При этом возникают новые проблемы группового контроля и коммуникации, связанные с регулированием коллективного поведения роботов.

В подводной робототехнике, в дополнение к общим проблемам групповой робототехники, было добавлено несколько специфических, в том числе:

- низкая пропускная способность подводных акустических систем связи, что в свою очередь накладывает строгие ограничения на взаимодействие аппаратов друг с другом;
- потенциал точности автономной подводной навигации ограничен, и его трудно предсказать.

Вышеизложенные проблемы необходимо преодолеть, чтобы группа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) могла успешно достигать поставленных перед ними целей.

Актуальность данной работы заключается в том, что использование группы подводных аппаратов помогает решать проблемы, связанные с морской экологией, национальной безопасностью и эффективностью морских операций. Разработка модели управления группой подводных аппаратов актуальна во многих областях, таких как морские исследования, добыча нефти и газа на морском дне, подводный транспорт и судоходство, военные операции.

Целью данной работы является разработка модели управления группой подводных подвижных объектов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- изучение современного состояния области исследования;
- анализ существующих моделей и подходов;

- разработка модели устройства управления тангажом и глубиной погружения;
- разработка модели и демонстрация полученных результатов.

Объект исследования - группа подвижных подводных объектов.

Предмет исследования – модель управления группой подвижных подводных объектов.

Список сокращения:

НПА – необитаемые подводные аппараты

НПНА – неавтономные (привязные) необитаемые подводные аппараты

АНПА – автономные необитаемые подводные аппараты

ТНПА – телеуправляемые необитаемые подводные аппараты

ИПП – искусственное потенциальное поле

ССК – связанная система координат

АСК – абсолютная система координат

PID/ПИД регулятор – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

ЦП — центр плавучести

ЦМ – центр масс

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

1.1 Краткое описание подвижных подводных объектов

Необитаемые подводные аппараты (НПА) в настоящее время являются активно развивающейся областью подводной робототехники гражданского и военного назначения. Применение НПА в гражданских целях подразумевает использование их в области разведки, изучения и освоения месторождений в Мировом океане. В военных целях НПА применяются в районах, опасных или недоступных для передвижения подводных лодок и обитаемых подводных аппаратов. Принято выделять два больших класса подводных аппаратов, неавтономные (привязные) и автономные обитаемые подводные аппараты. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки [2].

Неавтономные (привязные) обитаемые подводные аппараты (НПА) – это подводные аппараты, которые не могут двигаться автономно, а привязаны к судну или береговой станции посредством кабеля. Они используются для выполнения различных задач на морском дне, таких как обслуживание подводных сооружений, поиск и подъем потерпевших крушение судов, а также для выполнения научных исследований [9,12].

Одним из главных преимуществ НПА является их точность и надежность в работе. Благодаря тому, что они привязаны к судну или береговой станции, можно точно контролировать их перемещение и выполнение задач. Использование НПА также снижает риски для человеческой жизни. В то время как подводные работы, которые раньше выполнялись людьми, были связаны с опасностью для жизни, использование НПА позволяет избежать этого [10]. НПА могут работать в экстремальных условиях, например, в зоне подводных вулканов или в районах сильных течений. Это позволяет проводить исследования в местах, которые ранее были недоступны для исследования.

Однако, использование НПНА также имеет свои недостатки. Например, из-за привязки к судну или береговой станции, НПНА могут быть ограничены в своей свободе перемещения и выполнения задач. Также, из-за ограниченности энергетических ресурсов, НПНА могут быть ограничены в продолжительности работы на морской глубине [15].

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) – это класс аппаратов, выполняющих работы под водой без связи с оператором (в некоторых случаях возможна кратковременная связь для принятия решения в критической ситуации либо для обновления маршрута следования). АНПА все больше заменяют традиционные методы исследования океана [2]. Они являются важным инструментом для изучения морской фауны и флоры, обслуживания подводных сооружений, поиска и спасения людей, а также для выполнения научных исследований.

Основными компонентами АПНА являются корпус, система энергопитания, система управления и навигации, а также различные датчики и инструменты. Корпус АПНА выполнен из прочных материалов, которые обеспечивают ему высокую прочность и герметичность. Система энергопитания может быть выполнена как на основе аккумуляторов, так и на основе солнечных батарей или топливных элементов. Система управления и навигации позволяет АПНА автономно перемещаться по морской глубине, а также выполнять различные задачи[2,9].

Датчики, установленные на АПНА, позволяют собирать информацию о морской среде, такую как температура, соленость, давление и другие параметры. Эта информация может быть использована для изучения морской фауны и флоры, а также для прогнозирования изменений в морской среде.

Одной из главных преимуществ АПНА является их автономность. Они могут работать на морской глубине в течение длительного времени без необходимости выхода на поверхность для замены энергетических ресурсов или обслуживания. Это позволяет значительно увеличить эффективность проводимых исследований и задач на морском дне [11,8].

Однако, использование АПНА также имеет свои недостатки. Например, из-за отсутствия прямого контроля со стороны человека, возможны ошибки в работе систем управления и навигации, что может привести к потере АПНА. Также, из-за ограниченности энергетических ресурсов, АПНА могут быть ограничены в продолжительности работы на морской глубине [2,5].

Тем не менее, АПНА являются важным инструментом для проведения исследований морской глубины и выполнения различных задач на морском дне. Их использование позволяет значительно увеличить эффективность проводимых исследований и задач, а также снизить риски для человеческой жизни. В будущем, с развитием технологий, можно ожидать еще большего расширения возможностей АПНА и их применения в различных областях.

1.2 Классификация подводных необитаемых аппаратов

В современной науке выделяют два больших подкласса необитаемых подводных аппаратов: неавтономные (привязные) и автономные необитаемые подводные аппараты. В свою очередь каждый из них можно разделить на несколько групп.

Неавтономные (привязные) НПА разделяют на :

- глубоководные научно-исследовательские телеуправляемые подводные аппараты (ТПА);

- военные противоминные телеуправляемые аппараты (одноразовые и многократные).

Автономные НПА принято классифицировать следующим образом:

- большие АНПА;
- тяжелые АНПА;
- легкие АНПА;
- малогабаритные (переносные) АНПА;
- глайдеры (подводные планеры).

Согласно ГОСТ Р 56960-2016 основным классифицирующим признаком НПА являются:

- назначение (поисковые, обследовательские, рабочие, океанологические, многоцелевые)
- способ питания (телеуправляемые НПА, автономные НПА, полуавтономные НПА);
- способ управления (дистанционно управляемые оператором, автоматически управляемые по программе);

• массогабаритные характеристики:

Для ТНПА:

- а) микро, масса менее 5 кг;
- б) мини, масса которых составляет от 5 до 30 кг;
- в) легкие, массой от 30 до 100 кг;
- г) средние, массой от 100 до 2000 кг;
- д) тяжелые, массой более 2000 кг.

Для АНПА:

- а) легкие с массой менее 50 кг;
- б) средние с массой от 50 до 500 кг;
- в) тяжелые с массой от 500 до 5000 кг;
- мощность системы электроснабжения:
 - малые (выходная мощность до 10 кВт);
 - легкие (выходная мощность до 30 кВт);
 - средние (выходная мощность до 75 кВт);
 - тяжелые (выходная мощность свыше 75 кВт);
- способ перемещения в воде:
 - буксируемые,двигающиеся за судном-носителем по его траектории;
 - самоходные, имеющие движительную установку;
 - донные, перемещающиеся по грунту;
 - дрейфующие, перемещающиеся в толще воды под влиянием течения;

- тип движителей рулевого комплекса:
 - на активные (винтовые);
 - пассивные (рули) [1].

Данная классификация дает представление о всем многообразии необитаемых подводных аппаратов и позволяет создать аппарат, который будет отвечать всем необходимым требованиям ГОСТа.

1.3 Задачи, реализуемые группами подвижных подводных объектов

Группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) являются важным инструментом для выполнения различных задач в Мировом океане. Они используются для исследования морской среды, обслуживания подводных сооружений, поиска и подъема потерпевших крушение судов, а также для выполнения научных исследований и военных задач. Рассмотрим задачи, для которых используют группы подводных необитаемых аппаратов.

1. Исследование морской среды

Одной из главных задач, для которых используют АНПА, является исследование морской среды. АНПА оснащены различными датчиками, которые позволяют собирать информацию о температуре, солености, давлении и других параметрах морской воды. Эта информация может быть использована для изучения морской фауны и флоры, а также для прогнозирования изменений в морской среде [11].

2. Обслуживание подводных сооружений

АНПА также используются для обслуживания подводных сооружений, таких как нефтяные платформы, газопроводы и трубопроводы [16]. Они могут осуществлять инспекцию и ремонт подводных сооружений, а также устанавливать и заменять различные оборудования.

3. Поиск и подъем потерпевших крушение судов

АНПА используются для поиска и подъема потерпевших крушение судов. Они оснащены специальными датчиками и оборудованием, которые позволяют обнаруживать сигналы радиолокационных буев и других устройств, находящихся на затонувших судах. АНПА также могут использоваться для подъема обломков судов и других предметов с морского дна [14].

4. Выполнение научных исследований

АНПА используются для выполнения научных исследований в различных областях, таких как геология, биология, океанология и т.д. Они могут собирать образцы морской флоры и фауны, измерять параметры морской среды, а также выполнять другие задачи, связанные с научными исследованиями [15,16].

5. Мониторинг морской среды

АНПА используются для мониторинга морской среды и контроля за загрязнением морской воды. Они могут осуществлять обнаружение и измерение различных загрязнителей, таких как нефть, химические вещества и другие опасные вещества. Эта информация может быть использована для принятия мер по защите морской среды и предотвращению экологических катастроф [14,15].

6. Обнаружение и исследование объектов на морском дне

АНПА используются для обнаружения и исследования различных объектов на морском дне, таких как затонувшие суда, рифы и другие объекты. Они могут использоваться для создания карт морского дна и определения оптимальных мест для установки подводных сооружений.

Также группы АНПА могут выполнять задачи военной направленности:

- разведывательные (ведение гидроакустической, радиотехнической и оптоэлектронной разведки, разведки элементов противодесантной обороны);
- атака военных объектов в составе группы;
- обнаружение и подрыв мин;
- противолодочная оборона;

- антитеррористические и специальные операции;
- коммуникация надводных и подводных объектов;
- доставка подводных грузов.

Решение всех этих задач может быть возложено на АНПА в режиме групп. Группа, образованная множеством миниатюрных АНПА, формирует сетевое информационное поле, используемое координаторами в режиме реального времени. Подобные аппараты часто являются теряемыми (невозвращаемыми)[14],[16]. Группа может характеризоваться масштабируемостью, то есть возможностью практически неограниченного расширения количества АНПА в искусственном сообществе. Одновременно группа отличается высокой отказоустойчивостью и гибкостью, то есть при потере одного или нескольких АНПА, выполнит поставленную задачу в любом случае. Ключевое свойство морских АНПА группового применения — их небольшой размер. Такие аппараты, помимо снижения эксплуатационных затрат, могут безопасно для персонала и окружающей среды исследовать в поточном режиме ранее недоступные места (подо льдом, на дне, в котлованах, расщелинах, вблизи других объектов со сложным рельефом, и т. д.) [11,16].

1.4 Обзор подходов к управлению группами подвижных подводных объектов

Для достижения целей группам необходима соответствующая модель управления для эффективной координации движений АНПА. В целом, стратегии многоагентной координации можно условно разделить на две формы, в зависимости от используемой информации, т.е. централизованную координацию и децентрализованную координацию [19].

В централизованной форме управляющие команды или управляющие действия каждого АНПА планируются с помощью процедуры центрального управления, которая обеспечивает доступ к глобальной информации всем

участникам группы. Напротив, в децентрализованной структуре нет такого контроллера, планирующего действия для каждого АНПА в группе, и вместо этого АНПА принимают свои собственные решения, основываясь на имеющейся у них местной информации.

Фактически, на основе обширного обзора, было предпринято мало исследовательских усилий по разработке протоколов централизованной координации для приложений формирования АНПА, что связано с тем фактом, что каждый используемый АНПА обладает достаточными возможностями для восприятия окружающей среды, соответствующего планирования своих управляющих действий и связи с соседями.

Основываясь на этом наблюдении, в основном рассматриваем подходы, использующие децентрализованную координирующую структуру управления, которая включает в себя структуру следования за лидером, виртуальную структуру, подход, основанный на поведении, подход с искусственным потенциальным полем и другие распространенные структуры.

Подход «лидер-ведомый».

Структура "Лидер-ведомый" является одной из наиболее популярных схем, используемых для управления формированием многоагентных систем, из-за ее простого описания [19]. В такой схеме один или несколько агентов выбираются в качестве лидеров, а остальные агенты группируются в последователей, как показано на рисунке 1. Желаемый опорный сигнал известен только лидерам, и в обычной структуре следования за лидером цель лидеров состоит в том, чтобы просто отслеживать этот предписанный опорный сигнал, и нет явного взаимодействия между их агентами, которые следуют за ними. То есть, единственная цель оставшихся состоит в том, чтобы сохранить желаемую относительную позу (т.е. положение и направление) по отношению к своим ведущим агентам[5,19].

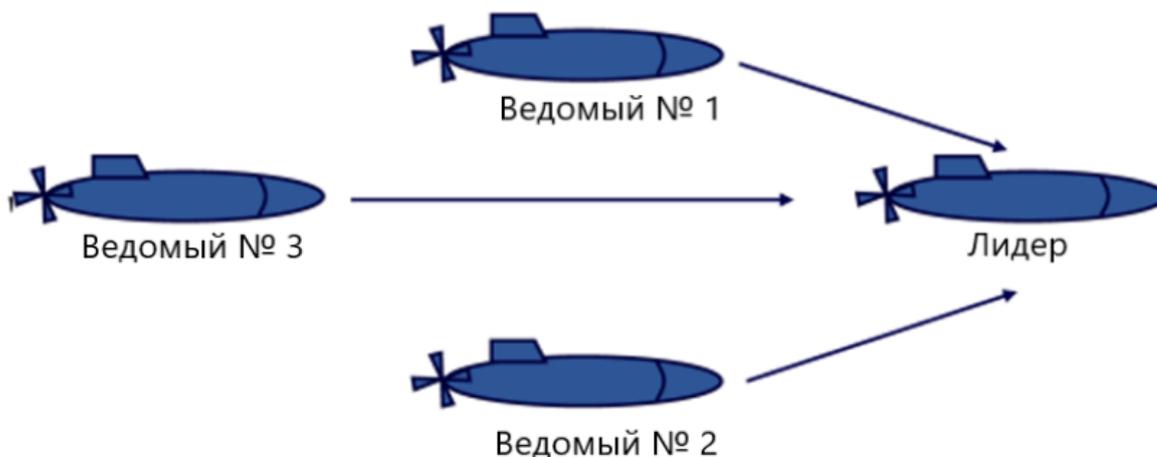


Рисунок 1 – Подход к управлению «лидер-ведомый»

Таким образом, цель контроля формирования, может быть достигнута, если достигнута цель каждого транспортного средства. Основными преимуществами такого метода являются простота внедрения и достаточная гибкость при добавлении или удалении транспортных средств, кроме того, поскольку нет прямого взаимодействия между соседними аппаратами, стабильность всей системы формирования может быть легко проанализирована на основе теории графов.

Однако такой подход страдает недостатком, заключающимся в том, что эффективность всей системы формирования в значительной степени зависит от поведения лидеров и качества коммуникации. Другими словами, однажды ведущие агенты или коммуникационная сеть не могут работать в обычном режиме из-за непредсказуемых сбоев, что часто имеет место в подводных условиях, вся система формирования может быть выведена из строя.

Чтобы преодолеть эту проблему и повысить надежность подхода, основанного на следовании за лидером, предлагается метод, основанный на виртуальном лидере, в котором для руководства группой не используются физические средства, и, следовательно, вышеупомянутая проблема может

быть соответствующим образом решена. Типичную структуру формирования, основанную на виртуальном лидере, можно наблюдать на рисунке 2.

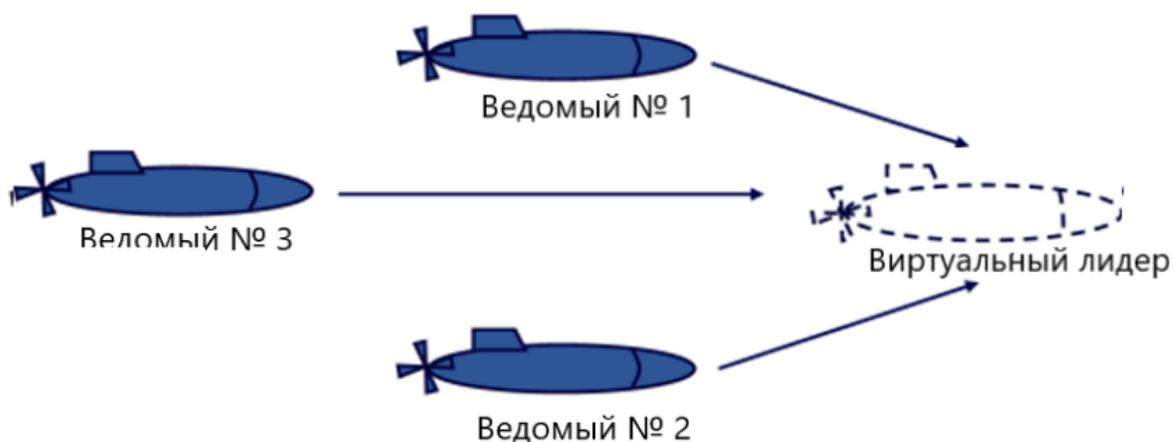


Рисунок 2 – Подход к управлению «виртуальный лидер -ведомый»

Другим важным соображением, касающимся такого типа структуры, является то, что всегда предполагается, что каждому транспортному средству в группе разрешено получать информацию о траектории виртуальных лидеров, что является сильным предположением и может не выполняться во многих реальных приложениях [5,19].

Подход «виртуальная структура»

Подобно подходу виртуального лидера, координация виртуальной структуры является еще одним распространенным методом, используемым для координации мультиагентного формирования для решения проблемы совместного управления несколькими мобильными роботами. В этом методе определяется набор виртуальных точек, соответствующих каждому транспортному средству, который определяется желаемой конфигурацией формирования, а также траекторией, подлежащей отслеживанию. Поскольку каждому транспортному средству назначается своя собственная контрольная точка, задача отслеживания формирования затем преобразуется в управление отслеживанием, цель которого состоит в том, чтобы управлять транспортными средствами таким образом, чтобы свести к минимуму ошибки между их

фактическим положением и желаемыми. Типичная реализация такого подхода проиллюстрирована на рисунке 3.

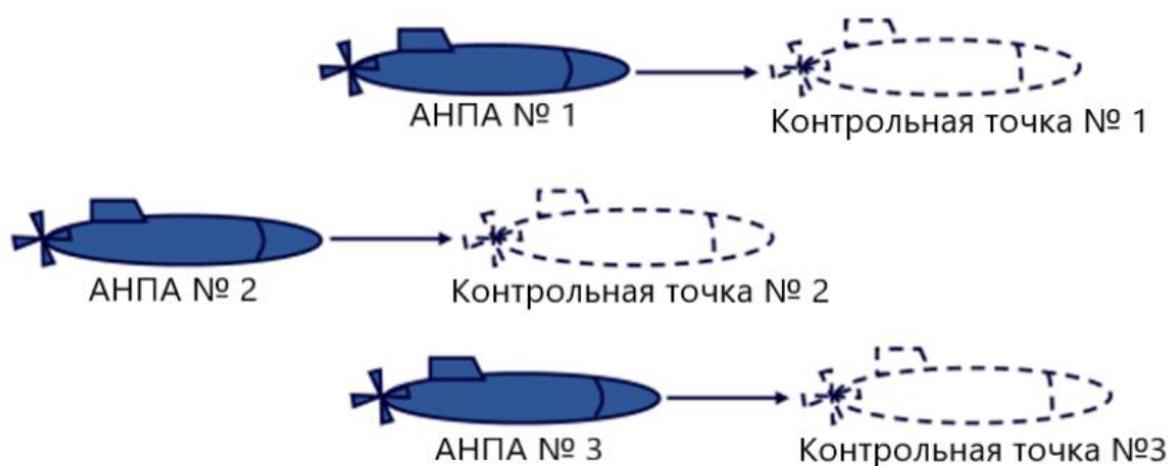


Рисунок 3 – Подход к управлению «виртуальная структура»

В связи с тем, что такой метод также прямолинеен и прост в анализе и реализации, на сегодняшний день было получено много результатов, основанных на этом методе для достижения требований к контролю пласта. Основные недостатки подхода «виртуальная структура» могут заключаться в нескольких аспектах:

Как и подход к виртуальному лидеру, этот метод тесно связан с желаемыми эталонными траекториями, что представляется нереалистичным во многих практических сценариях;

Нелегко расширить формирование АНПА, поскольку заданные виртуальные контрольные точки разрабатываются заранее на основе предписанной схемы формирования;

Из-за отсутствия обмена информацией между соседними транспортными средствами в системе формирования не происходит взаимодействия, что ухудшает эффективность координации [5,6].

Подход к управлению, основанный на поведении.

В отличие от двух вышеприведенных методов, как показано на рисунке 4, в системах формирования, синтезированных с использованием подхода координации, основанного на поведении, существует явная взаимная связь.

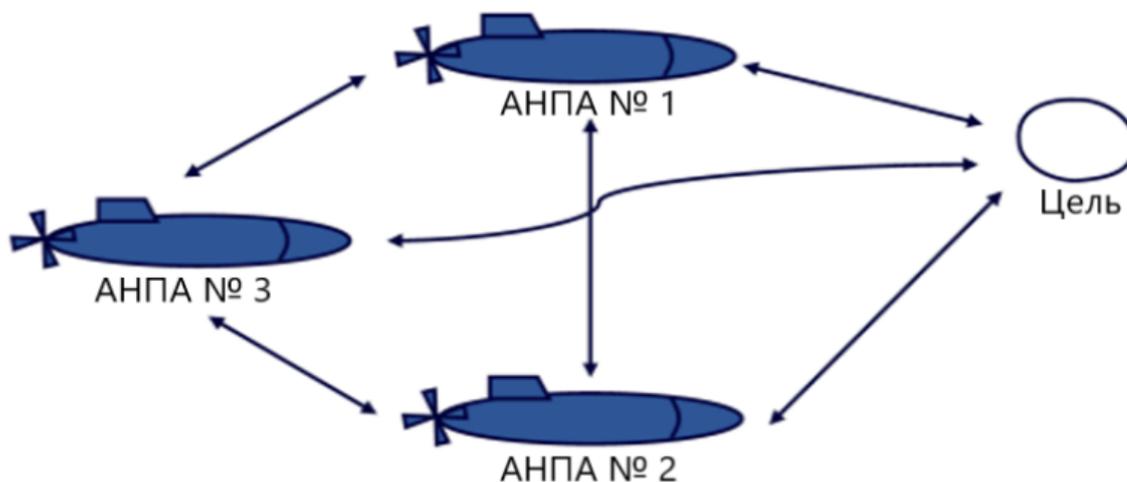


Рисунок 4 – Подход к управлению основанный на поведении

Вместо прямого предписания априорных эталонных траекторий, при подходе, основанном на поведении, каждое транспортное средство в группе принимает свои собственные решения на основе локальной информации (например, своих собственных состояний, окружения и состояний соседей) и заранее определенных целей [19]. Задачи обычно включают в себя достижение цели, избегание столкновения с препятствиями, поддержание дистанции, и т.д. В частности, общие управляющие воздействия транспортных средств затем формируются на основе взвешенной комбинации достижения этих различных целей. Хотя, казалось бы, что схема, основанная на поведении, способна достигать множества целей и просто зависит от ограниченной локальной информации для расчета управляющих воздействий, трудно проанализировать стабильность свойства общей системы формирования, основанной на таком методе, когда задействовано больше транспортных средств и моделей поведения. Это значительно ограничивает его практическое применение.

Подход искусственного потенциального поля.

Подход к искусственному потенциальному полю (ИПП) был изобретен для того, чтобы разработать алгоритм генерации маршрута без препятствий для планирования траектории движения манипулятора и мобильного робота. Основная особенность метода заключается в том, что ряд искусственных потенциальных функций определяется намеренно с целью достижения цели и в то же время избегания препятствий. Аналогично потенциальной энергии в физике, определенные функции ИПП могут также генерировать соответствующие потенциальные силы. Как правило, задействованы два типа функций ИПП: одна направлена на создание потенциальных сил притяжения, чтобы приблизить транспортные средства к целям, а другая пытается создать потенциальные силы отталкивания, чтобы заставить транспортные средства держаться подальше от препятствий, что показано на рисунке 5.

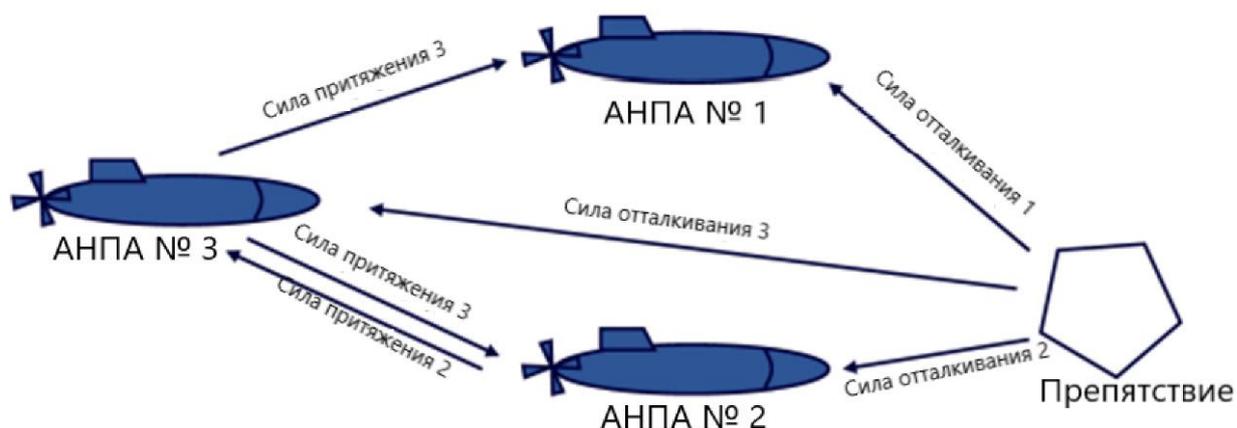


Рисунок 5 – Подход искусственного потенциального поля

Как следствие, при воздействии как сил притяжения, так и сил отталкивания предписанная цель может быть достигнута. Вдохновленный такой формулировкой, имеющей очевидное физическое значение, подход ИПП также внедряется в различные мультиагентные системы, помогающие организовать сотрудничество и координацию [4,5,19].

Подобно подходу, основанному на поведении, подход ИПП относительно прост в синтезе распределенных контроллеров, которые

достигают множества целей, зависящих только от локальной информации. Однако одним из основных недостатков является то, что он может попасть в точки, в которых результирующая суммарная сила, приложенная к транспортным средствам, равна нулю, что также известно как проблема "локальных минимумов". Следовательно, анализ стабильности мультиагентных систем на основе ИПП - это также непросто по сравнению со структурой лидер-последователь и подходами к виртуальной структуре, когда масштаб группы становится больше.

Другие подходы.

Согласно всестороннему обзору литературы, существуют некоторые другие широко используемые подходы к достижению многоагентного сотрудничества и координации, в то время как такого рода схемы можно, в некотором смысле, рассматривать как варианты уже представленных. Например, так называемый метод опорной точки формирования на самом деле является разновидностью метода виртуального лидера, в котором опорная точка определяется и параметризуется с желаемым профилем скорости, а затем целью управления транспортными средствами в группе является просто поддержание определенной дистанции и пеленг относительно контрольной точки. Как и при обычном методе виртуального лидера, здесь не происходит явных взаимодействий между соседними транспортными средствами.

В области многоагентной координации существует фундаментальная проблема, называемая проблемой консенсуса, которая характеризует, как может возникнуть межагентское сотрудничество путем простого использования местной информации (т.е. взаимодействия с соседями). Конкретно говоря, возможно, что состояние всей мультиагентной системы может быть в конечном счете согласовано, то есть состояние каждого агента сходится к одной и той же точке равновесия в соответствии с надлежащим локальным законом управления, который разрабатывается только на основе соседней информации. Более того, такая проблема может быть хорошо сформулирована и решена с помощью теории графов, включая основные

вопросы, такие как существование решений, свойства стабильности и робастности многоагентных систем.

Затем такая проблема распространяется на проектирование системы управления формированием, где вводится виртуальный лидер, который направляет группу транспортных средств для совместного движения по опорной траектории, а тем временем группа формируется путем обмена информацией между соседями. Типичная коммуникационная топология управления формированием на основе консенсуса проиллюстрирована на рисунке 6.

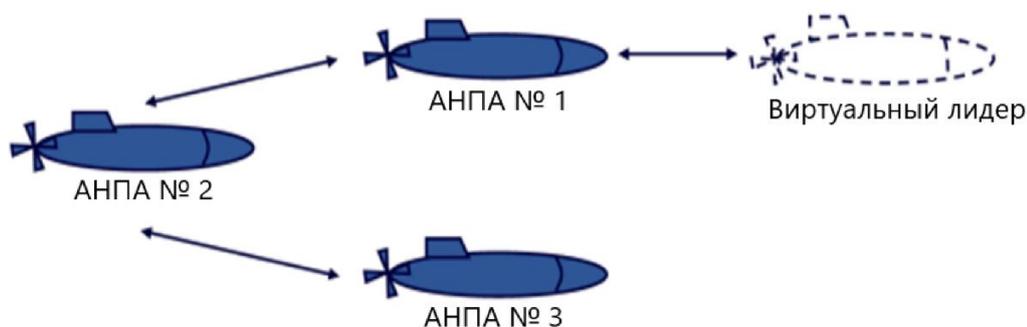


Рисунок 6 – Подход основанный на консенсусе

Следует отметить, что в отличие от традиционной структуры виртуального лидера, при подходе, основанном на консенсусе, существует локальный поток информации, и, что более важно, необязательно, чтобы все члены группы имели доступ к информации о базовой траектории [19].

Вывод по главе 1:

В данной главе были изучены основные подходы к управлению группами АНПА, а также классификация необитаемых подводных аппаратов и задачи, на которые рассчитаны группы АНПА. В качестве подхода к управлению группами АНПА был выбран подход «лидер – ведомый» по причине того, что данный подход является надежным, время на реализацию этого подхода минимально, по сравнению с остальными подходами.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТНОЙ ЧАСТИ

Для получения математической модели подводного аппарата, необходимо решить задачи моделирования в двух составляющих, кинематической, которая связывает только геометрические аспекты движения аппарата, и динамическая, которая представляет собой анализ сил, вызывающих движение.

Для определения положения аппарата необходимо использовать систему координат, которые не зависят друг от друга. АНПА имеет шесть показателей системы, которые могут изменяться независимо. Данные обозначения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Используемые обозначения

	Название	Обозначение на ССК	Скорости	Обозначение на АСК
1	Движение по оси X	X	u	x
2	Движение по оси Y	Y	v	y
3	Движение по оси Z	Z	w	z
4	Крен	K	p	φ
5	Тангаж (дифферент)	V	q	θ
6	Курс	N	r	ψ

Приведенные в таблице значения под номерами 1-3 и их производные по времени используются для определения положения и поступательного движения вдоль осей x, y и z, значения под номерами 4-6 и их производные по времени предназначены для описания ориентации и вращательного движения вокруг своих осей [4].

В общем виде движение подводного аппарата описывается векторами:

$$\eta = [\eta_1^T \ \eta_2^T]^T \quad \eta_1 = [x \ y \ z]^T \quad \eta_2 = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$$

$$v = [v_1^T \ v_2^T]^T \quad v_1 = [u \ v \ w]^T \quad v_2 = [p \ q \ r]^T$$

$$\tau = [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T \quad \tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad \tau_2 = [K \ M \ N]^T$$

Где η описывает положение и ориентацию подводного аппарата относительно АСК, v поступательного движения и вращения относительно ССК и τ суммарные силы и моменты, действующие на подводный аппарат относительно неподвижной относительно корпуса системы отсчета [3].

Задается траектория транспортного средства относительно АСК.

$$\eta_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad (1)$$

где $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ – вектор положения и ориентации (φ – крен, θ – дифферент, ψ – курс) в абсолютной системе координат (АСК), $v = [u, v, w, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения подводного аппарата на оси связанной системы координат (ССК), $J(\eta)$ – матрица перехода из ССК в АСК, которая имеет вид

$$J(\eta) = [J_1(\eta) \ 0 \ 0 \ J_2(\eta)] \quad (2)$$

где $J_1(\eta)$ - матрица преобразования следующего вида:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\theta\sin\psi\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

ССК угловой вектор v_2 и вектор скорости Эйлера η_2 связаны через следующее уравнения:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (4)$$

и

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\psi \tan\theta & \cos\psi \tan\theta \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi / \cos\theta & \cos\psi / \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $J_1(\eta_2)$ используется для преобразования линейных скоростей в АСК (u, v, w) и линейные скорости (x, y, z) в ССК, а $J_2(\eta_2)$ используется для преобразования угловых скоростей (p, q, r) в ССК и угловых скоростей (ϕ, θ, ψ) в АСК.

Полное преобразование между системой координат, связанной с корпусом аппарата, и абсолютной системой координат, представляет собой уравнение кинематики АНПА, которое представляет собой следующее уравнение:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

где $\dot{\eta}_1 = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$ и $\dot{\eta}_2 = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$ – это скорости АНПА в неподвижной системе отсчета Земли. Соответствующие фиксированные телом скорости АНПА равны $v_1 = [u, v, w]$ и $v_2 = [p, q, r]$.

2.2 Динамическая составляющая математической модели

Динамическая составляющая делится на поступательное движение и вращательное движение подводного аппарата. Уравнение поступательного движения приведено ниже:

$$m \left(\dot{v}_0 + \omega * v_0 + \omega * r_g + \omega(\omega * r_g) \right) = f_0 \quad (7)$$

и вращательное уравнение движения представляет собой выражение:

$$I_0 \dot{\omega} + \omega * (I_0 \omega) + m r_g * (\dot{v}_0 + \omega * v_0) = m_0 \quad (8)$$

В представленном уравнении за m принимают массу аппарата, I_0 принимают за момент инерции.

Уравнения (7) и (8) обычно записываются в компонентной форме в соответствии с одним и тем же обозначением и имеет следующий вид.

Внешняя сила представляет собой следующее уравнение:

$$f_0 = \tau_1 = [X \ Y \ Z]^T \quad (9)$$

Для момента внешних сил используют:

$$m_0 = \tau_2 = [K \ M \ N]^T \quad (10)$$

Линейная скорость задается следующим уравнением:

$$v_0 = v_1 = [u \ v \ w]^T \quad (11)$$

Угловая скорость имеет вид:

$$\omega = v_2 = [p \ q \ r]^T \quad (12)$$

Центр тяжести представляют в виде:

$$r_g = [x_g y_g z_g]^T \quad (13)$$

Применив данные обозначения к приведенным выше уравнениям, выводим, что:

- Импульсное движение

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = X \quad (14)$$

- Колебательное движение

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_g(p^2 + r^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(pq + \dot{r})] = Y \quad (15)$$

- Движение подъема

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_g(q^2 + p^2) + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(qr + \dot{p})] = Z \quad (16)$$

- Движение крена

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wq + ur)] = K \quad (17)$$

- Движение по тангажу

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = M \quad (18)$$

- Движение по курсу

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = N \quad (19)$$

Уравнения (14), (15) и (16) представляют собой поступательные движения, а уравнения (17), (18) и (19) - вращательные.

Центр плавучести принимается таким же, как момент инерции I_0 , таким образом он имеет только диагональные элементы. Недиагональными элементами можно пренебречь, так что приведенные уравнения необходимо упростить, исключив диагональные элементы момента инерции [7].

Если ППО не подвергнут специальной балластировке, значением y_g можно пренебречь и уравнения могут быть дополнительно упрощены путем исключения члена y_g .

Параметры X, Y, Z, K, M, N — это внешние силы и моменты, которые включают гидростатическую силу, подъемную силу, силу сопротивления, а также влияние плоскости кормы и руля направления, что может быть выражено следующей формулой [5].

$$\sum F_{\text{вн}} = F_{\text{гидрст.}} + F_{\text{подъем.}} + F_{\text{сопр.}} + F_{\text{влиян.}} \quad (20)$$

2.3 Описание регулировки степени тангажа и глубины погружения

Цель состоит в том, чтобы поддерживать АНПА на определенной высоте над уровнем морского дна. Это достигается за счет изменения угла наклона подводного аппарата. Для достижения данной цели можно использовать двухконтурный ПИД-контроллер. Контроллер внутреннего контура, ПИД-контроллер управляет тангажом, а контроллер внешнего контура, управляет глубиной транспортного средства.

Необходимо провести линеаризацию кинематической и динамической составляющих.

В уравнениях кинематической и динамической составляющих производится упрощение путем отсева значений иных, чем скорость подъем, скорость дрейфа и скорость тангажа, в системе связанных координат, а относительно АСК иных значений, чем его положения, за что отвечает ось x , глубина, что находит отражение на оси z и угол тангажа θ . Далее полученная упрощенная модель линеаризуется относительно рабочей точки.

Используя уравнения (1) и (4) и опуская нежелательные члены, получается кинематика АНПА для управления тангажом и глубиной следующего вида:

$$\dot{x} = \cos(\theta)u + \sin(\theta)w \quad (21)$$

$$\dot{z} = -\sin(\theta)u + \cos(\theta)w \quad (22)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (23)$$

Линеаризуем уравнения (21), (22) и (23), полагая, что вокруг стационарной точки существуют незначительные возмущения.

Пусть u_1 установившаяся поступательная скорость, вокруг которой линеаризуется u . Скорость подъема и тангажа линеаризована примерно до нуля. Используя разложение тригонометрических членов по Маклорину и пренебрегая членами более высокого порядка, линеаризованные уравнения (21), (22) и (22) имеют вид:

$$\dot{x} = u + \theta w \quad (24)$$

$$\dot{z} = -u_1\theta + w \quad (25)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (26)$$

Подобным способом поступают с уравнениями динамической составляющей (14), (15), (18), все несвязанные члены приравняются нулю, а уравнениями движения подводного аппарата вне плоскости пренебрегают. Следовательно уравнения динамической составляющей имеют следующий вид:

$$m(\dot{u} + wq - x_g q^2 + z_g \dot{q}) = X \quad (27)$$

$$m(\dot{w} - uq - z_g q^2 - x_g \dot{q}) = Z \quad (28)$$

$$I_y \dot{q} + m[z_g(\dot{u} + wq) - x_g(\dot{w} - uq)] = M \quad (29)$$

Теперь, используя линеаризацию, уравнения (27), (28) и (29) сводятся к следующему виду:

$$m(\dot{u} + z_g \dot{q}) = X \quad (30)$$

$$m(\dot{w} - x_g \dot{q} - u_1 q) = Z \quad (31)$$

$$I_y \dot{q} + m[z_g \dot{u} - x_g(\dot{w} - uq)] = M \quad (32)$$

Линеаризованные уравнения (30), (31) и (32) принято для удобства преобразовывать в форму, представленную ниже:

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - (mx_g + Z_{\dot{q}})\dot{q} - Z_w w - (mu_1 + Z_q)q = Z_{fs} f_s \quad (33)$$

$$-(mx_g + M_{\dot{w}})\dot{w} + (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} - M_w w + (mx_g u_1 - M_q)q - M_{\theta}\theta = M_{fs} f_s \quad (34)$$

Где m_w, m_q, z_w, z_q это добавленная масса, z_{fs} это подъемная сила, и f_s принимают за угол наклона кормы.

Скоростью подъема можно пренебречь по причине того, что она не оказывает сильного влияния, по сравнению с другими членами уравнения, следовательно, уравнения кинематической и динамической составляющей могут быть записаны матричной форме, которая имеет вид:

$$\begin{bmatrix} I_y - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_q & 0 & M_{\theta} \\ 0 & 0 & u_1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{fs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Передаточная функция

Из приведенного выше матричного представления (35) передаточную функцию для внутреннего контура шага можно определить следующим образом:

$$G_{\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{f_s(s)} = \frac{\frac{M_{fs}}{I_y - M_{\dot{q}}}}{s^2 - \frac{M_q}{I_y - M_{\dot{q}}}s - \frac{M_{\theta}}{I_y - M_{\dot{q}}}} \quad (36)$$

Управление тангажом осуществляется ПИД-контроллером с общей передаточной функцией, заданной следующей формулой:

$$\frac{f_s(s)}{e_{\theta}(s)} = -K_p(T_d s + 1) \quad (37)$$

Где e_θ (ошибка в высоте тона) равна $\theta_{\text{жш}}$ (желаемый шаг) минус θ (фактический шаг). K_p является пропорциональным коэффициентом усиления, а T_d – производная постоянная времени.

Для внешнего контура глубины его передаточная функция связывает $\theta_{\text{жш}}$ с z . Поскольку внутренний контур тангажа быстрее внешнего контура глубины, можно представить, что $\theta_{\text{жш}}$ почти равно θ , таким образом передаточная функция приобретает вид:

$$G_z(s) \frac{z(s)}{\theta(s)} = \frac{-u_i}{s} \quad (38)$$

Для управления глубиной используется регулятор, коэффициент усиления которого равен:

$$\Delta = \frac{\theta(s)}{e_z(s)} \quad (39)$$

Где e_z - погрешность в глубине транспортного средства .

2.4 Описание модели обхода препятствий

Стандартное перемещение АНПА «REMUS».

В данном разделе рассматривается перемещение АНПА в двумерной среде. Эта среда состоит из вертикальной плоскости, которая позволяет отслеживать глубину АНПА и его продвижение вперед в воде. Аппарат движется с постоянной скоростью 1,5 м/с (≈ 3 узла), что является нормальной скоростью поиска для транспортного средства REMUS. Во время обычной миссии контроллер скользящего режима будет постоянно поддерживать заданную высоту. Этот контроллер позволит осуществлять постепенные изменения в глубине воды. Контроль высоты осуществляется с помощью высотомера REMUS, а типичная высота поиска с помощью доплеровского

навигатора RDI составляет 3 м над уровнем океана. По мере того, как дно океана поднимается или опускается, обратная связь от высотомера создает сигнал ошибки с заданной высотой. Эта ошибка высоты будет исправлена приведением в действие рулей высоты REMUS. При постепенном изменении глубины океанского дна коррекция происходит почти мгновенно, и плоскости руля высоты возвращаются к нулевым градусам предполагая, что никакие другие факторы не задействованы. Однако у REMUS есть и другие факторы, влияющие на его управление глубиной погружения. «REMUS» не всегда является нейтрально плавучим транспортным средством. Конечно, это будет зависеть от полезной нагрузки, и для целей данного тезиса предполагается, что транспортное средство обладает положительной плавучестью. Эта положительная плавучесть обеспечивает постоянную направленную вверх силу, которой должны противостоять плоскости руля высоты транспортного средства, поэтому плоскости руля высоты не возвращаются в устойчивое состояние нулевых градусов на ровном океанском дне.

Гидролокатор переднего Обзора

Хотя глубину погружения можно поддерживать при незначительных изменениях глубины океанского дна, эффектах плавучести и океанском течении, этот контроллер не подходит для резких изменений глубины океанского дна, обычно вызываемых рифами, дамбами или другими препятствиями. Даже при некотором предупреждении о большом препятствии впереди, REMUS требует значительного внимания, чтобы продвигаться с разумной скоростью подъема и углом наклона. Чтобы устранить этот недостаток, требуется гидролокатор прямого обзора. Типичный гидролокатор прямого обзора с частотой сигналов 400 кГц может иметь дальность действия более 100 м и угол обзора по вертикали 24° , как показано ниже на рисунке 8.

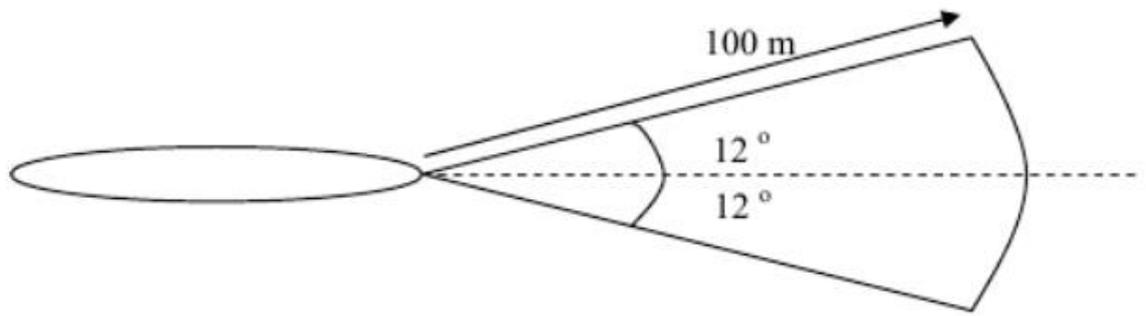


Рисунок 8 – Модель гидролокатора прямого обзора

С гидролокатором переднего обзора, установленным на транспортном средстве REMUS, коралловые рифы и другие такие препятствия теперь можно обнаружить на расстоянии, достаточном для постепенного подъема над объектом. Небольшие гидролокаторы переднего обзора находятся на относительно недавней стадии разработки.

В двумерном пространстве REMUS обнаружит препятствие с помощью гидролокатора переднего обзора и получит ряд пеленгов и дальностей до этого препятствия. После успешного преодоления препятствия компьютерная система должна быть способна определять высоту объекта и расстояние до объекта. Цель алгоритма обхода препятствий состоит в том, чтобы позволить REMUS обнаружить препятствие достаточно рано, чтобы обеспечить постепенную скорость подъема и небольшой угол наклона. Метод энергосбережения позволит REMUS оставаться на станции в течение более длительного периода времени [14].

После определения высоты и радиуса действия препятствия алгоритм обхода препятствий может затем построить наклон увеличивающейся высоты, который позволит «REMUS» предстоит преодолеть препятствие на высоте 3 м. Пример пути показан ниже на рисунке 9.

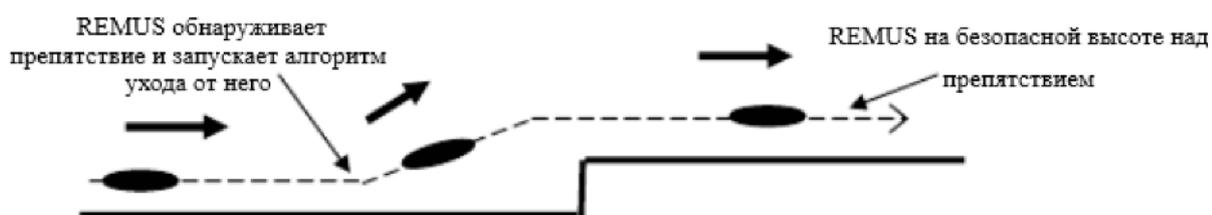


Рисунок 9 – Траектория прохода REMUS над препятствием

Алгоритм обхода препятствий работает с использованием принципов пеленгов опасности, используемых в навигации. Опасный пеленг сообщает моряку о наличии опасности, если судно находится с той или иной стороны от опасного пеленга. Подобно пеленгу опасности, зона создается в пределах траектории поиска гидролокатором переднего обзора. Любой объект, обнаруженный в пределах этой зоны, является считается препятствием, которого следует избегать. Эта зона должна учитывать тот факт, что гидролокатор переднего обзора будет получать отраженные от дна океана сигналы. В этой зоне используется не весь спектр типичных гидролокаторов переднего обзора. Это связано с тем, что REMUS является высокоманевренным транспортным средством, и ему не потребуется подниматься на 100 м над препятствиями, встречающимися на его пути. Любой объект, обнаруженный в пределах этой зоны, должен активировать алгоритм управления уклонением, вызывающий повышение REMUS [15]. Как описывалось ранее, REMUS оснащен регулятором высоты, который использует обратную связь от высотомера для поддержания высоты в 3 метра над океанским дном. При обнаружении препятствия в зоне действия гидролокатора включается алгоритм обхода препятствия создает новую команду высоты, которая линейно увеличивается по мере приближения REMUS к препятствию. Скорость увеличения или наклона команды высоты зависит исключительно от высоты и дальности действия препятствия. По мере

того, как REMUS поднимается, чтобы обойти препятствие, высота наклона также увеличивается.

Вывод по главе 2:

В данной главе для разработки модели управления группой подводных подвижных объектов были изучены теоретические основы моделирования управления группы АНПА. Были изучены: кинематическая и динамическая составляющие математической модели управления, система регулировки степени тангажа и глубины погружения, а также модель обхода препятствий. В качестве принципов для разработки модели управления будут использованы вышеприведенные в этом разделе характеристики.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ПОДВОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В качестве подхода для реализации модели управления был выбран подход «лидер – ведомый» исходя из следующих критериев: данный подход является самым надежным, время на реализацию этого подхода минимально, по сравнению с остальными подходами. В ходе проведения работы рассматривается вопрос управления группой типа «лидер – ведомый» состоящей из нескольких АНПА. Рассматриваются группы АНПА в пространственных перемещениях. Задача работы состоит в том, чтобы направить аппарат-лидер по заданной траектории и заставить ведомые аппараты поддерживать в трехмерном пространстве заданный строй относительно положения лидера.

Преимущества исследования группой аппаратов.

Существует много областей, где применение группы подводных подвижных объектов, целесообразно и удобно по причине того, что поставленные задачи, слишком сложны и трудоемки для одного аппарата. Группы АНПА по сравнению с одиночными аппаратами являются более надежными, причиной этого служит то, что использование группы обеспечивает определенную степень резервирования, т.е. один аппарат, который вышел из строя в составе формирования, может быть заменен на другой, а также значительно сокращает время на выполнения задания. Задачами, реализуемыми группами АНПА является: отбор проб из морей и океанов, картографирование, составление карт рельефа дна, сбор океанографических данных.

Выгода от использования групп АНПА заключается в том, что вместо того, чтобы использовать один дорогостоящий АНПА выгодно использовать несколько сравнительно недорогих и простых АНПА для совместного использования их, что неизбежно приведет к увеличению зоны исследования.

Одной из основных проблем в использовании группы АНПА является разработка модели управления группой, необходимо спроектировать структуру, позволяющую сохранять заданное положение участников группы при выполнении различных задач и миссий.

В науке выделяют три основных подхода к управлению группами автономных аппаратов, среди них принято выделять поведенческий подход, подход виртуальной структуры и подход «лидер-ведомый».

Поскольку поведенческий подход использует средневзвешенное значение желаемого поведения каждого транспортного средства, для получения управляющих входных данных для конкретного транспортного средства, то этот подход допускает децентрализованную реализацию. Математический анализ и формализация данного подхода чрезвычайно сложны, в связи с этим сложно гарантировать схожесть группы аппаратов с заданной конфигурацией.

Виртуальная структура рассматривает группу аппаратов как единую жесткую структуру, таким образом поведение группы легко спрогнозировать, а управление формацией аппаратов является простым, поскольку в данной подходе заданная траектория относится ко всем аппаратам, а не к каждому конкретно. Однако, у данного подхода есть свои недостатки, требуется большая полоса пропускания, способная обеспечить устойчивость системы, для связи между аппаратами, что сложно реализовать в подводном пространстве.

В случае, когда используется подход «лидер – ведомый», выбирается подводный аппарат, которому будет известна заранее заданный маршрут движения, его задачей будет перемещение по маршруту, данный аппарат именуется лидером. Задачей же ведомого аппарата является следование за лидером с сохранением установленной дистанции, конечная точка, а также маршрут передвижения ведомым не известен.

Подход «лидер-ведомый» является рациональным по причине того, что единственное событие, которое происходит в связи между аппаратами – это передача всей необходимой информации от лидера каждому из ведомых.

3.1 Создание модели устройства регулировки тангажа и глубины погружения

Цель работы состоит в том, чтобы поддерживать подводный аппарат на определенной высоте над морским дном. Это достигается за счет изменения угла наклона АНПА. Для этой цели используется двухконтурный контроллер. ПИД-регулятор, регулятор внутреннего контура, управляет углом наклона, а П-регулятор, регулятор внешнего контура, управляет глубиной.

Подставляя данные, выведенные для REMUS АНПА [20] в функция для внутреннего контура шага получаем:

$$G_{\theta}(s) = \frac{-3.18}{s^2 + 1.09s + 0.52} \quad (40)$$

Полюса разомкнутого контура равняются

$$s_{1,2} = -0.55 \pm j0.47$$

Выбор 5%-ного превышения или коэффициента демпфирования, $\zeta=0.69$ и $T_d = 0.210$, из графика корневого локуса получаем значение собственной частоты, $\omega_n = 5.77$ рад/с и усиление $K_p = 10,3$ и $\Delta = -0,772$, что видно на рисунке 10.

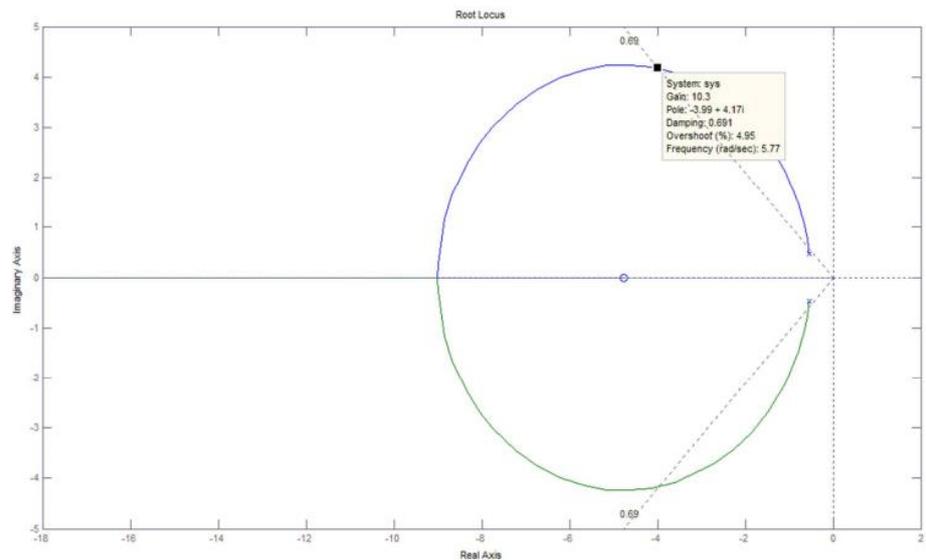


Рисунок 10 – Анализ корневого локуса

Существует множество систематических методов для получения необходимого усиления контроллера — в данной работе установлена производная постоянная времени T_d и используется график корневого локуса, чтобы найти необходимое усиление K_p . Результирующие значения контроллера также представлены в условных обозначениях на рисунке 10.

Ступенчатый отклик замкнутого контура передаточной функции, $h(t)$, показан на рисунке 11.

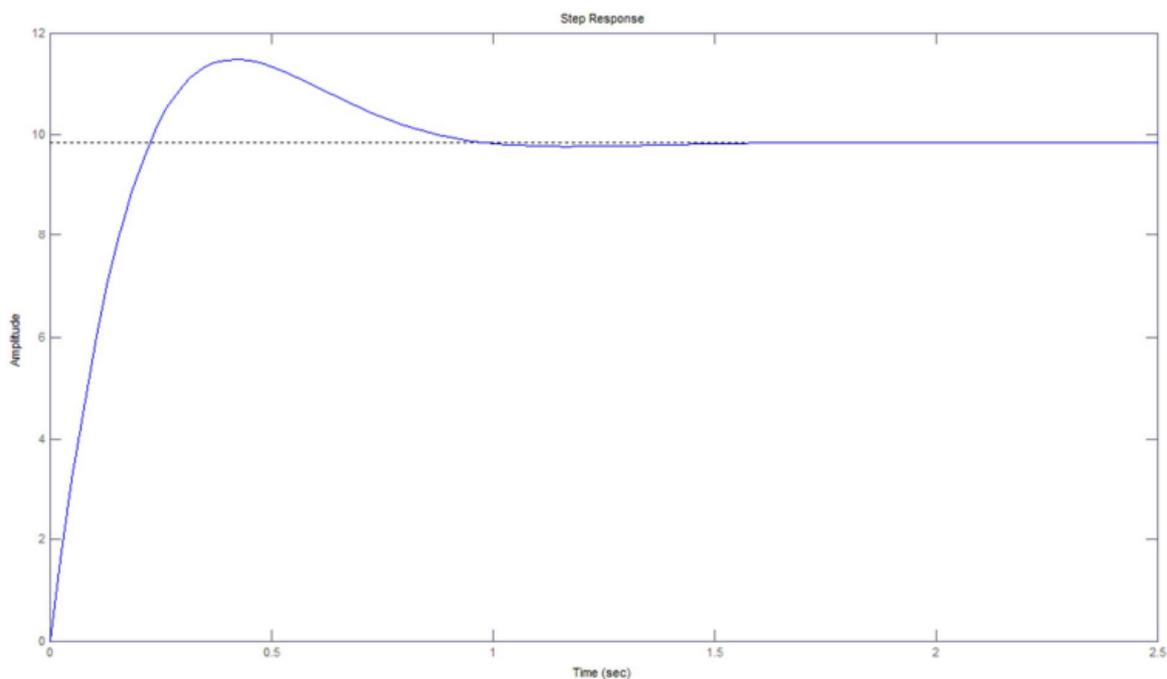


Рисунок 11 – Ступенчатый отклик замкнутого контура

Результат моделирования:

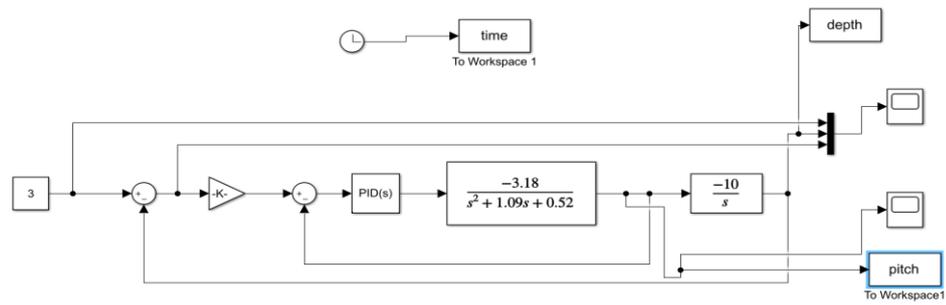


Рисунок 12 – Модель Simulink для управления тангажом и глубиной погружения

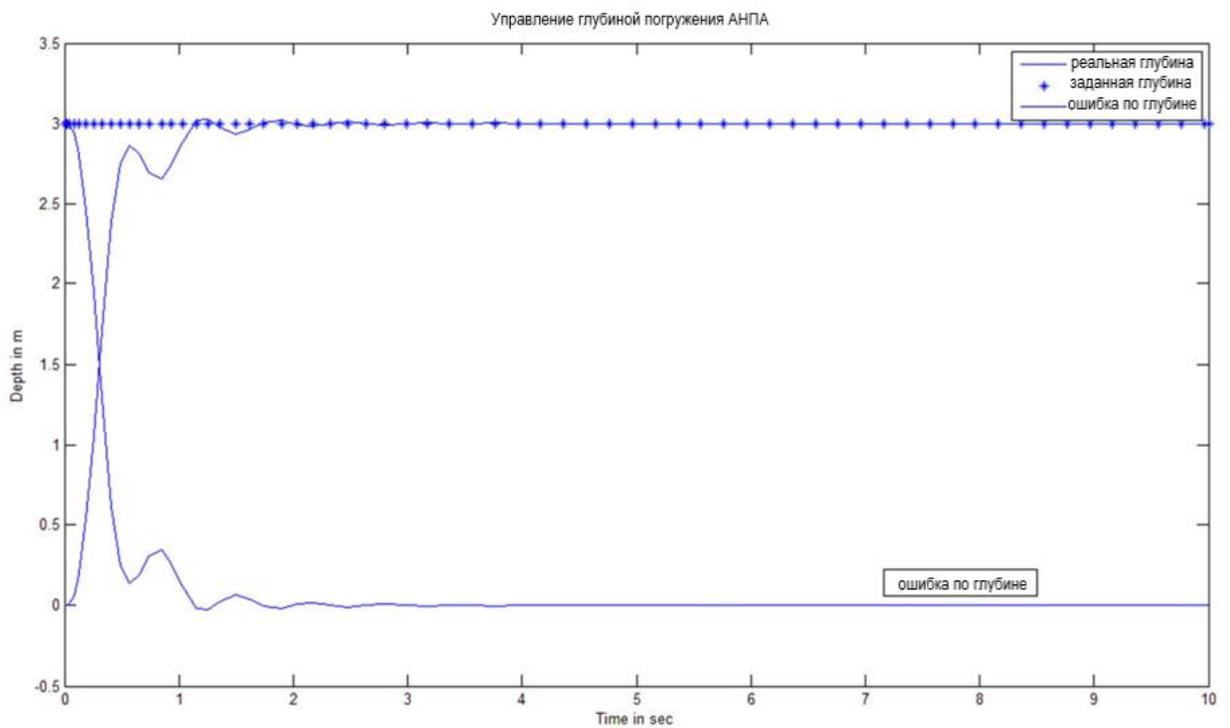


Рисунок 13 – Контроль глубины погружения АНПА

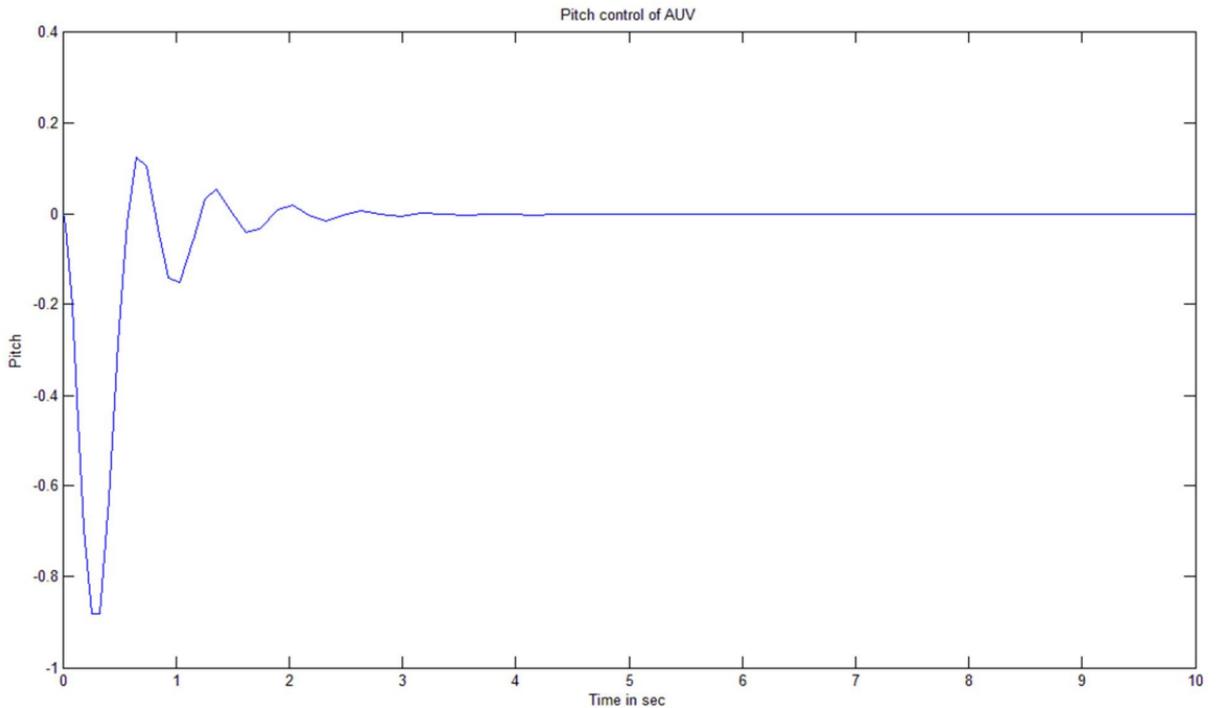


Рисунок 14 – Управление тангажом АНПА

Из осциллограмм видно, что линеаризованная модель глубины и тангажа АНПА дает удовлетворительные результаты, поскольку фактическая глубина устанавливается на заданную глубину, а также тангаж транспортного средства устанавливается на нулевое значение по мере необходимости.

Управление с обратной связью по состоянию

Используем контроллер с обратной связью по состоянию с управляющим сигналом $u = -Kx$. где K – матрица усиления, а x - матрица состояния.

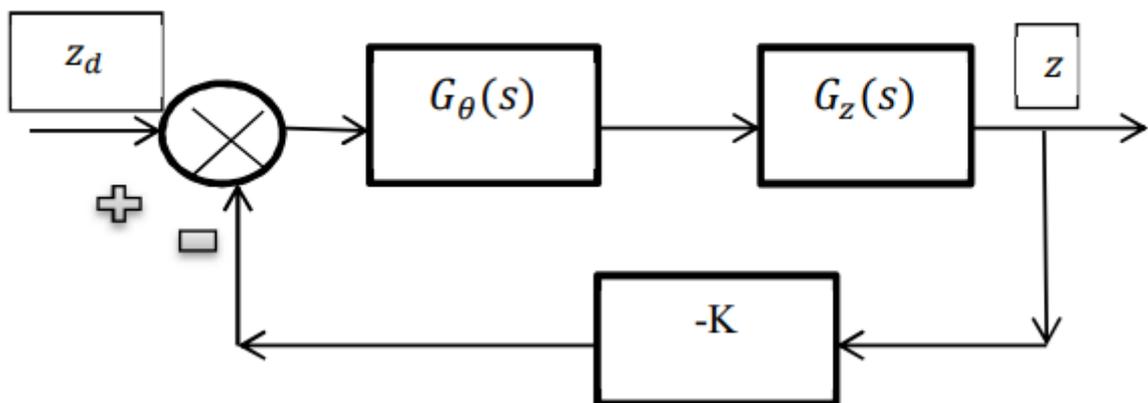


Рисунок 15 – Модель управления с обратной связью по состоянию

Используя уравнения:

$$G_{\theta}(s) = \frac{-3.18}{s^2 + 1.09s + 0.52}$$

и

$$G_z(s) = -10/s \quad (41)$$

Получим уравнение следующего вида:

$$G_{\theta}(s) * G_z(s) = \frac{31.8}{s^3 + 1.09s^2 + 0.52s} \quad (42)$$

Следовательно, в коде программы Simulink это будет представлено в следующем подобном образом:

>> [A,B,C,D] = tf2ss([31.8],[1 1.09 .52 0]), что дает матрицы следующего вида:

$$A = \begin{bmatrix} -1.09 & -.52 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} C = [0 \quad 0 \quad 31.8] D = 0 \quad (43)$$

Вычислив матрицу управляемости $P_c = [B \quad AB \quad A^2B]$, получаем результат, что она ненулевая, что означает, что система является управляемой по состоянию.

Для коэффициента демпфирования $\zeta=0.69$ желаемые полюса равны $-0,338 \pm j 0,355, -10$, что видно из графика корневого локуса, представленного на рисунке 10, что дает желаемое характеристическое уравнение:

$$s^3 + 10.676s^2 + 7s + 2.4 = 0 \quad (44)$$

Поскольку матрицы A нет в канонической форме управляемости, мы используем преобразование $\bar{x} = P x$, которые преобразуют систему в каноническую форму, матрица P равна $[0, 0, 1; 0, 1, 0; 1, 0, 0]$ и системный коэффициент равны $(-1,09, -0,52, 0)$, что дает матрицу усиления $K = [11.766, 7.52, 2.4]$.

3.2 Управление группой подвижных подводных объектов по подходу «лидер-ведомый» на плоскости.

Критерии организации группового движения на плоскости.

В качестве критерия для организации движения группой подводных подвижных объектов был выбран круг, радиус которого составляет 8 метров. Дистанция между аппаратами должна составлять 2 метра, графическое изображение данного критерия представлено на рисунке 16.

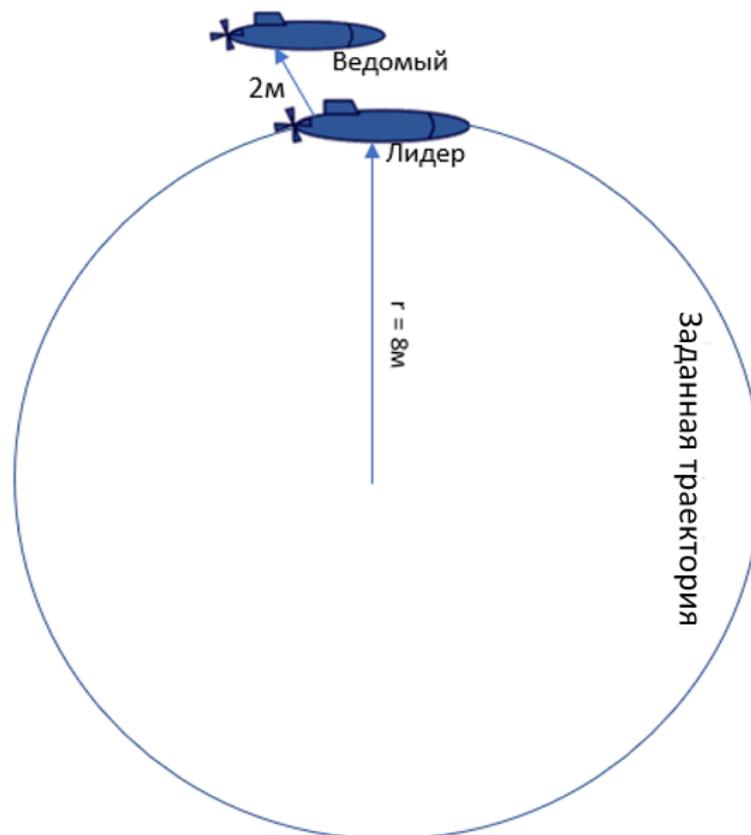


Рисунок 16 – Критерии организации группового движения на плоскости

При осуществлении управления группой, которая взаимодействует по подходу типа «лидер-ведомый» АНПА-лидер отслеживает заданную траекторию, а ведомый АНПА поддерживает заданное расстояние и угол наклона по отношению к лидеру. Когда все аппараты находятся на ожидаемых позициях, устанавливается заданный порядок.

Задача формирования типа «лидер-ведомый» в горизонтальной плоскости может быть задана следующим образом: учитывая положение ведущего транспортного средства, опорная траектория для ведомого задается таким образом, что его положение смещается на расстояние d и угол наклона относительно ведущего. Следовательно, опорная траектория ведомого генерируется по мере движения ведущего[11].

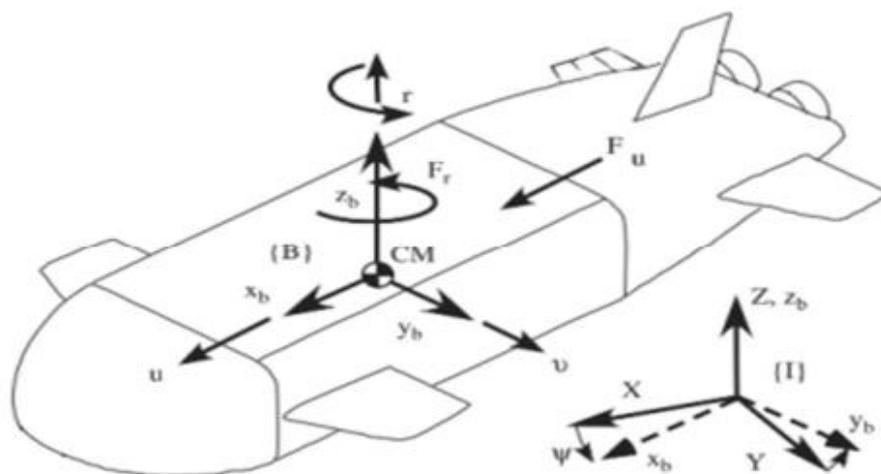


Рисунок 17 – Схема АНПА, показывающая оси и системы отсчета.

Кинематическая и динамическая составляющие математической модели АНПА. Для изучения передвижения в двумерном пространстве необходима АСК, которая представлена на рисунке 17 под индексом I и ССК, которая представлена под индексом B. Начало отсчёта для ССК совпадает с центром масс (ЦМ), обозначение рисунке CM

Уравнения кинематической составляющей движения АНПА в горизонтальной плоскости X-Y можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (45)$$

Положение подводного аппарата описывается составляющей ψ , которая измеряется в плоскости оси X.

Исходя из того, что: ЦМ совпадает с центром плавучести (ЦП), можно сделать вывод распределение массы равномерно, коэффициенты гидродинамического сопротивления второго и выше порядков пренебрежимо малы, а колебаниями крена, подъема и тангажа можно пренебречь, динамическую составляющую можно выразить следующими уравнениями:

$$\dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u|u| + \frac{1}{m_{11}} F_u \quad (46)$$

$$\dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v|v| + \frac{1}{m_{22}} F_v \quad (47)$$

$$\dot{r} = \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{N_r}{m_{33}} r - \frac{N_{r|r|}}{m_{33}} r|r| \quad (48)$$

Переменная F_u (46) подразумевает управляющее усилие при колебательном движении подводного подвижного объекта, а переменная F_v (47) обозначает управляющее усилие при колебательном движении подводного подвижного объекта. Уравнение (48) является неконтролируемым, а АНПА представляет собой недостаточно эффективную динамическую систему. Константа m_{11} представляет собой массу твердого тела, m_{22} – добавленную массу, а m_{33} – объединенное твердое тело и добавленный момент инерции вокруг оси z_b $X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, N_r, N_{r|r|}$ являются коэффициентами линейного и квадратичного сопротивления.

Опорная траектория и конструкция контроллера: опорную круговую инерциальную плоскую траекторию, необходимо задать следующим образом:

$$X_R(t) = 8 \sin(0.01t) \text{ m} \quad (49)$$

$$Y_R(t) = 8 \cos(0.01t) \text{ m} \quad (50)$$

Исходя из этого опорного пути, находим ошибку в положении, которая равняется разнице между фактическим и исходным положениями.

Затем эта ошибка передается контроллеру пропорциональной производной, который генерирует необходимые управляющие сигналы. Выходные данные контроллера затем передаются в систему (АНПА), которая уменьшает ошибку определения местоположения и, таким образом, АНПА отслеживает желаемую траекторию. Опорный путь для следящего АНПА - это окружность с той же частотой, но с другим радиусом.

Таблица 2

Числовые данные, используемые при моделировании

Параметр	Обозначение	Единица	Единица измерения
Масса	M	185	кг
Момент инерции	I_z	50	кгм ²
Добавленная масса	X_{ii}	-30	кг
Добавленная масса	Y_{vv}	-80	кг
Добавленная масса	N_{rr}	-30	кгм ²
Линейное сопротивление по X	X_{uu}	70	кг/с

Квадратичное сопротивление по оси X	$X_{u u }$	100	кг/м
Линейное сопротивление по оси Y	Y_v	100	кг/с
Квадратичное сопротивление по оси X	$Y_{v v }$	200	кг/м
Линейное сопротивление по курсу	N_r	50	кгм ² /с
Квадратичное сопротивление по курсу	$N_{r r }$	100	кгм ²

Кроме того, $m_{11} = m - X_{\dot{u}} = 215$ кг, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}} = 265$ кг, $m_{33} = m - N_{\dot{r}} = 215$ кгм² [15].

Результаты моделирования:

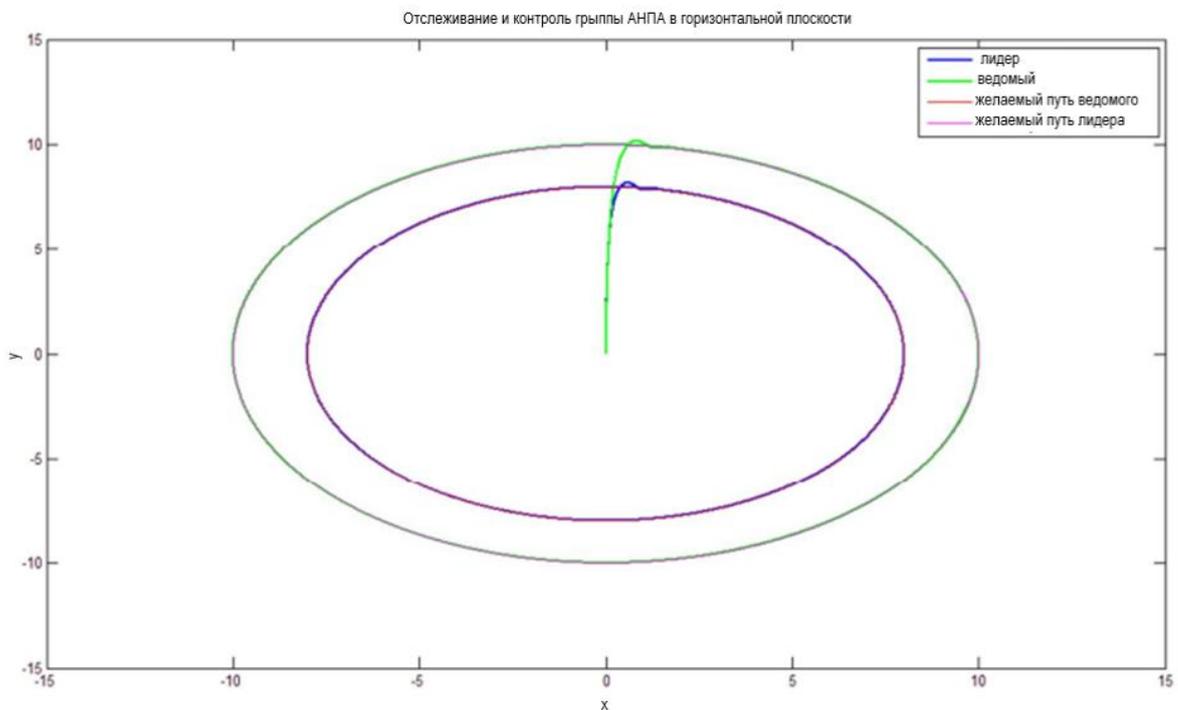


Рисунок 18 – Результат моделирования в программе Matlab

Ведущий АНПА отслеживает свой желаемый путь, который представляет собой круг радиусом 8 м, а также ведомый АНПА поддерживает постоянную дистанцию в 2 м от ведущего АНПА. Таким образом, используемый ПИД-контроллер работает удовлетворительно. Для расчетов использовался алгоритм, предложенный в источнике [21].

3.3 Управление группой подвижных подводных объектов по подходу «лидер-ведомый» в трехмерном пространстве

Критерии организации группового движения представляют собой следующий вид, объекты должны передвигаться эшелонировано, по заданной прямой, расстояние между аппаратами по оси Z должно составлять 10 метров, графическое изображение предложенных критериев представлено на рисунке 19.



Рисунок 19 – Критерии организации группового движения

В данном разделе рассматривается движение в направлении оси Z , т.е. АНПА находятся на разной высоте по отношению друг друга. Следовательно,

в кинематической составляющей модели включено еще одно состояние z , а также в динамической составляющей модели при моделировании добавлена управляющая сила для движения z .

Для проведения моделирования необходимо записать уравнения движения подводного аппарата относительно ССК, которые имеют следующий форму записи:

$$M(\eta)\ddot{\eta} + C(\eta)\dot{\eta} + D(\eta)\eta + g = \tau \quad (51)$$

Где составляющая η - положение в АСК, а составляющая $\dot{\eta}$ – представляет собой линейные и угловые скорости в ССК.

Матрица M и C представляют собой матрицу массы тела и кориолисову матрицы. Матрица D представляет собой результирующую матрицу линейного и квадратичного сопротивления, иначе говоря матрица демпфирования, а составляющая g представляет собой результирующий вектор силы тяжести и плавучести. τ - вектор сил и моментов, которые действует на аппарат в состоянии покоя.

Для решения поставленной задачи рассмотрим систему, состоящую из четырех параметров, которые не зависят друг от друга, которые будут представлены в x, y, z и ψ направлениях.

Матрицу M необходимо заменить на m матрицу, которая имеет следующий вид:

$$m = [m_{11} \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ m_{22} \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ m_{33} \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ m_{44}] \quad (52)$$

где $m_{11}=99$ кг, $m_{22}=108,5$ кг, $m_{33}=126,5$ кг, $m_{44}=29,1$ кг.

Матрица демпфирования задается следующей формулой:

$$D = [d_{11} \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ d_{22} \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ d_{33} \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ d_{44}] \quad (53)$$

где $d_{11} = 10 + 227.18|u|$ кг/с, $d_{22} = 405,41|v|$ кг/с,

$$d_{33} = 10 + 227.18|w| \text{ кг/с}, d_{44} = 1.603 + 12.937|r| \text{ кг/с}.$$

Для простоты вычислений можно пренебречь матрицей кориолисовой силы и матрицей g , поскольку данные матрицы будут вносить незначительные отклонения в расчеты.

Затем необходимо задать исходную траекторию для лидера, которая будет представлять собой прямую линию и будет задана следующими характеристиками:

$$x(t) = 40 * t + 10; y(t) = 30 * t - 5; z = 10 \quad (54)$$

Траектория движения для ведомых АНПА представляют собой прямые линии в разных плоскостях, таким образом, ведомые аппараты находятся на разных высотах, в плоскостях z равных 20 и 30 соответственно. Собранный ранее ПИД-контроллер используется для управления движением АНПА.

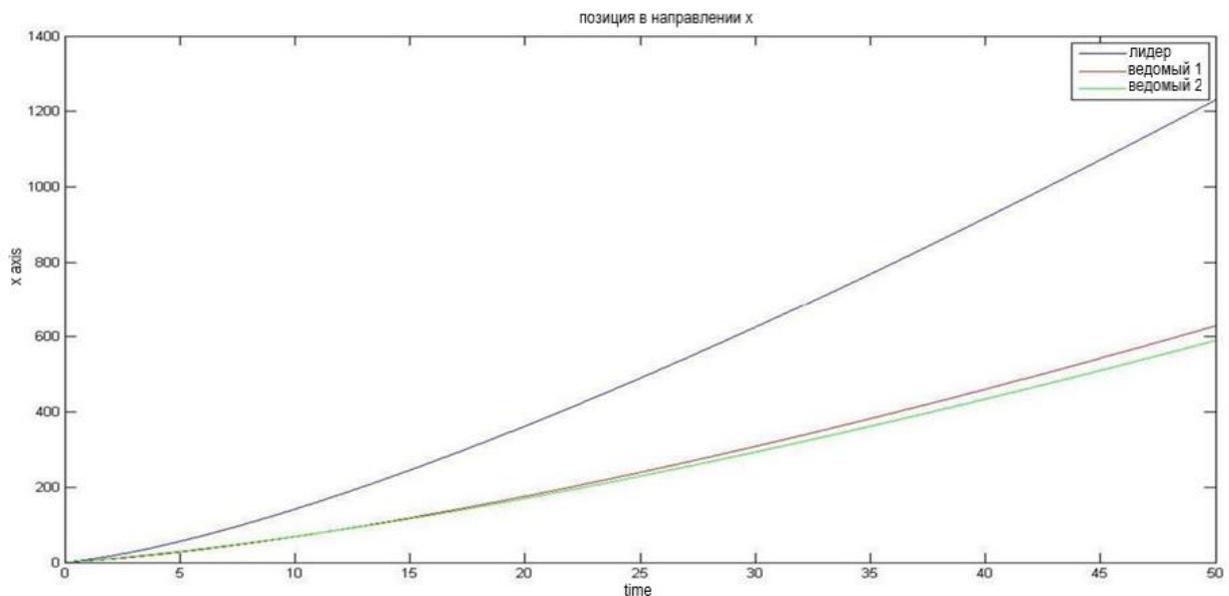


Рисунок 20 – Отслеживание и контроль группы АНПА в 3D (позиции в направлении x)

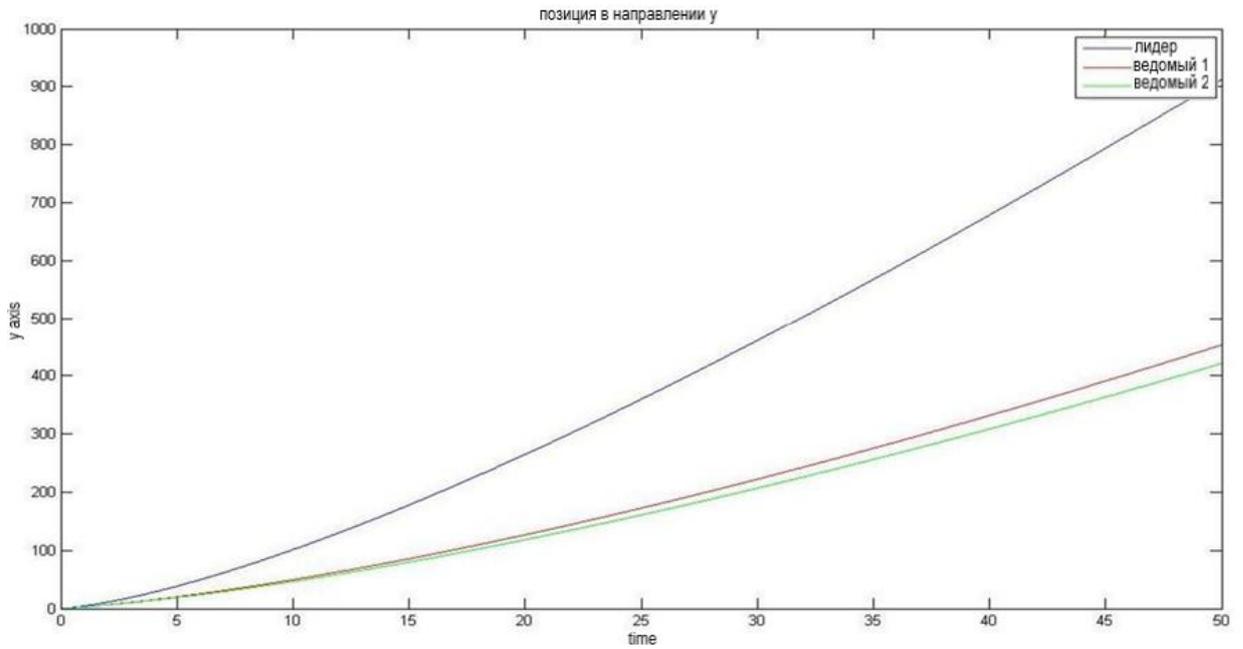


Рисунок 21 – Отслеживание и контроль группы АНПА в 3D (позиции в направлении y)

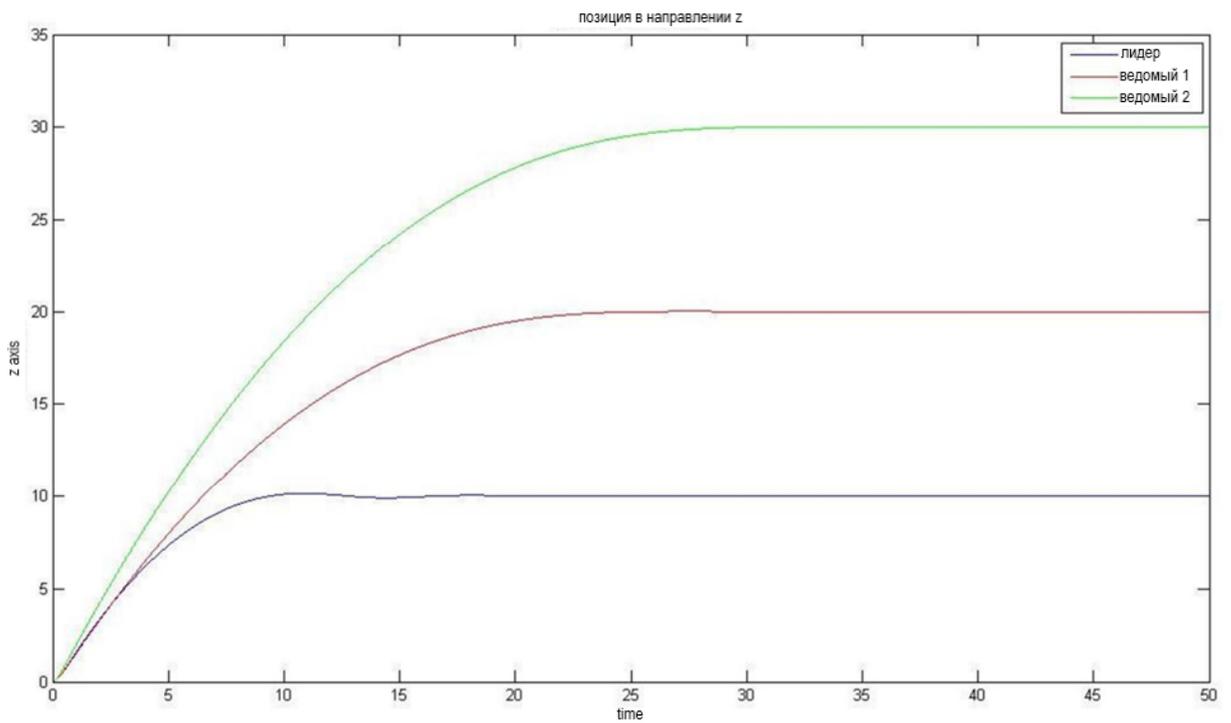


Рисунок 22 – Отслеживание и контроль группы АНПА в 3D (позиции в направлении y)

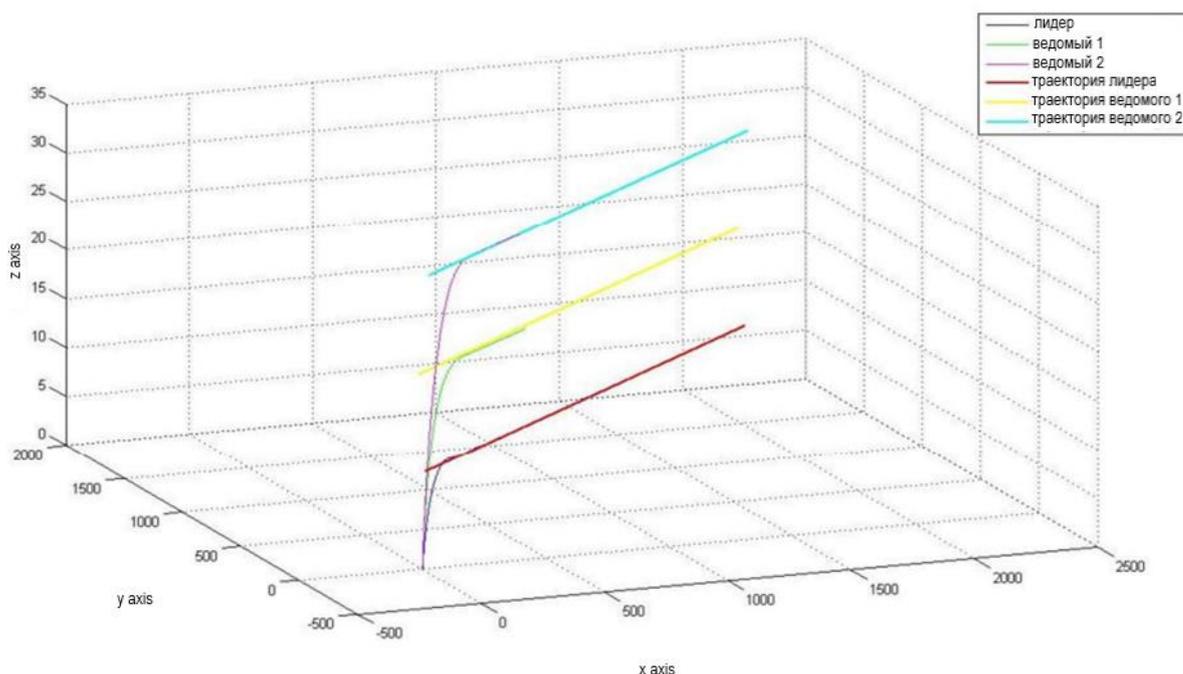


Рисунок 23 – Отслеживание и контроль группы АНПА в 3D

Из полученных сигналов видно, что ведущий АНПА отслеживает свой заданный путь, который представляет собой прямую линию в плоскости $z = 10$, а ведомый 1 сохраняет расстояние в 10 м от ведущего, а ведомый 2 сохраняет расстояние в 20 м от ведущего, что означает, что предлагаемый ПИД-контроллер работает должным образом. Таким образом, отслеживание и управление формированием типа «лидер-ведомый» достигается в трехмерном пространстве. Для расчетов использовался алгоритм, предложенный в источнике [21].

3.4 Преодоление препятствий

Одним из основных свойств автономности АНПА является обнаружение и обход препятствий. Это свойство считают важным по причине то, что воды морей и океанов, в точности, как и трассы на земле, заполнены препятствиями, которые могут иметь различную форму и происхождение. Это могут быть как коралловые рифы, так и другие подводные аппараты. Для того,

чтобы корректно огибать эти препятствия в АНПА встроены специальные системы обхода препятствий, которые устроены таким образом, что АНПА может преодолеть его без какого-либо ущерба как для самого аппарата, так и для миссии, на которую он был направлен, примером такой миссии может служить мониторинг глубинных течений.

В данном разделе рассмотрена схема огибания препятствий, в основе которой лежит регулирование угла тангажа и глубины погружения АНПА. Суть этой схемы состоит в том, что аппарат обнаруживает находящееся перед ним препятствие с помощью гидролокатора переднего обзора. Если препятствие обнаружено, то активируется заложенный алгоритм обхода препятствий. Самыми распространенными препятствиями, которые необходимо обходить, на пути движения АНПА считаются коралловые рифы и волнорезы.

Поскольку эти препятствия являются вертикальными, то их обход эффективнее достичь за счет изменения угла наклона АНПА, чтобы его высота над дном увеличивалась или уменьшалась.

Для того, чтобы обойти препятствие достаточно рассмотреть 4 следующие характеристики: скорость и угол тангажа, глубина и крен.

Принцип действия состоит в следующем, гидролокатор переднего обзора засекает находящееся перед ним препятствие и определяет высоту объекта и расстояние до него. Затем происходит планирование нового маршрута, который будет пройден аппаратом, а затем создание управляющего воздействия для выполнения запланированного маршрута. Помимо этого, аппарат будет необходимо вернуться на свой первоначальный маршрут, после того как АНПА обойдет препятствие.

В данной работе рассматривается только один определенный тип препятствий, форма которого проиллюстрирована на рисунке 24. Для создания управляющего воздействия было использовано устройство, предложенное в работе [17]. Когда гидролокатор обнаружит препятствие он выдаст данные о расстоянии до объекта и его высоте. Затем необходимо рассчитать новый

маршрут движения таким образом, чтобы АНПА не столкнулось с ним. Новым маршрутом должен быть параллелен верхней границе препятствия, создав запас расстояния над его вершиной.



Рисунок 24 – Форма препятствия

В тот момент, когда АНПА достиг вершины препятствия, аппарат проходит над ней на безопасном расстоянии, а в момент, когда гидролокатор засекает нисходящие изменения, аппарат опускается и движется к нижней части. После прохождения препятствия, алгоритм обхода завершен, и аппарат может вернуться на исходный маршрут.

Результаты моделирования

Для того, чтобы смоделировать изложенный выше алгоритм необходимо сначала сделать модель морского дна, где помещаем препятствие на некотором удалении от аппарата. Затем моделируем гидролокатор переднего обзора. Характеристики, присваиваемые гидролокатору, имеют следующий вид: дальность действия составляет 35 метров, а угол обзора по вертикали составляет 24 градуса.

Используя данные, предоставленные гидролокатором, рассчитывается крутизна подъема (траектория подъема), которая представляет отношение высоты к расстоянию до объекта. Новый рассчитанный маршрут передается на ПИД-контроллер, который осуществляет управление аппаратом и направляет АНПА по этому участку, изменяя наклон и глубину. Аналогичный процесс повторяется при спуске АНПА. На плоском участке маршрута, который проходит над вершиной препятствия, АНПА удерживается на заданной высоте, поскольку наклон поверхности равен нулю.

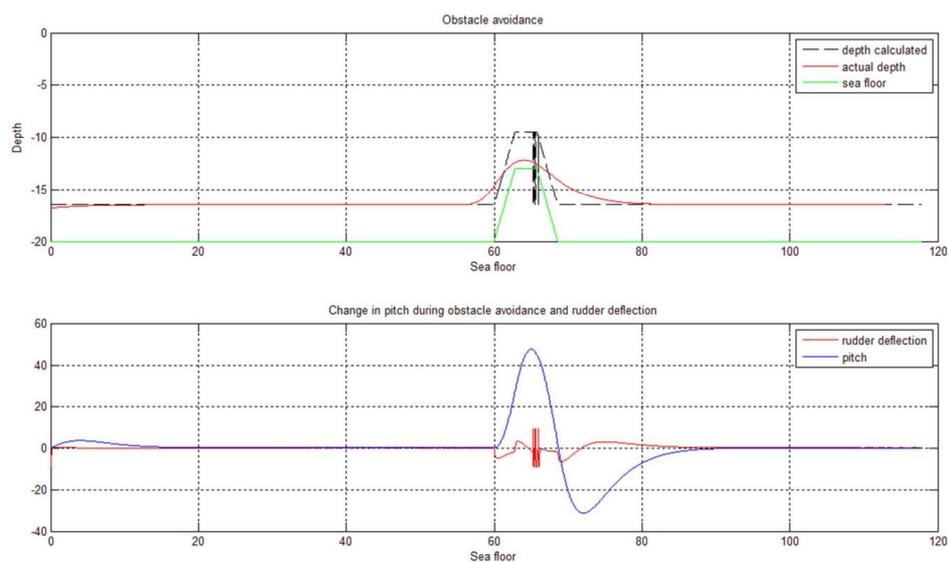


Рисунок 25 – Обход препятствий путем изменения угла наклона и глубины

Основной недостаток данного подхода заключается в том, что не учитывается ситуация в районе «слепых» зон, где могут происходить действия, которые способны нанести вред аппарату.

Вывод по главе 3:

В данной главе, основываясь на изученном в прошлых главах материале, с помощью пакета прикладных программ MATLAB и Simulink была создана модель устройства управления тангажом и глубиной погружения, а также представлена результаты его моделирования и разработана модель управления группой подводных подвижных объектов в соответствии с заданным критерием организации группового движения и продемонстрирована модель обхода препятствий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была разработана модель управления группой подвижных подводных объектов в соответствии с заданными критериями организации группового движения, что являлось целью данной работы. Для этого были выполнены основные задачи исследования:

- изучение современного состояния области исследования;
- анализ существующих моделей и подходов;
- разработка модели устройства управления тангажом и глубиной погружения;
- разработка модели и демонстрация полученных результатов.

Поставленные задачи в данной работе были выполнены в полном объеме, однако дальнейшие исследования в данной теме должны быть продолжены по причине научной новизны, теоретической и практической значимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56960-2016. Аппараты необитаемые подводные. Классификация: национальный стандарт Российской Федерации: Дата введения 01.04.2017 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд.официальное. – Москва :Стандартинформ, 2016 – 8 с.
2. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко. и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева – М.: Наука, 2005. – 398 с.
3. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д.А. Белоглазов, А.Р. Гайдук, Е.Ю. Косенко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, В.В. Соловьев, А.Е. Титов, В.И. Финаев, И.О. Шаповалов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 305 с.
4. Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления роботами при их групповом применении: дис. д-ра техн. наук. – Ростов-на-Дону. – 2008.
5. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
6. Мурсалимов Э.Ш. Разработка метода синтеза универсальной информационно-управляющей системы для робототехнических устройств: дис. Владивосток, 2017.
7. Применение мультиагентных технологий для управления группой необитаемых подводных аппаратов / А.И. Машошин, П.О. Скобелев // Известия ЮФУ. Технические науки, Морская робототехника. – 2016. – 15 с. 7.
8. Развитие системы автономного группового управления разнородными надводными и подводными необитаемыми аппаратами / И.В. Кожемякин, Д.В. Никущенко, В.А. Рыжов, Н.Н. Семенов, М.Н. Чемоданов // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы 7-ой Всероссийской научно-технической конференции. – Владивосток, 2017, – с. 49- 5
9. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. №7. 2009.

10. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006. С. 6-17.
11. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Том 3. №1. С. 4-13. 4 Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Том 4. №3. С. 37-48.
12. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США. // Зарубежное военное обозрение. №5. 2013. С. 79-88.
13. Туфанов И. Е. Разработка системы централизованного управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов. Мехатроника, автоматизация, управление 2013 №07. М.: Новые технологии. — 80 с.
14. Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. №1. 2006. С. 31-39.
15. Применение группы автономных необитаемых подводных аппаратов [URL:https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-gruppy-avtonomnyh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov/viewer](https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-gruppy-avtonomnyh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov/viewer) (дата обращения: 23.12.2022).
16. Особенности группового управления АНПА при ведении сейсморазведки. [URL:https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-grupпового-upravleniya-anpa-pri-vedenii-seysmorazvedki/viewer](https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-grupпового-upravleniya-anpa-pri-vedenii-seysmorazvedki/viewer) (дата обращения: 23.12.2022)
17. Christopher D. Chuhran Obstacle Avoidance Control for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle. Monterey, California 2009
18. Prastero, Timothy. “Simulation Model of REMUS Autonomous Underwater Vehicle”. MIT and WHOI. 2011.
19. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles: a review [URL:https://oaepublishstorage.blob.core.windows.net/](https://oaepublishstorage.blob.core.windows.net/) (дата обращения 05.03.2023)

20. Motion Control of AUV using IMC-PID Controller adarsini et al., International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, Linkan Priyadarsini¹ , Dr. Shubhasri Kundu² , Dr. Manoj Kumar Moharan , 9(3), May – June 2020, 3632 – 3636 3632 ISSN 2278-3091 Volume 9, No.3, May - June 2020 International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering

21. An adaptive leader-follower formation controller for multiple AUVs in spatial motions URL:https://www.researchgate.net/publication/224207863_An_adaptive_leader-follower_formation_controller_for_multiple_AUVs_in_spatial_motions
(дата обращения: 23.03.2023)