



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ

**Специального машиностроения**

КАФЕДРА

**СМ11 «Подводные роботы и аппараты»**

## **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

Студент \_\_\_\_\_ Лященко Сергей Олегович \_\_\_\_\_  
*фамилия, имя, отчество*

Группа СМ11-31М

Тип работы Курсовой проект

Название предприятия НУК СМ

Студент \_\_\_\_\_ Лященко С.О. \_\_\_\_\_  
*подпись, дата* *фамилия, и.о.*

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Кропотов А.Н. \_\_\_\_\_  
*подпись, дата* *фамилия, и.о.*

Оценка \_\_\_\_\_

2020 г.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Кафедра «Подводные роботы и аппараты» (СМ11)

## З А Д А Н И Е на выполнение курсового проекта

на предприятии **НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Студент \_\_\_\_\_ Лященко Сергей Олегович \_\_\_\_\_ СМ11-31М \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество; индекс группы)

### Тема курсового проекта:

Разработка и исследование системы автоматического управления движением автономного необитаемого подводного аппарата при поиске и обнаружении протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.

Дата выдачи задания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Научный руководитель \_\_\_\_\_ / Кропотов А.Н.  
(подпись, дата)

Студент \_\_\_\_\_ / Лященко С.О.  
(подпись, дата) (Фамилия И.О.)

\*\* \\_(ツ)\_/\\_ \\_(ツ)\_/\\_ 2 \\_(ツ)\_/\\_ \\_(ツ)\_/\\_ \*\*

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
Задание на курсовой проект.....	8
1 Особенности организации движения АНПА при поиске и обнаружении протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.....	9
1.1 Применение электромагнитного искателя в качестве распознающего устройства для поиска и обнаружения протяжённых металлосодержащих объектов.....	9
1.2 Организация траекторного движения подводного аппарата в процессе поиска и обнаружения протяжённых металлосодержащих объектов.....	14
1.3 Общая структура системы управления движением АНПА.....	20
1.4 Особенности работы системы управления движением АНПА при поиске и обнаружении протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.....	22
1.5 Краткий анализ подходов к синтезу систем управления движением подводных аппаратов.....	25
1.6 Выводы по разделу 1.....	27
2 Построение математических моделей динамики АНПА.....	28
2.1 Математическая модель динамики движительно-рулевого комплекса.....	28
2.2 Математическая модель движения АНПА в горизонтальной плоскости.....	32
2.3 Выводы по разделу 2.....	39
3 Система управления движением АНПА в горизонтальной плоскости.....	40
3.1 Синтез системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости с использованием ПИД-регуляторов.....	41
3.2 Синтез системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости с использованием пропорциональных регуляторов.....	43
3.2.1 Синтез канала управления углом курса.....	44
3.2.2 Синтез канала управления маршевой скоростью.....	49

3.3 Выводы по разделу 3.....	51
4 Моделирование и исследование полной нелинейной модели системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости.....	52
4.1 Выводы по разделу 4.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	63

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;

БИНС – бесплатформенная инерциальная навигационная система;

ИПМТ ДВО РАН – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук;

ИУС – информационно-управляющая система;

ПМО – протяжённые металлосодержащие объекты;

ЭМИ – электромагнитный искатель;

ДРК – движительно-рулевой комплекс;

БФС ДРК – блок формирования сигналов движительно-рулевого комплекса;

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом в связи с расширением масштабов использования морских пространств, с созданием разветвлённой сети трубопроводов, с прокладкой новых силовых кабелей, с возрастающим количеством жизненно-важных для мировой экономики коммуникационных линий, проходящих по дну морей и океанов, задачи поиска, обнаружения и отслеживания этих объектов с помощью специальных технических средств становятся неотъемлемой частью работ, проводимых с помощью подводных аппаратов.

Поиск, обнаружение и отслеживание протяжённых металлосодержащих объектов (ПМО) относится к работам поисково-обследовательского класса. Наиболее современным, эффективным и перспективным является применение для этих целей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), которые способны в автоматическом режиме решать следующие задачи:

- поиск, обнаружение и отслеживание протяжённого объекта;
- уточнение его местоположения;
- оценка состояния, поиск и локализация участков и точек повреждений;
- выявление других нештатных ситуаций.

Для решения данных задач подводный аппарат должен быть оборудован надёжными средствами идентификации ПМО – оптическими, акустическими и электромагнитными сенсорами. Пространственное движение аппарата при поиске, обнаружении и отслеживании ПМО формируется информационно-управляющей системой (ИУС) АНПА в соответствии с разработанной программной миссией с учётом информации, получаемой от используемых бортовых сенсорных устройств.

Достаточно давно ведутся работы по разработке средств обнаружения ПМО на основе электромагнитных устройств, в частности, на базе электромагнитного искателя (ЭМИ), разработанного в ИПМТ ДВО РАН.

В открытых источниках подробно описано применение ЭМИ для инспекции трубопроводов и кабелей, направление прокладки которых, как правило, известно. Научная новизна данной работы состоит в разработке

системы управления движением подводного аппарата для случаев, когда возникает необходимость скрытного обследования большой акватории с целью обнаружения и отслеживания ПМО, местоположение которых заранее неизвестно и определяется в процессе поиска в заданной области. При этом возникает необходимость в организации необходимого пространственного перемещения АНПА во время выполнения миссии. Точность выполнения движения по пространственным траекториям в значительной степени зависит от качества работы системы управления движением подводного аппарата.

В настоящей работе представлены результаты синтеза и исследования системы управления движением для малогабаритного, имеющего удобообтекаемую торпедообразную форму АНПА, с движительно-рулевым комплексом (ДРК), обеспечивающим перемещение по четырём степеням свободы: маршу, курсу, дифференту и глубине.

Полная математическая модель движения АНПА является нелинейной, нестационарной, многомерной и многосвязной. Поэтому задача синтеза системы управления движением подводного аппарата, обеспечивающей требуемое качество управления, остаётся всегда актуальной.

Целью настоящей работы является повышение эффективности подводных работ и исследований, проводимых с помощью малогабаритного поискового аппарата при выполнении работ по поиску и обнаружению протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.

В соответствии с поставленной целью – задачи данной работы:

- анализ особенностей организации движения АНПА при поиске и обнаружении протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя;
- разработка общей математической модели движения АНПА;
- разработка структуры системы управления движением АНПА;
- синтез системы управления движением АНПА;
- моделирование полной нелинейной модели системы управления и исследование показателей качества управления движением АНПА.

## Задание на курсовой проект

В рамках курсового проекта требуется разработать и исследовать систему автоматического управления движением АНПА «Исследователь» при поиске, обнаружении и отслеживании протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.

На рисунке 1 представлен внешний вид и размеры АНПА «Исследователь».

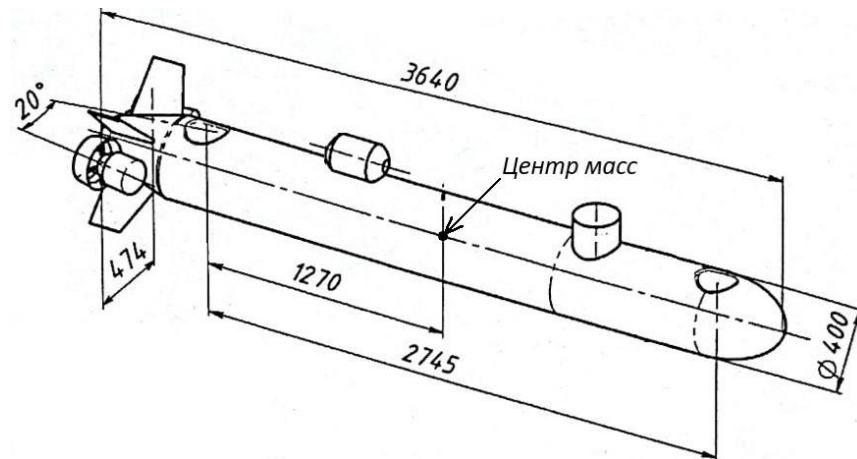


Рисунок 1 – Внешний вид АНПА «Исследователь»

Необходимо:

- провести анализ особенностей построения системы управления движением АНПА при поиске, обнаружении и отслеживании протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя;
- разработать математическую модель движения АНПА в горизонтальной плоскости;
- выполнить синтез системы управления движением АНПА с учётом требуемых характеристик переходного процесса;
- провести моделирование и исследование синтезированной системы управления движением АНПА.

При этом к синтезируемой системе предъявляются следующие требования:

- при ступенчатом входном воздействии  $1^\circ \dots 50^\circ$  перерегулирование  $\sigma \leq 5\%$ , длительность переходного процесса  $t \leq 3\text{с}$ ;
- отсутствие статической ошибки при постоянном внешнем возмущении;
- минимизация динамической ошибки;



# **1 Особенности организации движения АНПА при поиске и обнаружении протяжённых металлодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя**

## **1.1 Применение электромагнитного искателя в качестве распознающего устройства для поиска и обнаружения протяжённых металлодержащих объектов**

Поиск, обнаружение и мониторинг состояния ПМО ведётся с помощью систем подводного поиска, которые представляют собой совокупность приборов и устройств входящих в состав системы технического зрения подводного аппарата: фото- и видеосистем, обзорных гидролокаторов и электромагнитных датчиков. Каждая из систем определённым образом распознаёт определённый класс объектов в соответствующих условиях [1, 2].

По способу получения информации о ПМО системы поиска делятся на две группы: пассивные и активные. Пассивные системы состоят из многоканальных приёмных антенн и обнаруживают ПМО по различным внешним физическим полям, создаваемым этими объектами или по внесённым этими объектами искажениям в магнитное поле Земли. Активные системы состоят из излучающих и приёмных антенн и позволяют обнаружить ПМО по искажению сигнала, излучаемого системой поиска.

По принципу действия системы поиска делятся на оптические, гидроакустические и электромагнитные. Для того, чтобы повысить вероятность обнаружения ПМО, точность определения его местоположения и качество обследования объекта, применяется комплексирование данных от нескольких сенсорных устройств АНПА, действие которых основано на различных физических принципах [3, 4].

Рассмотрим особенности использования каждого типа систем поиска.

Оптические системы позволяют точно отслеживать ПМО только в непосредственной близости от него. Поэтому чаще всего данные системы поиска используются уже при следовании вдоль объекта [3].

В гидроакустических системах поиска для обнаружения подводных объектов используются звуковые волны, излученные либо активной системой, либо самим объектом. Так как определение расстояния до объекта у пассивных систем затруднительно в отличие от активных, то только активные системы поиска позволяют полностью выполнять задачу по обнаружению объекта [2].

При обследовании ПМО с использованием гидроакустических систем поиска основные трудности связаны с тем, что на мелководных участках такие ПМО заглубляются в грунт для обеспечения защиты трубопроводов и кабелей от случайного повреждения якорными системами судов или устройствами для ловли рыб. В этом случае гидроакустические средства оказываются малоэффективными и для обнаружения и отслеживания ПМО могут использоваться методы, основанные на измерении параметров электромагнитных полей.

В данной работе будет рассматриваться поиск и обнаружение ПМО имеющих незначительную площадь поперечного сечения (кабели). Особенность обследования таких протяжённых объектов заключается в том, что их невозможно обнаружить с помощью дальнодействующих устройств, таких как эхолоты. Необходимо использовать системы другого типа, например, электромагнитные.

Электромагнитные системы поиска способны измерять собственные электромагнитные поля ПМО или вторичные электромагнитные поля, созданные токами в ПМО, наведёнными излучающими устройствами подводного аппарата. Данные системы позволяют производить поиск и отслеживание ПМО с высокой точностью, но подвержены влиянию различных аномалий магнитного поля Земли, а также возможного взаимодействия с электромагнитными полями, создаваемыми находящимися рядом другими искусственными подводными объектами. Из-за особенностей распространения электромагнитных волн в толще воды область действия электромагнитных сенсорных устройств в большинстве случаев ограничена 1-3 метрами. Отличительной особенностью данных систем поиска является то, что они реагируют только на

металлосодержащие объекты. Существуют различные варианты российских и зарубежных электромагнитных систем поиска, устанавливаемых на подводные аппараты, например, системы поиска SMARTRAK производства английской фирмы Innovatum, системы поиска TSS и Dualtrack фирмы Teledyne Technologies, а также система поиска на основе электромагнитного искателя, разработанная в ИПМТ ДВО РАН.

Применение АНПА в качестве носителя такой аппаратуры имеет ряд преимуществ перед аппаратами других типов:

- отсутствие кабель-тросовой связи с судном-носителем и соответственно, определяемых ею недостатков;
- способность функционировать в местах, недоступных для других типов подводных аппаратов;
- скрытность функционирования;
- высокая мобильность.

Из перечисленных систем подводного поиска только ЭМИ, разработанный в ИПМТ ДВО РАН, проектировался для установки на автономные необитаемые подводные аппараты и входит в состав систем технического зрения большинства действующих образцов необитаемых подводных аппаратов таких, как МТ-98, TSL, МТ-2010, МТ-2011, «Клавесин 1-Р» и др. [1]. Системы поиска на основе электромагнитного искателя относятся к наиболее надёжным средствам детектирования металлосодержащих объектов, обладающим наименьшей вероятностью ложных срабатываний. Кроме того, в отличие от гидроакустических и оптических детекторов, ЭМИ является единственным устройством, способным измерять угловое положение АНПА относительно кабеля.

Принцип работы электромагнитного искателя, разработанного в ИПМТ ДВО РАН, заключается в излучении электромагнитных волн излучающими антеннами, и фиксации приёмными электродами искажений излученного поля при прохождении над проводящим ПМО. Сравнивая величины напряжённости на разных электродах можно рассчитать направление ПМО относительно

продольной оси корпуса аппарата. Направление протяженного объекта по данным ЭМИ ( $\psi_{\text{ПМО}}$ ) определяется путем сложения величин курса АНПА ( $\psi_{\text{АНПА}}$ ) и угла залегания кабеля относительно продольной оси АНПА ( $\gamma$ ) (см. рис.2) [5].

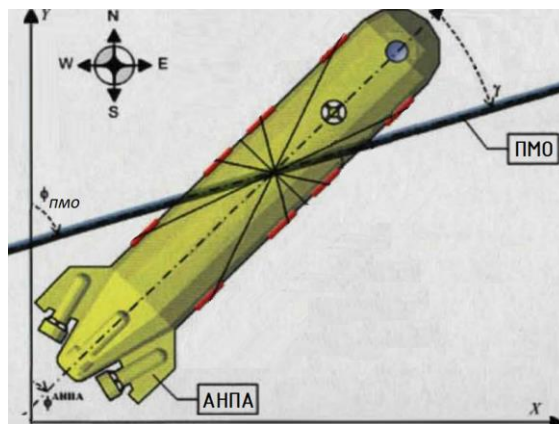


Рисунок 2 – Определение направления залегания ПМО

Оценка вероятности наличия искомого объекта с помощью ЭМИ зависит от величины потенциала на приёмных антеннах и скорости её нарастания за интервал времени, предшествующий максимуму. Конкретная зависимость подбирается экспериментально исходя из характеристик устройства, скорости и высоты движения АНПА и свойств объекта поиска (электромагнитные характеристики, диаметр, толщина оболочки). ЭМИ надёжно идентифицирует металлосодержащий протяжённый объект на расстоянии 1...3 метра при заходе на него под углами  $30^\circ \dots 60^\circ$  к продольной оси АНПА. Система поиска на основе ЭМИ работает нестабильно при движении аппарата вдоль протяжённого объекта (скорость изменения потенциала на приёмных антеннах близка к нулю) и поперёк (излучающими электродами наводятся слишком малые токи в ПМО). Согласно проведённым в ИПМТ ДВО РАН исследованиям, вероятность обнаружения ПМО с помощью ЭМИ составляет до 98% [5, 6].

Таким образом, система поиска на основе электромагнитного искателя позволяет определять направление ПМО относительно продольной оси аппарата и вырабатывать оценку существования объекта в радиусе действия системы и может использоваться в качестве надёжного поискового средства для обнаружения искомого объекта и выработки данных, необходимых для управления движением и поведением аппарата.

## 1.2 Организация траекторного движения подводного аппарата в процессе поиска и обнаружения протяжённых металлосодержащих объектов

Для описания траекторий и при решении задач управления движением будем использовать системы координат, изображённые на рисунке 3.

Текущие координаты АНПА определяются в местной географической системе координат  $O\zeta\eta\xi$  (прямоугольная декартова система координат, у которой ось  $O\zeta$  направлена на север,  $O\xi$  на восток,  $O\eta$  по вертикали места, а начало координат  $O$  жёстко связано с некоторой начальной точкой (например, с координатами судна-носителя или неподвижным репером)). Составляющие вектора линейной скорости  $v_x, v_y$  и  $v_z$  аппарата определяются в связанной системе координат  $O_aXYZ$  (прямоугольная декартова система координат, у которой ось  $O_aX$  совпадает с продольной осью АНПА,  $O_aZ$  направлена на правый борт,  $O_aY$  – по вертикальной оси аппарата, а за начало координат  $O_a$  принимается положение центра масс АНПА). Вращательное движение аппарата задаётся тремя последовательными поворотами связанной системы координат  $O_aXYZ$  на углы курса ( $\psi$ ), дифферента ( $\vartheta$ ) и крена ( $\gamma$ ) относительно полусвязанной системы координат  $O_a\zeta\eta\xi$  начало координат которой  $O_a$  совмещено с центром масс АНПА, а оси параллельны соответствующим осям местной географической системы координат (рис.3) [7].

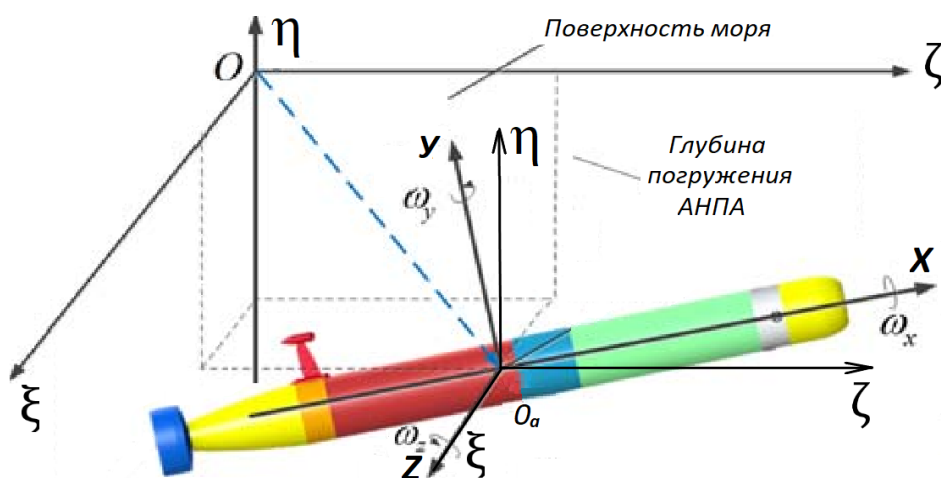


Рисунок 3 – Связанная ( $O_aXYZ$ ), полусвязанная ( $O_a\zeta\eta\xi$ ) и местная географическая ( $O\zeta\eta\xi$ ) системы координат

На данный момент в существующих разработках методов автоматической идентификации и мониторинга подводных трубопроводов и кабелей вначале производится поиск и идентификация искомого объекта, при обнаружении объекта аппарат переходит к отслеживанию. В процессе поиска для определения расположения ПМО относительно донного грунта подводный аппарат перемещается по поисковой траектории («меандр» или «зигзаг») до пересечения с объектом, напоминающим искомый. При отслеживании подводный аппарат перемещается либо с небольшими отклонениями («змейкой»), либо непосредственно по оси ПМО. Общий план организации движения АНПА при поиске, обнаружении и отслеживании металлосодержащих объектов приведён на рисунке 4 [8].



Рисунок 4 – План поведения АНПА при поиске и отслеживании ПМО

Эта технология, разработанная в ИПМТ ДВО РАН и апробированная в 2008 году в Уссурийском заливе в рамках программы опытной эксплуатации АНПА «Клавесин 1Р» [1], позволяет производить инспекцию ПМО. При этом предполагается, что координаты и направление залегания обследуемого ПМО известны. АНПА после погружения движется к заданной целевой точке до получения первого сигнала обнаружения от ЭМИ. Предлагаемый ниже подход относится к задаче, когда с помощью малогабаритного поискового подводного аппарата «Исследователь» в заданной акватории необходимо произвести операцию по поиску неизвестного ПМО в случае отсутствия априорной информации о его местоположении. При этом в процессе выполнения миссии возникает необходимость решения поведенческих задач связанных с

дополнительным обследованием зафиксированных случаев «срабатывания» ЭМИ.

В процессе планирования миссии с целью поиска и обнаружения неизвестного ПМО при формировании траекторий движения аппарата необходимо учитывать:

- ограничения по манёвренности, обусловленные конфигурацией ДРК применяемого АНПА;
- требования, связанные с использованием ЭМИ в качестве основного бортового поискового устройства.

При выполнении поиска ПМО подводный аппарат движется по эквидистантной пространственной траектории. При этом алгоритмы организации движения при поиске и обнаружении объекта описывают движение АНПА в горизонтальной плоскости

При выполнении данного класса работ необходимо различать поисковую траекторию, а также траектории движения при обнаружении и отслеживании искомого объекта. Оптимальные траектории движения АНПА должны обеспечивать максимальную вероятность обнаружения ПМО с помощью ЭМИ и при этом время поиска объекта должно быть минимальным. При формировании траекторий целесообразно использовать типовые элементы покрытия, которые обычно применяются при выполнении поисково-обследовательских работ [1].

Разобьём акваторию поиска на прямоугольные области, которые последовательно должны быть обследованы аппаратом с целью обнаружения неизвестного ПМО. При первоначальном поиске ПМО в заданной прямоугольной области наиболее целесообразным является движение аппарата галсами по типовой траектории типа «меандр», состоящей из последовательности длинных параллельных взаимообратных галсов (рабочих) (рисунок 5). Такая траектория позволяет достаточно просто организовать движение аппарата и обеспечивает наиболее эффективное покрытие обследуемой области с точки зрения минимизации временных и энергетических затрат. Меандр не содержит повторных покрытий, перекрытий и возвратных

движений, в результате чего обладает одним из наиболее высоких соотношений покрытой площади к пройденному расстоянию из-за отсутствия избыточности. Для минимизации количества поворотов АНПА рабочие галсы ориентируют вдоль более длинной стороны области поиска. Длина рабочих галсов определяется размерами области поиска ( $a$ ), а межгалсовая дистанция является шагом меандра ( $b$ ), который выбирается исходя из условия гарантированного охвата области поиска зоной действия используемых бортовых устройств, размеров АНПА и его минимального радиуса циркуляции.

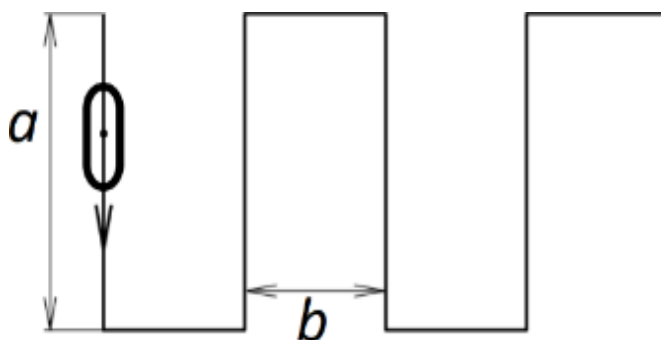


Рисунок 5 – Траектория покрытия типа «меандр»

Если в процессе поиска будет получен первый сигнал обнаружения от ЭМИ, то необходимо произвести проверку на предмет ложного срабатывания на нецелевом объекте поиска и определить предполагаемое направление залегания ПМО. В данном случае целесообразно организовать движение аппарата по траектории типа «расходящаяся спираль» (рисунок 6) с целью последовательного расширения области обследования в окрестности точки получения первого сигнала обнаружения от ЭМИ. Это даст возможность получить дополнительные сигналы обнаружения от ЭМИ, классифицировать обнаруженный объект как ПМО, уточнить его местоположение, направление залегания и сформировать нужный курс движения аппарата [9]. Расстояние между витками спирали (шаг спирали) определяется чувствительностью ЭМИ.



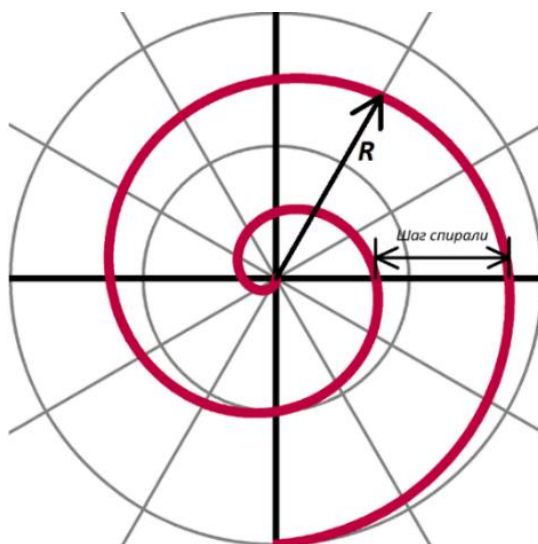


Рисунок 6 – Траектория движения типа «расходящаяся спираль»

Далее предполагается в течении определённого промежутка времени отследить обнаруженный объект, в точках пресечения задокументировать его координаты и произвести фотосъёмку для анализа оператором на борту сопровождающего судна и принятия решения о необходимости дальнейшего обследования.

Оптимальная траектория движения для отслеживания ПМО представляет собой колебательное движение типа «змейка» вдоль обнаруженного объекта. Для обеспечения стабильности работы ЭМИ галсы должны располагаться под углом, близким к  $45^\circ$ , при этом амплитуда колебаний подбирается с учётом радиуса циркуляции АНПА и необходимой частоты пересечений с кабелем для надёжной идентификации объекта (рисунок 7).



Рисунок 7 – Траектория движения типа «змейка»

Допустим, в заданной области поиска находится неизвестный ПМО, местоположение которого необходимо определить. В этом случае траектория движения, реализуемая ИУС АНПА, представляет собой набор из описанных

выше типовых траекторий и её возможный вид для выполнения задачи поиска и обнаружения ПМО приведён на рисунке 8.

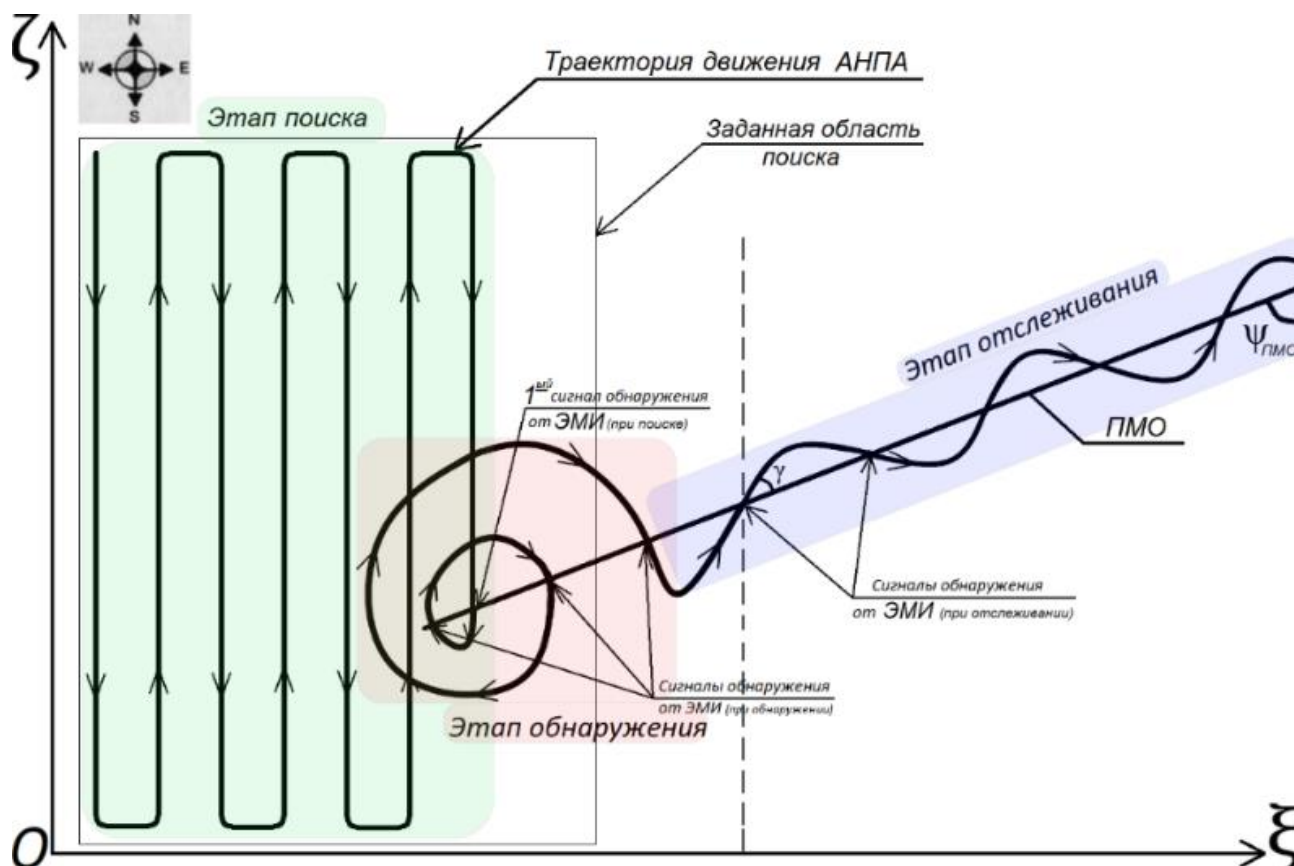


Рисунок 8 – Траектория движения АНПА при поиске и отслеживании ПМО в горизонтальной плоскости местной географической системы координат  $O\zeta\eta\xi$

В общем случае, при выполнении миссии по поиску и обнаружению ПМО движение подводного аппарата представляет собой движение в придонном пространстве на определённом отстоянии от дна по корректируемой в соответствии с сигналами обнаружения от ЭМИ траектории. Система управления движения должна обеспечивать необходимые пространственные перемещения аппарата с заданным качеством управления.

### 1.3 Общая структура системы управления движением АНПА

В общем виде структурная схема системы управления движением АНПА представлена на рисунке 9:

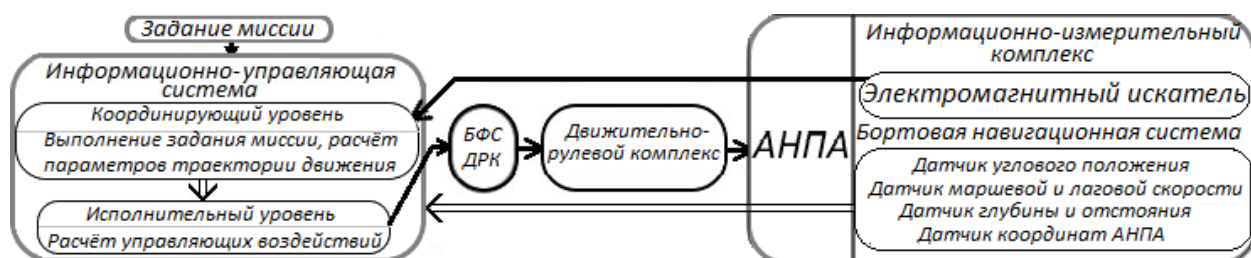


Рисунок 9 – Структурная схема системы управления движением АНПА

В состав данной структурной схемы входят следующие основные блоки: движительно-рулевой комплекс; блок формирования сигналов движительно рулевого комплекса (БФС ДРК); АНПА; информационно-измерительный комплекс; информационно-управляющая система (ИУС).

Движительно-рулевой комплекс – исполнительное устройство.

Блок формирования сигналов движительно рулевого комплекса – предназначен для преобразования сигналов системы управления в управляющие напряжения для двигателей. Реализуется программно в бортовом вычислителе АНПА.

АНПА – объект управления. Для синтеза системы управления движением используется математическая модель аппарата, которая в общем случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений движения АНПА и динамики его движительно-рулевого комплекса.

Информационно-измерительный комплекс – совокупность измерителей параметров движения и специального обзорно-поискового оборудования. Измерители параметров служат для выдачи в систему управления всей необходимой информации о текущих параметрах углового и линейного движения АНПА. Упрощённые модели измерителей параметров представим в виде безынерционных звеньев с коэффициентом усиления  $k = 1$ . К специальному оборудованию относится электромагнитный искатель, который позволяет определять направление ПМО относительно продольной оси аппарата и вырабатывать оценку существования объекта в радиусе действия системы.

Информационно-управляющая система – это управляющая система, с помощью которой добиваются необходимого качества управления для выполнения поставленных в миссии задач. Реализуется с помощью программирования бортового управляющего компьютера АНПА.

Условно разделим систему управления движением, входящую в состав ИУС аппарата, на два уровня:

- координирующий, задающий траекторию движения, в зависимости от полученной информации от ЭМИ;
- исполнительный, состоящий из сепаратных каналов управления линейными координатами и угловым положением аппарата.

Система управления движением замыкается с помощью обратных связей для реализации высокоточного управления движением АНПА в условиях внешних воздействий и должна удовлетворять требованиям по качеству динамических процессов, которое обеспечивается выбором структуры управления и синтезом системы управления движением.

#### **1.4 Особенности работы системы управления движением АНПА при поиске и обнаружении протяжённых металлосодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя**

В настоящей работе задача управления движением подводного аппарата связана с организацией траекторного движения с целью поиска и обнаружения ПМО с использованием ЭМИ. Для этого необходимо, чтобы после выхода в район поиска аппарат двигался в придонном пространстве по поисковому меандру, а затем, в случае получения сигнала обнаружения от ЭМИ, переходил к выполнению траекторий типа «спираль» и «змейка». По окончании поисковой программы подводный аппарат должен вернуться к сопровождающему судну.

Следовательно, система управления движением должна обеспечивать пространственные перемещения подводного аппарата с заданной скоростью по заданным криволинейным и достаточно протяжённым траекториям.

В качестве объекта управления для разработки и исследования системы управления движением в настоящей работе используется малогабаритный АНПА «Исследователь», корпус которого имеет хорошо обтекаемую торпедообразную форму. Для стабилизации аппарата по крену и маршу аппарат имеет Х-образное кормовое оперение (см. рисунок 1). ДРК подводного аппарата состоит из двух маршевых движителей, расположенных в кормовой части, и двух вертикальных движителей. Такая компоновка ДРК не обеспечивает управление движением по всем шести степеням свободы аппарата: аппарат не управляется по крену, и лагу.

Анализ поведения аппарата при выполнении миссии по поиску ПМО позволяет выделить следующие основные режимы движения аппарата, определяющие динамические требования к системе управления движением:

- режим прямолинейного движения в точку с заданной скоростью;
- изменение (стабилизация) курса, циркуляция;
- погружение, всплытие;
- стабилизация отстояния от дна.

Отличительной особенностью организации работы системы управления движением исследуемого АНПА является интеграция поискового устройства на основе ЭМИ в информационно-управляющую систему аппарата.

Основу управления движением составляют алгоритмы, определяющее поведение аппарата, и кинематические алгоритмы координирующего уровня, формирующие задающие сигналы для сепаратных каналов системы управления движением исполнительного уровня с учётом получаемых сигналов от ЭМИ.

Пространственные перемещения аппарата функционально могут быть разделены на движения в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Введём допущение, что обследуемая область свободна от препятствующих движению АНПА объектов. Задача управления движением в вертикальной плоскости заключается в реализации движения по эквидистанте на отстоянии 1-3 м от донной поверхности (для обеспечения необходимой чувствительности ЭМИ) и нулевых углов крена и дифферента. Различные способы организации эквидистантного движения описаны в работах [9, 11, 36].

В рамках данной работы движение в вертикальной плоскости не рассматривается. Тогда задача управления движением в горизонтальной плоскости будет заключаться в организации необходимого траекторного движения подводного аппарата (с учётом полученных сигналов обнаружения от ЭМИ) путём выработки программного значения угла курса для курсовой коррекции движения, а также обеспечения режима стабилизации в канале управления маршевой скоростью. Для этого в кинематических алгоритмах координирующего уровня системы управления рассчитывается требуемое значение угла курса АНПА и задаётся значение маршевой скорости, которые являются управляющими сигналами для соответствующих каналов исполнительного уровня.

Рассмотрим подробнее как осуществляется курсовое движение аппарата.

Под действием внешних возмущений АНПА непрерывно уклоняется от прямолинейного курса. Подобная неустойчивость на курсе называется рыскливостью. Внешние возмущения, действующие на АНПА (боковой снос),

вызывают отклонение относительно заданного курса и способствуют увеличению рыскливости. При прямолинейном движении функция управления движением по курсу заключается в поддержании угла рыскания близким к нулю.

Для перехода АНПА на новый курс на входе канала управления углом курса формируется заданное значение угла курса. Регуляторы системы управления начинают отрабатывать возникшее рассогласование заданного и текущего курса. Процесс стабилизации курса сопровождается рысканием аппарата и статической ошибкой по курсу. Причина этого – отсутствие демпфирующего влияния веса и плавучести [11]. В процессе маневрирования аппарата по курсу в условиях возмущающих воздействий основная задача управления сводится к компенсации внешних сил с помощью движителей и состоит в том, чтобы обеспечить апериодический, с минимальным перерегулированием переходный процесс.

Следовательно, работа системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости состоит в том, чтобы в процессе движения по маршруту по заданной траектории свести к нулю возникающее рассогласование заданного и фактического курса, при этом должны обеспечиваться высокое быстродействие, низкая динамическая ошибка, нулевая статическая ошибка. Вышеперечисленные качества обеспечиваются в процессе синтеза системы управления движением.

## 1.5 Краткий анализ подходов к синтезу систем управления движением подводных аппаратов

Для достижения требуемого качества управления движением подводного аппарата во всех его каналах управления необходимо синтезировать регуляторы с такой структурой и параметрами, которые обеспечат минимальное перерегулирование и время переходного процесса, а также статическую и динамическую точность. Параметры математических моделей, описывающих движение подводного аппарата как объекта управления, меняются, так как они зависят от скорости движения и углов наклона подводного аппарата [Статья Егорова]. В процессе пространственного движения в вязкой среде подводный аппарат постоянно испытывает случайные возмущения, обусловленные резким изменением режима управления, местным течением, изменением плотности забортной воды, что также приводит к изменению параметров аппарата и, как следствие, к изменению динамических свойств системы управления и даже потере её устойчивости.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество методов синтеза систем управления движением для подводных аппаратов. Условно эти методы можно разделить на три большие группы.

Первая группа – это системы управления, синтезированные на основе традиционных подходов с использованием упрощённых математических моделей подводных аппаратов и предположений о постоянстве их параметров. Эти системы управления синтезируются методами классической теории линейных систем автоматического управления. Однако эффективность использования систем управления данного типа падает в режимах движения подводного аппарата с высокой скоростью по сложным пространственным траекториям, когда в полной мере проявляются такие негативные эффекты, как переменность и неопределённость параметров подводного аппарата, наличие перекрёстных связей между степенями свободы аппарата. В этом случае для обеспечения приемлемого качества управления вводят комбинированную коррекцию, либо программно изменяют коэффициент усиления регулятора для



разных режимов работы [9]. К достоинствам традиционного подхода следует отнести большое количество проработанных методик синтеза систем управления и простоту их реализации.

Ко второй группе относятся робастные системы управления, которые обеспечивают независимость процесса управления от изменения параметров и свойств подводного аппарата. Это позволяет обеспечить требуемое качество управления движения АНПА при любых изменениях его параметров в заданных интервалах. Одна из разновидностей робастных систем управления – системы с эталонной моделью [13, 21], которые находят применение в подводной робототехнике [12, 18] и обеспечивают качественное управление движением подводного аппарата. Другая разновидность робастных систем управления – оптимально-робастные системы управления [20, 22]. Этот вид часто используется как для управления многомерными объектами, так и для управления отдельными степенями свободы АНПА. В настоящее время широкое распространение получили системы управления на основе нейронных систем, однако они требуют для своей реализации больших вычислительных мощностей, которые пока сложно обеспечить на борту АНПА. Для управления движением АНПА часто применяются робастные системы управления с переменной структурой, работающие в скользящем режиме, а также с использованием методов нечёткой логики [14, 15, 19, 27]. Существенный недостаток систем управления данного вида – заведомо заниженное быстродействие, которое приводит к значительному снижению динамической точности отработки управляющих сигналов и, следовательно, к снижению точности движения аппарата по заданной траектории.

К третьей группе систем управления движением относятся адаптивные системы управления движением, которые позволяют подстраивать параметры этих систем управления к изменению параметров аппарата в процессе работы. Принципы построения таких систем приведены в работах [17, 23], а их использование в различных задачах управления рассмотрено в работах [18, 26]. Основной недостаток адаптивных систем управления – высокая сложность

реализации, а также необходимость идентификации параметров подводного аппарата в процессе движения.

Необходимо отметить, что выбор структуры системы управления движением в большой степени определяется конкретным типом подводного аппарата и решаемыми задачами.

АНПА «Исследователь» относится к классу малогабаритных аппаратов, имеет торпедообразную обтекаемую форму, движительный комплекс обеспечивает движение по маршу, курсу, дифференту и глубине. Эти конструктивные особенности ведут к снижению негативных взаимодействий аппарата с вязкой средой и к снижению взаимовлияний между степенями свободы аппарата. Это позволяет для исследуемого аппарата использовать простые системы управления, в том числе, основанные на линейных регуляторах, для управления движением по пространственным траекториям. Однако, для обеспечения заданного качества управления движением необходимо при синтезе системы управления движения учитывать особенности динамики, компоновки и нелинейностей ДРК, а также обеспечивать формирование траекторий движения, учитывающих ограничения по управляющим воздействиям и манёвренности аппарата.

## 1.6 Выводы по разделу 1

Проведённый в данном разделе анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Система поиска на основе ЭМИ может использоваться в качестве надёжного средства обнаружения ПМО.
2. При выполнении поиска и обнаружения ПМО, местоположение которого априорно неизвестно, необходимо организовать пространственное перемещение аппарата по типовым траекториям, которые состоят из участков прямолинейного движения (прямоугольный «меандр») и криволинейного («спираль», «змейка»).
3. Особенностью организации работы системы управления движением исследуемого АНПА является интеграция ЭМИ в алгоритмы управления движением.
4. На основании проведённого анализа различных подходов к синтезу систем управления движением с учётом конструктивных характеристик исследуемого АНПА и решаемых задач сделан вывод о целесообразности использования традиционного подхода к синтезу системы управления движением.

## 2 Построение математических моделей динамики АНПА

### 2.1 Математическая модель динамики движительно-рулевого комплекса

Динамика движительного комплекса оказывает существенное влияние на динамику всего АНПА в целом. Поэтому при синтезе системы управления движением аппарата необходимо обязательно учитывать особенности компоновки ДРК, нелинейности движителей и включать модель динамики ДРК конкретного подводного аппарата в общую математическую модель, описывающую движение АНПА по пространственным траекториям.

Движительно-рулевой комплекс АНПА «Исследователь» состоит из двух кормовых маршевых движителей и двух вертикальных (см. рис.1), что позволяет управлять четырьмя степенями свободы аппарата. Маршевые движители обеспечивают управление маршевой скоростью и маневрирование по курсу. Вертикальные движители размещены в сквозных цилиндрических водоводах в вертикальной продольной плоскости симметрично относительно центра масс аппарата и служат для управления глубиной погружения и дифферентом, они позволяют всплывать и погружаться, не изменяя угловую ориентацию аппарата. Такая компоновка ДРК позволяет снизить взаимовлияние контуров системы управления движением, т.к. число движителей соответствует числу управляемых координат.

Маршевые движители расположены в кормовой части, ориентированы под углом  $\delta = 10^\circ$  относительно продольной оси в горизонтальной плоскости симметрии аппарата. Это позволяет при малом диаметре аппарата получить большие управляющие моменты для изменения угла курса [9].

Необходимо учитывать, что оба маршевых движителя аппарата используются для регулирования как маршевого движения, так и курса. Для прямолинейного движения по маршруту оба маршевых движителя создают одинаковые и сонаправленные упоры (рис.10 а)), а маневрирование аппарата по

курсу осуществляется за счёт формирования разности упоров движителей (рис.10 б)).

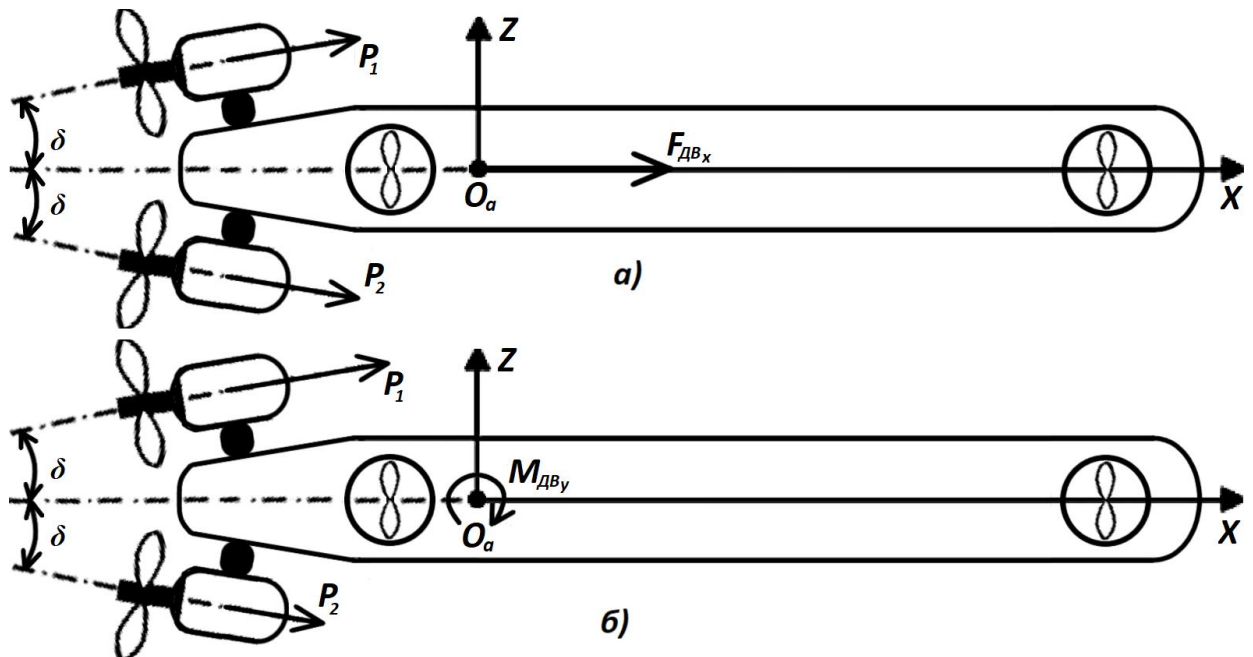


Рисунок 10 – Компоновка и упоры движителей АНПА:

а) – при движении по маршру; б) – при повороте по курсу

Для управления глубиной оба вертикальных движителя создают вертикальные одинаковые и сонаправленные упоры, а поворот аппарата по дифференту осуществляется за счёт формирования разности упоров носового и кормового вертикальных движителей.

Фактически, пара маршевых и пара вертикальных движителей создают направленные вектора тяги в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно, модуль которых можно изменять за счет изменения величины упоров движителей, направление – за счет разности упоров движителей.

Для синтеза системы управления движением аппарата будем использовать упрощённую математическую модель движителя, представляющую собой апериодическое звено первого порядка и описываемую дифференциальным уравнением динамики с постоянными коэффициентами [10]:

$$T_{дв} \frac{dP_i}{dt} + P_i = K_{дв} U_i, \quad (2.1)$$

где  $U_i$  – управляющее напряжение, подаваемое на  $i$ -ый электродвигатель;

$T_{дв}$  – постоянная времени движителя;

$K_{\text{дв}}$  – коэффициент усиления движителя;

$P_i$  – упор  $i$ -го движителя.

На рисунке 11 представлена структурная схема математической модели одного движителя, составленная на основе дифференциального уравнения (2.1).

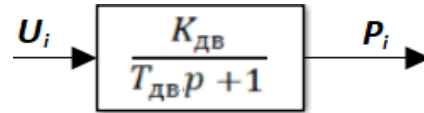


Рисунок 11 – Структурная схема математической модели движителя

В сепаратных каналах управления движением АНПА формируются значения задающих сигналов для всего ДРК в целом, которые поступают в БФС ДРК. Блок формирования сигналов движителей распределяет эти сигналы и формирует управляющие напряжения ( $U_i$ ) для каждого движителя.

Так как каждый движитель используется для управления двумя пространственными координатами (марш, курс), необходимо одновременно обеспечить требуемые значения упора по маршу и управляющего момента по курсу с помощью двух маршевых движителей. Для гарантированной отработки сигналов управления необходимо предотвратить вход движителей в насыщение. Для этого наложим ограничение на максимальную долю упора движителя, которая может быть использована по одному каналу управления. Например, отведём 30% упора движителя на поддержание требуемого значения маршевой скорости движения АНПА, а 70% - на управление аппаратом по углу курса.

Рассмотрим формирование управляющих воздействий на аппарат в горизонтальной плоскости для пары маршевых движителей, регулирующих скорость движения АНПА по маршу и его курс. На вход БФС ДРК в соответствии с принятым законом управления поступают задающие сигналы по маршевой скорости ( $U_{v_x}$ ) и углу курса ( $U_{\omega_y}$ ).

На выходе модели ДРК по каналу марша в соответствии с заданной скоростью движения формируется результирующая сила, действующая на аппарат по оси  $O_a X - F_{\text{дв}_x}$ , преодолевающая сопротивление вязкой среды:

$$F_{\text{дв}_x} = (P_1 + P_2) \cdot \cos \delta, \quad (2.2)$$

где  $\delta$  – угол наклона движителя относительно продольной оси аппарата.

На выходе модели ДРК по каналу курса формируется управляющий момент, действующий на аппарат относительно оси  $O_a Y$  –  $M_{ДВ_y}$ :

$$M_{ДВ_y} = (P_1 - P_2) \cdot l / \cos \delta, \quad (2.3)$$

где  $l$  – плечо приложения упоров  $P_i$ .

Математическая модель динамики маршевого движительно-рулевого комплекса с БФС ДРК, описывается уравнениями (2.1), (2.2) и (2.3), её структурная схема представлена на рисунке 12:

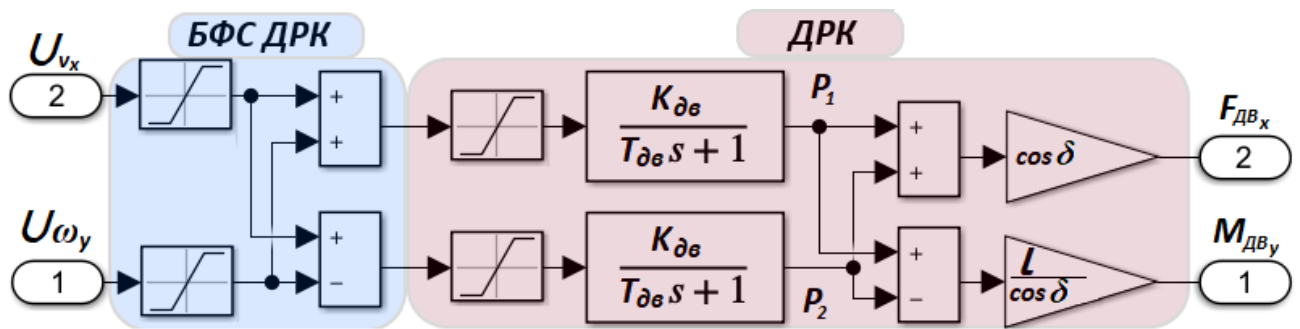


Рисунок 12 – Структурная схема модели динамики маршевого движительно-рулевого комплекса с БФС ДРК

Следовательно, передаточные функции ДРК с учётом БФС ДРК по маршевой скорости ( $W_{ДВ_x}(p)$ ) и курсу ( $W_{ДВ_\psi}(p)$ ) принимают вид:

$$W_{ДВ_x}(p) = \frac{F_{ДВ_x}(p)}{U_{v_x}(p)} = \frac{K_{ДВ_x}}{T_{ДВ}p + 1},$$

где  $K_{ДВ_x} = 2K_{ДВ} \cdot \cos \delta$ .

$$W_{ДВ_\psi}(p) = \frac{M_{ДВ_y}(p)}{U_\psi(p)} = \frac{K_{ДВ_\psi}}{T_{ДВ}p + 1},$$

где  $K_{ДВ_\psi} = 2K_{ДВ} \cdot l / \cos \delta$ .

## 2.2 Математическая модель движения АНПА в горизонтальной плоскости

Динамика пространственного движения такого сложного объекта как АНПА определяется динамикой и компоновкой ДРК и характеристиками конкретного аппарата, инерционностью и вязкостью жидкости, силой взаимодействия корпуса с вязкой средой, наличием перекрёстных связей между степенями свободы, а также структурой и характером внешних возмущений. В общем случае математическая модель динамики подводного аппарата имеет вид нелинейной многомерной системы дифференциальных уравнений с переменными параметрами для действующих сил и моментов в связанной системе координат [9, 11]:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11})\dot{v}_x = F_{\Sigma x} + f_x(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ (m + \lambda_{22})\dot{v}_y = F_{\Sigma y} + f_y(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ (m + \lambda_{33})\dot{v}_z = F_{\Sigma z} + f_z(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ (J_x + \lambda_{44})\dot{\omega}_x = M_{\Sigma x} + \mu_x(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ (J_y + \lambda_{55})\dot{\omega}_y = M_{\Sigma y} + \mu_y(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \\ (J_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z = M_{\Sigma z} + \mu_z(V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z), \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $m$  – масса аппарата;

$\lambda_{11}, \lambda_{22} \dots \lambda_{66}$  – присоединённые массы и моменты инерции воды;

$J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции аппарата относительно осей  $O_aX$ ,  $O_aY$  и  $O_aZ$ ;

$v_x, v_y, v_z$  – скорость аппарата по маршруту, лагу, глубине;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – угловая скорость аппарата относительно осей  $O_aX$ ,  $O_aY$  и  $O_aZ$ ;

$F_{\Sigma x}, F_{\Sigma y}, F_{\Sigma z}, M_{\Sigma x}, M_{\Sigma y}, M_{\Sigma z}$  – суммарные силы и моменты приложенные к аппарату, которые учитывают воздействие среды (гидродинамические силы и моменты), тягу и моменты, создаваемые ДРК, силы и моменты от избыточной плавучести, моменты и силы Архимеда, а также собственную остойчивость аппарата, относительно осей  $O_aX$ ,  $O_aY$  и  $O_aZ$ ;

$f_x, f_y, f_z, \mu_x, \mu_y, \mu_z$  – обобщённые функции, описывающие перекрёстные связи между степенями свободы аппарата.



Таким образом, каждое уравнение системы (2.4) описывает движение АНПА в вязкой среде как свободного твёрдого тела по одной из шести степеней свободы, но с учётом взаимовлияния со стороны остальных пяти степеней свободы.

Указанная модель (2.4) слишком сложна для непосредственного использования в процессе синтеза и не позволяет получить легко реализуемые регуляторы. Поэтому для упрощения процедуры синтеза произведём декомпозицию системы дифференциальных уравнений (2.4) на шесть сепаратных подсистем, которые соответствуют движению по отдельным степеням свободы аппарата. Система управления движением подводного аппарата синтезируется как совокупность отдельных подсистем управления каждой степенью свободы [12].

Часто на этапе проектирования прибегают к упрощению математических моделей элементов, входящих в систему управления, исключению из рассмотрения некоторых параметров и соотношений. Этот приём позволяет привлечь хорошо разработанный математический аппарат и получить при принятых допущениях решения, которые можно использовать как базовые для реализации следующих этапов проектирования системы управления [9, 11].

В данной работе движение АНПА в вертикальной плоскости не рассматривается, и будем рассматривать движение аппарата только в горизонтальной плоскости. Для целей моделирования и синтеза СУ будем рассматривать упрощённую математическую модель движения аппарата в горизонтальной плоскости без учёта перекрёстных связей каналов управления. Для этого примем допущение о малости углов крена и дифферента. В связанной системе координат  $O_aXYZ$  (см. рис.2) с учётом компоновки ДРК, позволяющей управлять движением аппарата в горизонтальной плоскости только по маршруту и курсу, она описывается дифференциальными уравнениями [9, 11]:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11})\dot{v}_x = F_{ДВx} - F_{Вx} - C_{v_{x1}} v_x |v_x| - C_{v_{x2}} v_x, \\ (J_y + \lambda_{55})\dot{\omega}_y = M_{ДВy} - M_{Вy} - C_{\omega_{y1}} \omega_y |\omega_y| - C_{\omega_{y2}} \omega_y, \\ \omega_y = \dot{\psi} \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $F_{ДВx}$  – суммарный упор двигателей относительно оси  $O_aX$ , приложенный к аппарату;

$F_{Bx}$  – внешнее возмущающее воздействие, действующее на АНПА по оси  $O_aX$ ;

$C_{v_{x1}}$  – квадратичный гидродинамический коэффициент сопротивления движению аппарата вдоль оси  $O_aX$ ;

$C_{v_{x2}}$  – линейный гидродинамический коэффициент сопротивления движению аппарата вдоль оси  $O_aX$ ;

$M_{ДВy}$  – суммарный момент от силы тяги двигателей относительно оси  $O_aY$ , приложенный к аппарату;

$M_{By}$  – внешний возмущающий момент, действующий на АНПА по оси  $O_aY$ ;

$C_{\omega_{y1}}$  – квадратичный гидродинамический коэффициент сопротивления движению аппарата вокруг оси  $O_aY$ ;

$C_{\omega_{y2}}$  – линейный гидродинамический коэффициент сопротивления движению аппарата вокруг оси  $O_aY$ .

По системе уравнений (2.5) составим структурную схему упрощённой нелинейной модели движения подводного аппарата (рис.13). Кинематическими параметрами, определяющими динамику аппарата в горизонтальной плоскости, являются угол курса  $\psi$ , угловая скорость вращения по курсу  $\omega_y$  и маршевая скорость  $v_x$ .

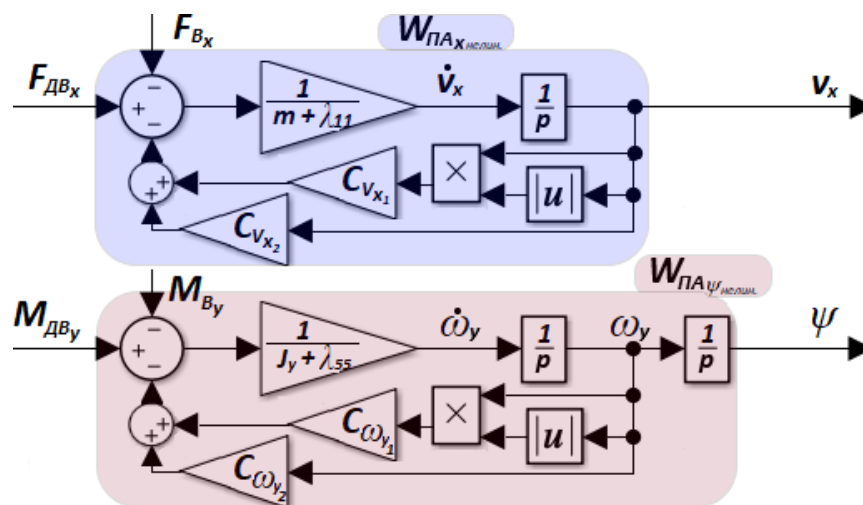


Рисунок 13 – Структурная схема упрощённой нелинейной модели движения аппарата в горизонтальной плоскости

Анализируя структурную схему модели подводного аппарата (см. рис.13), можно сделать следующие выводы:

- модель состоит из двух отдельных обособленных контуров с передаточными функциями  $W_{\text{ПА}_{\chi_{\text{нелин.}}}}$  и  $W_{\text{ПА}_{\psi_{\text{нелин.}}}}$ , следовательно, системы управления для них можно синтезировать независимо друг от друга;
- в модель подводного аппарата входят нелинейные элементы, затрудняющие синтез системы управления движением, их целесообразно линеаризовать.

Определим численные значения параметров упрощённой нелинейной модели движения подводного аппарата, входящих в систему уравнений (2.5).

Момент инерции АНПА относительно оси  $O_a Y$  равен:

$$J_y = \sum_{i=1}^3 J_{yi} ,$$

где  $i$  – номер элемента аппарата.

Для каждого элемента АНПА рассчитаем момент инерции:

$$J_{y1} = \frac{m_1 r_1^2}{2} = 65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{y2} = \frac{m_2 r_2^2}{2} + \frac{m_2 l_2^2}{12} + m_2 a_2^2 = 1,87 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ,$$

$$J_{y3} = \frac{m_3 r_3^2}{2} + \frac{m_3 l_3^2}{12} + m_3 a_3^2 = 0,13 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ,$$

Следовательно, получаем:

$$J_y = J_{y1} + J_{y2} + J_{y3} = 67 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 ,$$

Значение присоединённых масс и моментов инерции воды полностью определяются формой корпуса АНПА. Присоединённые массы и моменты инерции воды в инженерных расчётах определяются следующей формулой [11]:

$$\lambda_{11} = 0,3m \approx 36 \text{ кг}, \lambda_{55} = 0,3 J_y \approx 20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Предварительный расчёт необходимых численных значений гидродинамических коэффициентов  $C_{v_{x_1}}$ ,  $C_{v_{x_2}}$ ,  $C_{\omega_{y_1}}$  и  $C_{\omega_{y_2}}$  выполнен с использованием виртуальной продувки трёхмерной модели исследуемого аппарата в пакете SolidWorks Flow Simulation. Они связывают продольную позиционную составляющую силы гидродинамического сопротивления  $R_x$  и

демпфирующий момент  $M_y$  сил вязкого гидродинамического сопротивления с кинематическими параметрами аппарата - в нашем случае со скоростью аппарата по маршу и скоростью вращения аппарата относительно вертикальной оси  $O_aY$  – нелинейными зависимостями:

$$\begin{cases} R_x = C_{v_{x1}} v_x |v_x| + C_{v_{x2}} v_x \\ M_y = C_{\omega_{y1}} \omega_y |\omega_y| + C_{\omega_{y2}} \omega_y \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $C_{v_{x1}} = 54,7$ ,  $C_{v_{x2}} = 3,9$ ,  $C_{\omega_{y1}} = 766,36$ ,  $C_{\omega_{y2}} = 53,32$ .

Уточнение гидродинамических коэффициентов производится по результатам натурных испытаний.

Для дальнейшего синтеза системы управления необходимо линеаризовать нелинейные звенья модели подводного аппарата, входящие в выражения (2.6).

Линеаризацию нелинейностей проводим разложением в ряд Тейлора [11] выражений для  $R_x$  и  $M_y$  и отбрасыванием элементов второго и более порядка малости:

$$\begin{cases} R_x = (2C_{v_{x1}} v_{x0} + C_{v_{x2}}) v_x \\ M_y = (2C_{\omega_{y1}} \omega_{y0} + C_{\omega_{y2}}) \omega_y \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $v_{x0}$  и  $\omega_{y0}$  – параметры линеаризации – скорость движения аппарата по маршу и угловая скорость вращения по курсу, в окрестности которых производится линеаризация.

Структурная схема упрощённой линеаризованной модели движения подводного аппарата в горизонтальной плоскости приведена на рисунке 14:

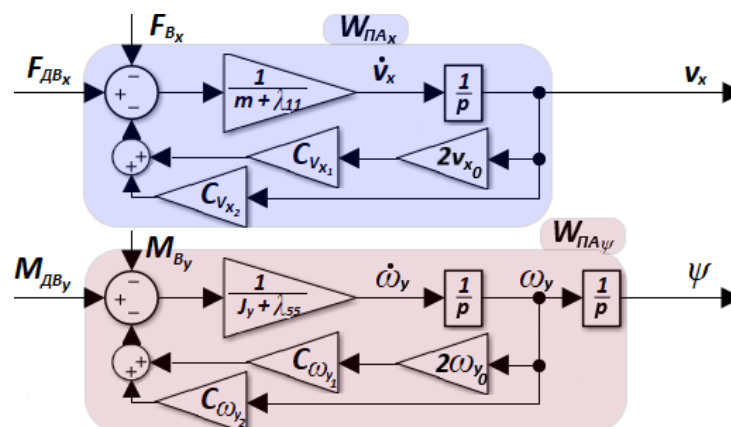


Рисунок 14 – Упрощённая линеаризованная модель движения подводного аппарата в горизонтальной плоскости

Следовательно, передаточные функции АНПА по маршевой скорости ( $W_{\text{ПА}x}(p)$ ) и курсу ( $W_{\text{ПА}\psi}(p)$ ) принимают вид:

$$W_{\text{ПА}v_x}(p) = \frac{v_x(p)}{F_{\text{ДВ}x}(p)} = \frac{1}{(m+\lambda_{11})p + 2C_{v_{x1}}v_{x0} + C_{v_{x2}}} = \frac{K_{\text{ПА}v_x}}{T_{\text{ПА}v_x}p + 1},$$

$$\text{где } T_{\text{ПА}v_x} = \frac{m+\lambda_{11}}{2C_{v_{x1}}v_{x0} + C_{v_{x2}}}, \quad K_{\text{ПА}v_x} = \frac{1}{2C_{v_{x1}}v_{x0} + C_{v_{x2}}}. \quad (2.8)$$

$$W_{\text{ПА}\omega_y}(p) = \frac{\omega_y(p)}{M_{\text{ДВ}y}(p)} = \frac{1}{(J_y+\lambda_{55})p + 2C_{\omega_{y1}}\omega_{y0} + C_{\omega_{y2}}} = \frac{K_{\text{ПА}\psi}}{T_{\text{ПА}\psi}p + 1}, \quad (2.9)$$

$$W_{\text{ПА}\psi}(p) = \frac{\psi(p)}{M_{\text{ДВ}y}(p)} = \frac{1}{\left((J_y+\lambda_{55})p + 2C_{\omega_{y1}}\omega_{y0} + C_{\omega_{y2}}\right)p} = \frac{K_{\text{ПА}\psi}}{\left(T_{\text{ПА}\psi}p + 1\right)p},$$

$$\text{Где } T_{\text{ПА}\psi} = \frac{J_y+\lambda_{55}}{2C_{\omega_{y1}}\omega_{y0} + C_{\omega_{y2}}}, \quad K_{\text{ПА}\psi} = \frac{1}{2C_{\omega_{y1}}\omega_{y0} + C_{\omega_{y2}}}.$$

С учётом характеристик АНПА получаем максимальные значения маршевой скорости и угловой скорости поворота аппарата по курсу:  $v_{x_{\max}} = 2,6 \text{ м/с}$ ,  $\omega_{y_{\max}} = 0,84 \text{ рад/с}$ .

Рассчитанные параметры упрощённой математической модели движения АНПА «Исследователь» в горизонтальной плоскости сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры упрощённой математической модели АНПА

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$m$ , кг	120	$C_{v_{x1}}$	54,7
$J_y$ , кг · м <sup>2</sup>	67	$C_{v_{x2}}$	3,9
$\lambda_{11}$ , кг	36	$C_{\omega_{y1}}$	766,36
$\lambda_{55}$ , кг · м <sup>2</sup>	20	$C_{\omega_{y2}}$	53,32
$v_{x_{\max}}$ , м/с	2,6	$\omega_{y_{\max}}$ , рад/с	0,84

Для дальнейшего синтеза системы управления необходимо определить наихудший с точки зрения устойчивости случай движения подводного аппарата.

Наихудший с точки зрения устойчивости случай –  $\omega_{y0} = 0$  – нахождение аппарата на «стопе». Для того, чтобы подтвердить данное утверждение, построим в среде MATLAB логарифмическую амплитудно-фазо-частотную

характеристику передаточной функции подводного аппарата по углу курса  $W_{\text{ПА}\omega_y}(p)$  с нулевым и максимальным параметром линейаризации  $\omega_{y_0}$  (рис.15).

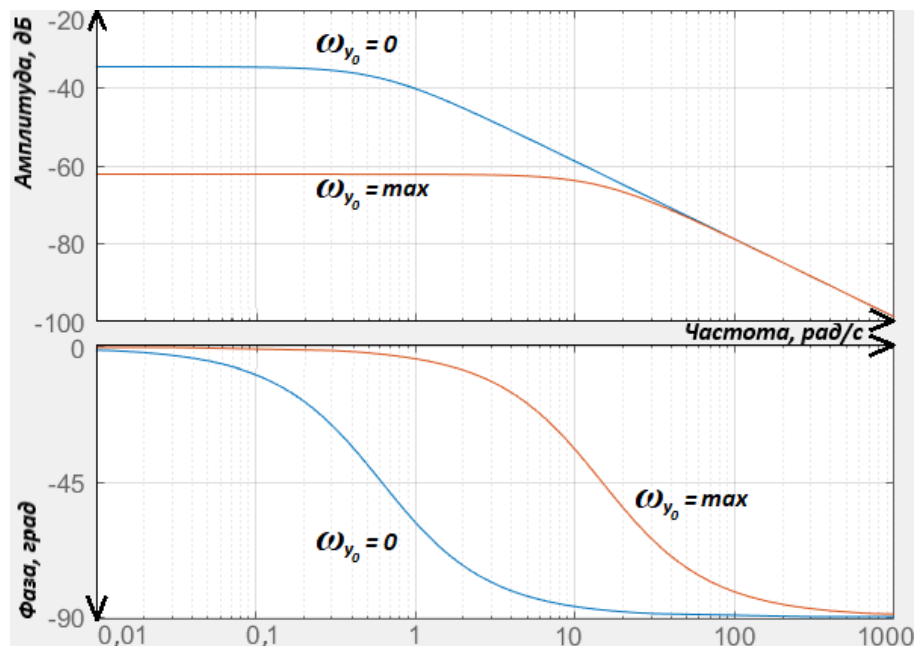


Рисунок 15 – ЛАФЧХ передаточной функции  $W_{\text{ПА}\omega_y}(p)$  для  $\omega_{y_0} = 0$  ,  $\text{max}$

Учитывая приведенные на рисунке 15 графики, можно сделать следующие заключения:

- на высоких частотах ЛАЧХ почти совпадают;
- при увеличении  $\omega_{y_0}$  ЛФЧХ сдвигаются вверх, а ЛАЧХ – вниз.

Таким образом, ЛАЧХ для случая  $\omega_{y_0} = \text{max}$  всегда ниже, чем для  $\omega_{y_0} = 0$  однако ЛФЧХ для  $\omega_{y_0} = \text{max}$  всегда выше, чем ЛФЧХ для  $\omega_{y_0} = 0$ . Это означает, что при  $\omega_{y_0} = \text{max}$  система будет заведомо более устойчивой, чем при  $\omega_{y_0} = 0$  следовательно, можно выделить наихудший с точки зрения устойчивости случай, соответствующий  $\omega_{y_0} = 0$ . Отметим, что передаточная функция  $W_{\text{ПА}v_x}(p)$  будет иметь полностью аналогичные свойства, для неё наихудший с точки зрения устойчивости случай также будет наблюдаться при нулевой маршевой скорости движения АНПА.

В дальнейшем при синтезе системы управления в качестве параметров линейаризации будем использовать  $v_{x_0} = 0$  ,  $\omega_{y_0} = 0$ .

Тогда математическая модель динамики АНПА в горизонтальной плоскости описывается уравнениями (2.1)...(2.3), (2.5), и (2.7).

## 2.3 Выводы по разделу 2

В данном разделе на основе выбранного подхода к синтезу системы управления движения исследуемого аппарата и с использованием метода декомпозиции нелинейной математической модели динамики подводного аппарата на сепаратные подсистемы, соответствующие движению по отдельным степеням свободы, выполнена следующая работа:

1. Разработана математическая модель динамики ДРК.
2. Разработана упрощённая нелинейная модель движения подводного аппарата в горизонтальной плоскости.
3. Рассчитаны параметры упрощённой математической модели.
4. Произведена линеаризация нелинейной модели подводного аппарата, в качестве параметра линеаризации выбран наихудший сточки зрения устойчивости случай.

### 3 Система управления движением АНПА в горизонтальной плоскости

Систему управления движением АНПА в горизонтальной плоскости будем строить с использованием линейных регуляторов, для которых в настоящее время существуют разные методики синтеза, достаточно простые в реализации. Необходимо учитывать, что в этом случае инженерные расчёты ведутся с использованием некоторых номинальных значений параметров математической модели АНПА. Для снижения чувствительности линейной системы управления к изменению параметров подводного аппарата в систему управления движением вводятся дополнительные внутренние обратные связи по производным [8], [10].

Рассмотрим два варианта синтеза регуляторов для исследуемых сепаратных каналов системы управления движением в горизонтальной плоскости:

- синтез системы управления движением по каналам маршевой скорости и курса с использованием классических ПИД-регуляторов;
- синтез системы управления движением с использованием пропорциональных регуляторов в контурах маршевой скорости, угла курса и угловой скорости по курсу.

Затем по результатам моделирования синтезированных регуляторов системы управления движением и анализа полученных результатов будет сделан вывод о целесообразности применения выбранных корректирующих устройств для выполнения поставленной задачи.



### 3.1 Синтез системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости с использованием ПИД-регуляторов

Систему управления движением по каналам маршевой скорости и курса будем строить путём настройки ПИД-регуляторов в качестве последовательных корректирующих устройств (рис.16).

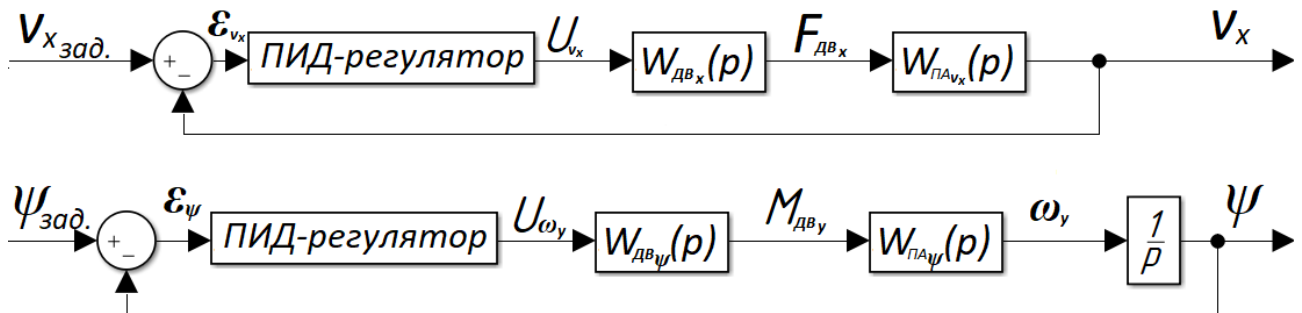


Рисунок 16 – Структурная схема системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости

Известно, что ПИД-регулятор – это наиболее распространённая структура регулятора в системе управления углом курса [14]. Он вырабатывает выходной сигнал, который является суммой трёх составляющих: пропорционального регулирования, регулирования по интегралу и регулирования по производной. Первая часть пропорциональна ошибке, поступающей на вход ПИД-регулятора, вторая – интегралу по времени ошибки, а третья часть – производной ошибки.

На ПИД-регуляторах основаны многие системы автоматического управления. Анализ и синтез этих регуляторов производится на основе классической теории систем автоматического управления, что делает их простыми для применения. Однако, у ПИД-регуляторов существует ряд существенных недостатков [14]:

- линейность и, вследствие этого, возможное снижение эффективности ПИД-регуляторов при нелинейных режимах движения АНПА;
- малое количество параметров, которые настраиваются вручную, в связи с чем отсутствует возможность адаптивной настройки регулятора;
- чувствительность к точности измерений параметров объекта управления.

В качестве регуляторов для каналов маршевой скорости и угла курса использовались ПИД-регуляторы с передаточными функциями вида:

$$W_{\text{ПИД}}(p) = P + \frac{I}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + \frac{N}{s}}$$

Параметры для каждого канала управления АНПА принимают следующие значения:

- канал управления маршевой скоростью:  $P = 2,5$  ,  $I = 0,52$  ,  $D = 2,7$  ,  $N = 32$ ;
- канал управления углом курса:  $P = 6,3$  ,  $I = 0,45$  ,  $D = 11$  ,  $N = 1074$ .

Значения параметров ПИД-регуляторов были рассчитаны с помощью инструмента «PID Tuner» (рис.17) пакета MATLAB Simulink, который позволяет производить автоматическую настройку параметров ПИД-регулятора в Simulink-модели по заданному времени переходного процесса.

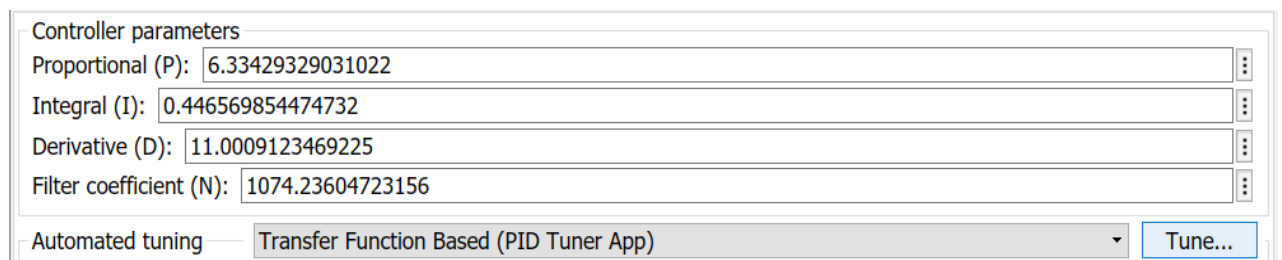


Рисунок 17 – Окно инструмента «PID Tuner» в пакете MATLAB Simulink

Количественные оценки качества регулирования определяются по кривой переходного процесса. Результаты моделирования каналов управления маршевой скоростью и углом курса с настроенными ПИД-регуляторами при ступенчатом входном воздействии  $v_x = 1$  м/с и  $\psi = 1^\circ$  приведены на рисунке 18.

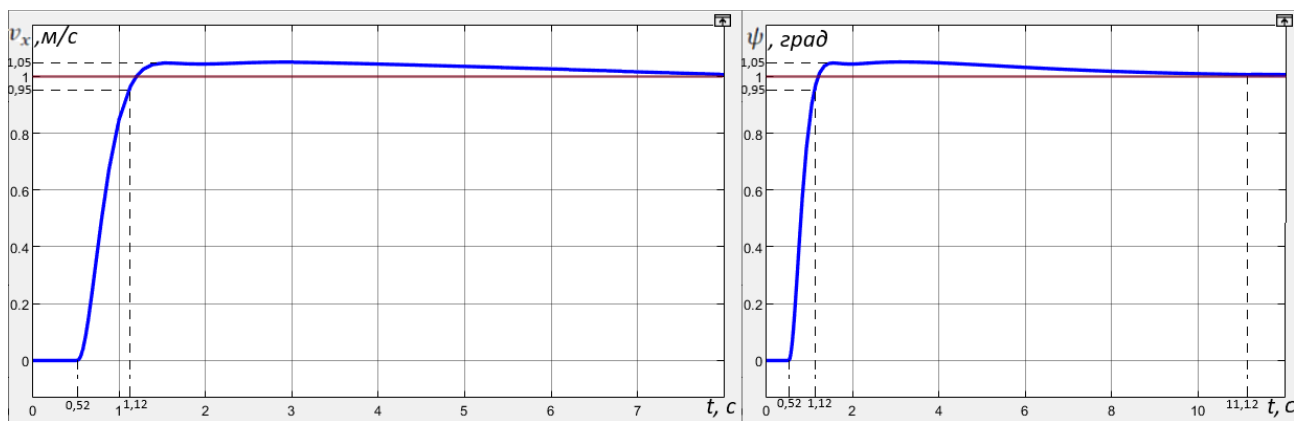


Рисунок 18 – Переходные процессы в каналах управления маршевой скоростью и углом курса с настроенными ПИД-регуляторами

Время переходного процесса и перерегулирование соответствуют техническому заданию, но имеется «дотягивание» до заданного значения, которое равно  $t_1 = 6,88$  с и  $t_2 = 10$  с для контуров маршевой скорости и угла курса соответственно.

Результат моделирования канала управления углом курса с настроенным ПИД-регулятором при синусоидальном входном воздействии  $\psi = 360^\circ \cdot \sin(0,1t)$  приведён на рисунке 19.

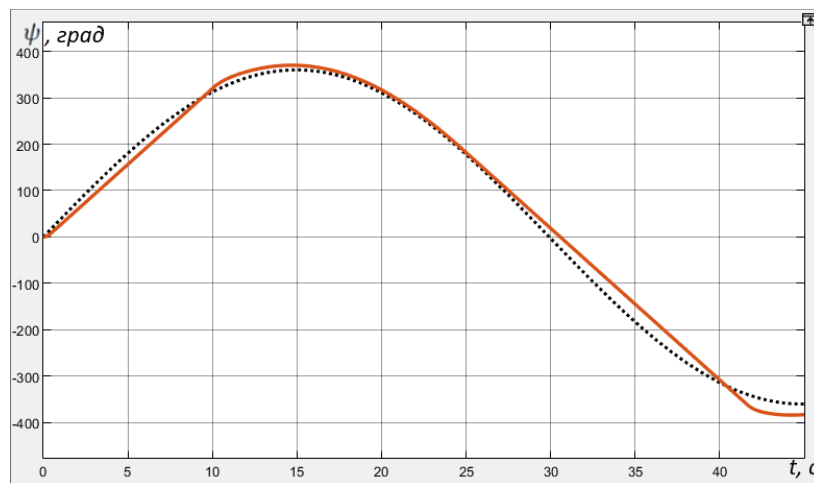


Рисунок 19 – Переходный процесс в канале управления углом курса с настроенным ПИД-регулятором

Перерегулирование соответствует техническому заданию, но присутствует значительная динамическая ошибка из-за «дотягивания» до заданного значения.

### 3.2 Синтез системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости с использованием пропорциональных регуляторов

В канале управления маршевой скоростью сформируем отрицательную обратную связь по скорости и введём пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления  $k$ . Закон управления маршевой скоростью:

$$U_{v_x}(p) = k(v_{x\text{зад.}} - v_x)$$

В канале управления углом курса выделим контур угловой скорости и контур углового положения подводного аппарата. В контуре углового положения введём пропорциональный регулятор с коэффициентом  $k_1$  и сформируем главную обратную связь. В контуре угловой скорости введём обратную связь по производной с коэффициентом усиления  $k_2$  (рис.19). Закон управления курсом:

$$U_{\psi}(p) = k_1(\psi_{\text{зад.}} - \psi) - k_2\omega_y$$

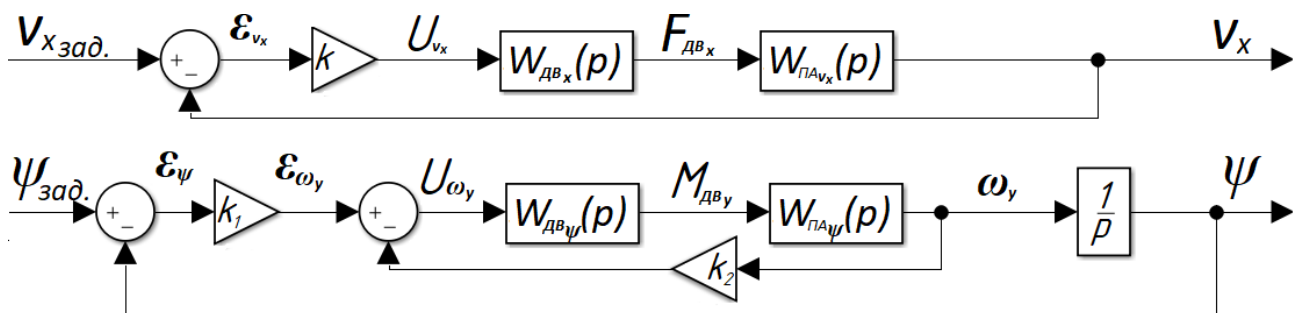


Рисунок 19 – Структурная схема системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости

$k$  – регулятор системы управления в контуре маршевой скорости;

$k_1$  – регулятор системы управления в контуре положения по курсу;

$k_2$  – регулятор системы управления в контуре угловой скорости по курсу;

Обратная связь по угловой скорости по курсу вводится в качестве вспомогательного средства, так как учитывает тенденцию к росту или уменьшению ошибки. Это приводит к улучшению динамических свойств системы управления, так как увеличивается скорость реакции системы управления на возникающее рассогласование заданного и текущего значения угла курса.

### 3.2.1 Синтез канала управления углом курса

Синтез коэффициента контура угловой скорости  $k_2$  будем проводить методом стандартных характеристических полиномов, а коэффициента контура положения  $k_1$  – с помощью частотного метода.

Проведём синтез регуляторов  $k_1$  и  $k_2$  для канала управления углом курса.

Для синтеза коэффициента  $k_2$  необходимо получить передаточную функцию контура угловой скорости по курсу ( $W_{\omega_y}(p)$ ), она представляет собой колебательное звено второго порядка:

$$W_{\omega_y}(p) = \frac{\omega_y(p)}{\varepsilon_{\omega_y}(p)} = \frac{W_{дв\psi}(p)W_{ПА\psi}(p)}{1 + k_2 k_c W_{дв\psi}(p)W_{ПА\psi}(p)} =$$

$$= \frac{K_{дв\psi} K_{ПА\psi}}{T_{дв} T_{ПА\psi} p^2 + (T_{дв} + T_{ПА\psi}) p + 1 + k_2 k_c K_{дв\psi} K_{ПА\psi}} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}^2 p^2 + 2\xi T_{\omega} p + 1}.$$

где:  $K_{\omega} = \frac{K_{дв\psi} K_{ПА\psi}}{1 + k_2 k_c K_{дв\psi} K_{ПА\psi}},$  (3.1)

$$T_{\omega} = \sqrt{\frac{T_{дв} T_{ПА\psi}}{1 + k_2 k_c K_{дв\psi} K_{ПА\psi}}}, \quad (3.2)$$

$$\xi = \frac{T_{дв} + T_{ПА\psi}}{2 \sqrt{T_{дв} T_{ПА\psi} (1 + k_2 k_c K_{дв\psi} K_{ПА\psi})}}, \quad (3.3)$$

$$k_2 = \frac{(T_{дв} + T_{ПА\psi})^2 - 4 T_{дв} T_{ПА\psi} \xi^2}{4 T_{дв} T_{ПА\psi} \xi^2 k_c K_{дв\psi} K_{ПА\psi}}. \quad (3.4)$$

Учитывая, что для колебательного звена 2го порядка при заданном перерегулировании  $\sigma$  не более 5% наименьшее время переходного процесса обеспечивается при значении коэффициента демпфирования  $\xi = 0,707$ , произведём расчёт коэффициента  $k_2$  по формуле (3.4). Получаем:  $k_2 = 3,8 \frac{с \cdot В}{рад}$ .

Определим параметры передаточной функции  $W_{\omega_y}(p)$  для минимального и максимального значений параметра линеаризации  $\omega_{y_0}$ .

Для  $\omega_{y_0} = 0$  получаем  $\xi = 0,707, K_{\omega} = 0,0334, T_{\omega} = 0,62 с$ .

Для  $\omega_{y_0} = тах$  получаем  $\xi = 0,68, K_{\omega} = 0,0301, T_{\omega} = 0,54 с$ .

Отличия значений  $K_\omega$ ,  $T_\omega$  и  $\xi_\omega$  для минимального и максимального значения  $\omega_{y_0}$  невелики, колебательность системы для  $\omega_{y_0} = \max$  меньше, следовательно, при движении АНПА с ненулевой угловой скоростью устойчивость системы управления будет выше чем при  $\omega_{y_0} = 0$ . Перейдём к синтезу коэффициента  $k_1$ .

Синтез коэффициента  $k_1$  в контуре положения проводится методом, основанным на использовании частотных критериев качества [13].

Получим передаточную функцию контура положения (см рис.19):

$$W_\psi(p) = \frac{\psi(p)}{\psi_{\text{зад.}}(p)} = k_1 W_{\omega_y}(p) \frac{1}{p} k_c = \frac{K_\Omega}{p(T_\omega^2 p^2 + 2\xi T_\omega p + 1)},$$

где  $K_\Omega = k_1 k_c K_\omega$  – добротность системы управления.

ЛАЧХ для передаточной функции  $W_\psi(p)$  имеет вид «1-2-3». Для ЛАЧХ такого вида в [13] приведены зависимости перерегулирования от показателя колебательности  $M$ . Для требуемого перерегулирования  $\sigma \leq 5\%$  значение показателя колебательности  $M = 1,03$ . Следовательно:

$$K_\Omega 2T_\omega \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{2}, \quad k_1 \leq \frac{M^2 + M\sqrt{M^2 - 1}}{4T_\omega k_c K_\omega}, \quad k_1 \leq 11 \frac{\text{В}}{\text{град}}.$$

По результатам моделирования выбираем  $k_1 = 10 \frac{\text{В}}{\text{град}}$ .

Графики переходного процесса для линеаризованной модели канала управления углом курса при ступенчатом входном воздействии для малого угла  $\psi = 1^\circ$  и для большого угла  $\psi = 90^\circ$  приведены на рисунке 21.

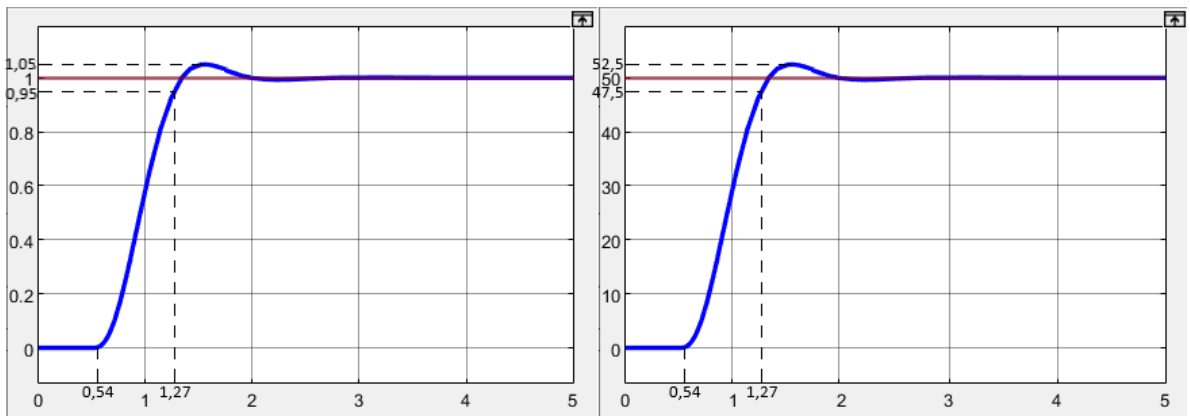


Рисунок 21 – Переходные процессы в канале управления углом курса для линеаризованной модели: а) – малый угол; б) – большой угол

В результате для линеаризованной модели для малого угла  $\psi = 1^\circ$  получаем  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 0,73$  с, для  $\psi = 50^\circ$  получаем  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 0,73$  с, что соответствует требованиям технического задания на курсовой проект, следовательно, можно сделать вывод о правильности синтеза регуляторов канала управления углом курса.

Результат моделирования канала управления углом курса с пропорциональными регуляторами при синусоидальном входном воздействии  $\psi = 360^\circ \cdot \sin(0,1t)$  приведён на рисунке 22.

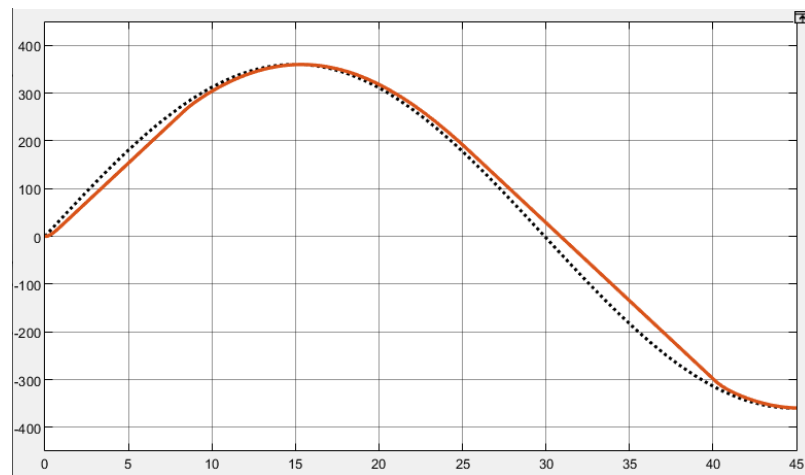


Рисунок 22 – Переходный процесс в канале управления углом курса с пропорциональными регуляторами

Перерегулирование соответствует техническому заданию, но присутствует динамическая ошибка.

В установившемся режиме работы системы управления основными показателями качества являются статические ошибки по задающему сигналу и внешнему возмущению.

Для устранения данных ошибок введём в структурную схему канала управления углом курса последовательно с регулятором  $k_1$  регулятор  $W_1(p)$ . Для определения вида регулятора будем рассматривать только влияние внешнего возмущающего момента. Получим передаточную функцию по возмущающему моменту при  $\psi_{\text{зад.}} = 0^\circ$  (рис.23).

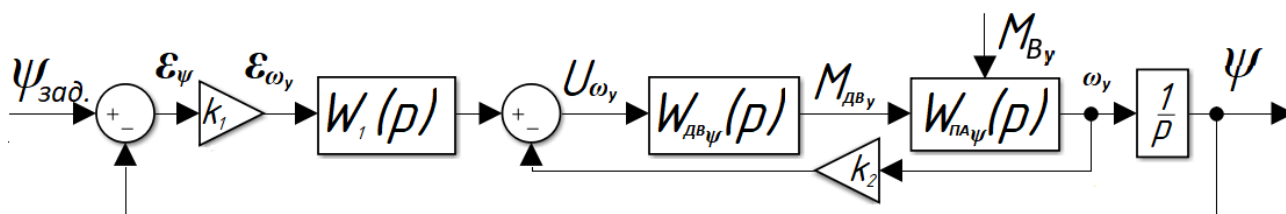


Рисунок 23 – Структурная схема канала управления курсом с ПИ–регулятором

$$W_{M_{By}}(p) = \frac{\psi(p)}{M_{By}(p)} = \frac{K_{пa\psi}(T_{дв}p + 1)}{T_{пa\psi}T_{дв}p^3 + (T_{пa\psi}T_{дв})p^2 + (K_{пa\psi}K_{дв\psi}k_2k_c + 1)p + (K_{пa\psi}K_{дв\psi}k_1k_cW_1(p))}.$$

Как видим, система не обладает астатизмом по внешнему возмущающему моменту.

Необходимо, чтобы регулятор  $W_1(p)$ :

- 1) повышал порядок астатизма системы;
- 2) сохранял -1 наклон ЛАЧХ в районе частоты среза;
- 3) не вносил большие фазовые сдвиги в районе частоты среза.

Всем этим условиям удовлетворяет пропорционально-интегрирующий ПИ-регулятор (изодромное звено), представленный на рисунке 24 с передаточной функцией:

$$W_1(p) = \frac{1}{T} \frac{Tp + 1}{p},$$

где  $T$  – постоянная времени ПИ-регулятора.

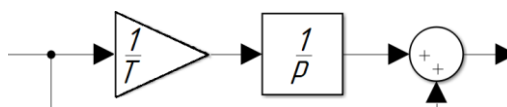


Рисунок 24 – Структурная схема ПИ–регулятора

В этом случае управляющее воздействие на выходе регулятора содержит две составляющие: пропорциональную величине ошибки и пропорциональную интегралу от ошибки.

Постоянная времени  $T$  выбирается исходя из следующих условий:

- 1)  $T$  должна быть малой для уменьшения «дотягивания»;
- 2) перерегулирование  $\sigma \leq 5\%$ .



С учётом данных требований выбираем  $T=2,5$ с.

Если ошибка управления длительное время сохраняет знак, величина интегральной составляющей ПИ-регулятора становится очень большой. Так как интегральная часть становится равной нулю лишь некоторое время спустя после того, как значение ошибки изменило знак, то это может привести к большому перерегулированию. Для уменьшения перерегулирования необходимо в интегратор ввести ограничение в виде нелинейности насыщения. Величина этого ограничения равна значению напряжения насыщения двигателей [29, 30].

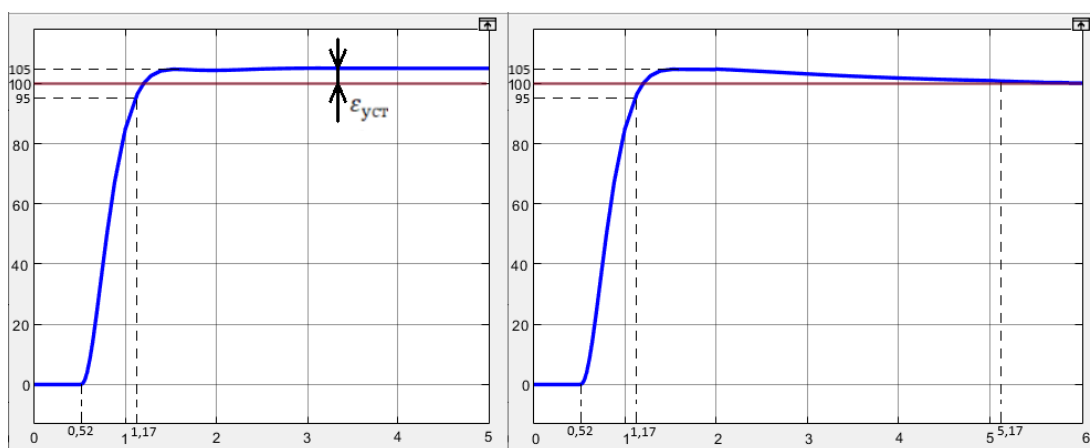


Рисунок 25 – Переходные процессы в канале управления углом курса при наличии внешнего возмущающего момента а) без ПИ-регулятора, б) с ПИ-регулятором

В системе без ПИ-регулятора присутствует статическая ошибка  $\varepsilon_{уст} = 5,1^0$  вызванная влиянием внешнего возмущающего момента. Введение в систему ПИ-регулятора позволяет устранить статическую ошибку за время  $t = 4$ с.

### 3.2.2 Синтез канала управления маршевой скоростью

Синтез регулятора в канале управления маршевой скоростью проводим методом стандартных характеристических полиномов.

Для синтеза коэффициента  $k$  необходимо получить передаточную функцию контура маршевой скорости (рис.19), она представляет собой колебательное звено второго порядка:

$$** \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} **$$

$$W_{v_x}(p) = \frac{v_x(p)}{\varepsilon_{v_x}(p)} = \frac{W_{дв_x}(p)W_{пав_x}(p)}{1 + kk_c W_{дв_x}(p)W_{пав_x}(p)} =$$

$$= \frac{K_{дв_x} K_{пав_x}}{T_{дв} T_{пав_x} p^2 + (T_{дв} + T_{пав_x}) p + 1 + kk_c K_{дв_x} K_{пав_x}} = \frac{K_\omega}{T_\omega^2 p^2 + 2\xi T_\omega p + 1}.$$

$$\text{где: } K_\omega = \frac{K_{дв_x} K_{пав_x}}{1 + kk_c K_{дв_x} K_{пав_x}} \quad (3.5),$$

$$T_\omega = \sqrt{\frac{T_{дв} T_{пав_x}}{1 + kk_c K_{дв_x} K_{пав_x}}} \quad (3.6),$$

$$\xi = \frac{T_{дв} + T_{пав_x}}{2\sqrt{T_{дв} T_{пав_x} (1 + kk_c K_{дв_x} K_{пав_x})}} \quad (3.7),$$

$$k = \frac{(T_{дв} + T_{пав_x})^2 - 4T_{дв} T_{пав_x} \xi^2}{4T_{дв} T_{пав_x} \xi^2 k_c K_{дв_x} K_{пав_x}} \quad (3.8).$$

Учитывая, что для колебательного звена 2го порядка при заданном перерегулировании  $\sigma$  не более 5% наименьшее время переходного процесса обеспечивается при значении коэффициента демпфирования  $\xi = 0,707$ , произведём расчёт коэффициента  $k_2$  по формуле (3.8). Получаем:  $k = 71,6 \frac{с \cdot В}{град}$ .

Для  $v_{x_0} = 0$  получаем  $\xi = 0,707$ ,  $K_\omega = 0,3$ ,  $T_\omega = 0,213 с$ .

Для  $v_{x_0} = max$  получаем  $\xi = 0,68$ ,  $K_\omega = 0,26$ ,  $T_\omega = 0,19 с$ .

Отличия значений  $K_\omega$ ,  $T_\omega$  и  $\xi_\omega$  невелики, колебательность системы для  $v_{x_0} = max$  меньше, следовательно, при движении АНПА с ненулевой угловой скоростью устойчивость СУ будет выше.

График переходного процесса в линеаризованной модели канала маршевой скорости, построенный в пакете MATLAB Simulink, при ступенчатом входном воздействии  $v_x = 1 м/с$  приведён на рисунке 22.

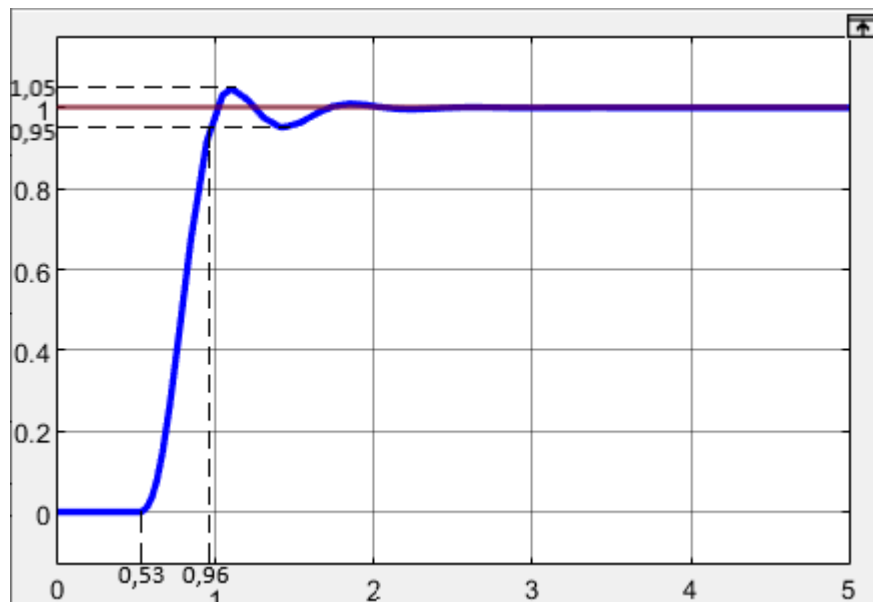


Рисунок 22 – Переходный процесс в канале управления маршевой скоростью

В результате при  $v_x = 1$  м/с получаем  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{пп} = 0,43$  с. Полученный результат удовлетворяет требованиям технического задания.

Таким образом, по результатам моделирования упрощённой линейной модели движения АНПА в горизонтальной плоскости можно сделать вывод, что синтезированные системы управления маршевой скоростью и углом курса удовлетворяют условиям технического задания и обеспечивают требуемые характеристики переходного процесса.

### 3.3 Выводы по разделу 3

В данном разделе проведён синтез системы управления движением в горизонтальной плоскости:

1. С помощью инструмента «PID Tuner» пакета MATLAB Simulink проведён расчёт параметров ПИД-регуляторов в каналах управления маршевой скоростью и курсом. Анализ переходных процессов показал, что время переходного процесса и перерегулирование соответствуют требованиям технического задания, но в обоих каналах имеется эффект «дотягивания» до заданного значения.
2. Проведён расчёт пропорциональных регуляторов в контурах маршевой скорости, угла курса и угловой скорости по курсу. Анализ переходных процессов показал, что характеристики переходных процессов соответствуют требованиям технического задания.
3. Обосновано введение ПИ-регулятора с пределом интегрирования в канал управления углом курса для устранения статических ошибок.
4. Для сравнения полученных ПИД- и пропорциональных регуляторов необходимо провести моделирование на полной нелинейной математической модели системы управления движением.

#### 4 Моделирование и исследование полной нелинейной модели системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости

Полная нелинейная модель системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости отличается от линеаризованной и включает в себя:

- 1) нелинейности ДРК вида «насыщение»;
- 2) нелинейности БФС ДРК вида «насыщение»;
- 3) нелинейную зависимость момента гидродинамических сил от угловой скорости вращения аппарата по курсу (2.6);
- 4) нелинейную зависимость гидродинамических сил сопротивления движению аппарата по маршу (2.6).

Моделирование полной нелинейной системы управления движением аппарата необходимо провести для сравнения полученных ПИД- и пропорциональных регуляторов. Полная нелинейная модель системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости представлена на рисунке 23:

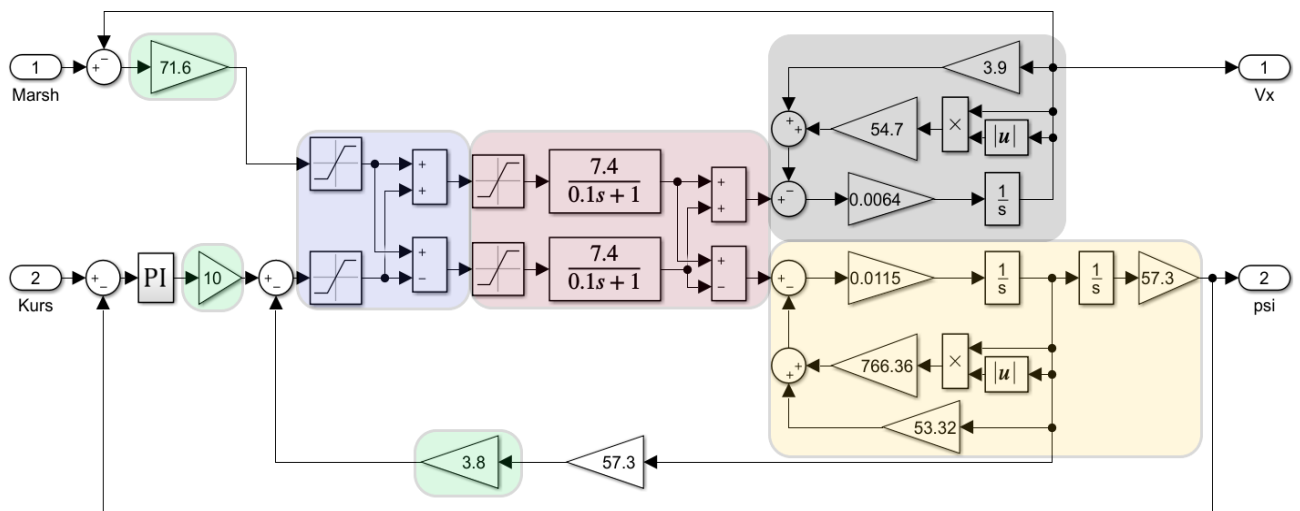


Рисунок 23 – Полная нелинейная модель системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости в пакете MATLAB Simulink

Графики переходного процесса для нелинейной модели канала управления углом курса при ступенчатом входном воздействии для малого угла  $\psi = 1^\circ$  и для большого угла  $\psi = 50^\circ$  приведены на рисунке 24.

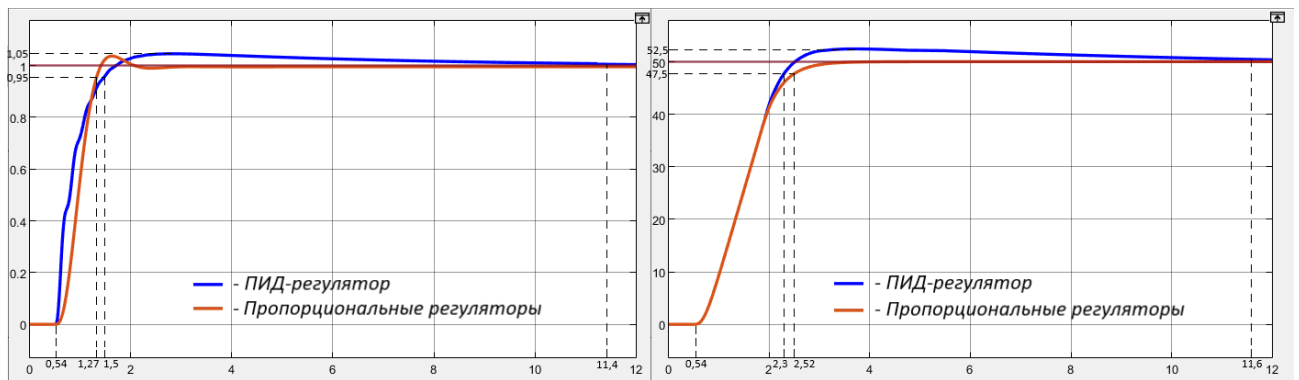


Рисунок 24 – Переходные процессы в канале управления углом курса для нелинейной модели: а) – малый угол; б) – большой угол

В результате для нелинейной модели для малого угла  $\psi = 1^\circ$  получаем  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 0,73$  с для пропорциональных регуляторов и  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 0,96$  с, "дотягивание" = 9,9 с для ПИД-регуляторов. Для большого угла  $\psi = 50^\circ$  получаем  $\sigma = 0\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 1,98$  с, для пропорциональных регуляторов и  $\sigma \leq 5\%$ ,  $t_{\text{пп}} = 1,76$  с, "дотягивание" = 9,3 с для ПИД-регуляторов, что соответствует требованиям технического задания на курсовой проект, следовательно, можно сделать вывод о правильности синтеза регуляторов канала управления углом курса.

По сравнению с линейной моделью время переходного процесса и перерегулирование для малого угла не изменились, а для большого угла время переходного процесса увеличилось с 0,73 с до 1,98 с, а перерегулирование отсутствует.

График переходного процесса для нелинейной модели канала управления маршевой скоростью при ступенчатом входном воздействии  $v_x = 1$  м/с приведён на рисунке 24.

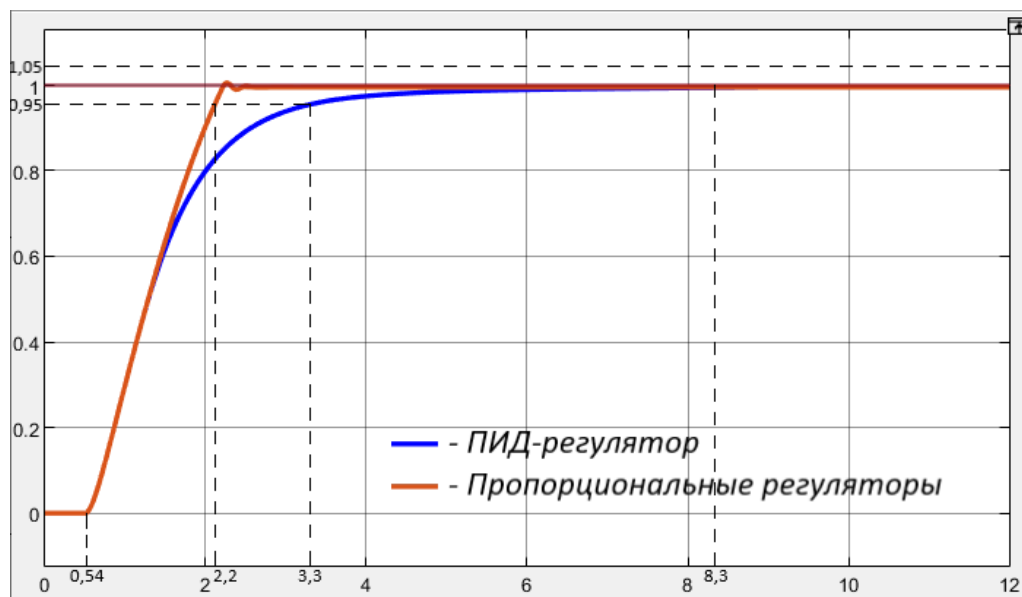


Рисунок 25 – Переходные процессы в канале управления маршевой скоростью для нелинейной модели

В результате для нелинейной модели получаем  $\sigma \leq 1,5\%$ ,  $t_{пп} = 1,66$  с для пропорциональных регуляторов, что соответствует требованиям технического задания на курсовой проект. Для ПИД-регуляторов получаем  $\sigma = 0\%$ ,  $t_{пп} = 2,76$  с, "дотягивание" = 5 с, что соответствует требованиям технического задания на курсовой проект, следовательно, можно сделать вывод о правильности синтеза регуляторов канала управления маршевой скоростью.

По сравнению с линейной моделью время переходного процесса увеличилось с 0,43 с до 1,66 с, а перерегулирование уменьшилось с 5% до 1,5%.

Для имитации тракторного движения АНПА реализована схема, осуществляющая счисление пути, на вход которой подаётся заданный курс АНПА (рис.25), а на выходе формируются текущие координаты аппарата. Построение траектории движения осуществляется блоком XY Graph.

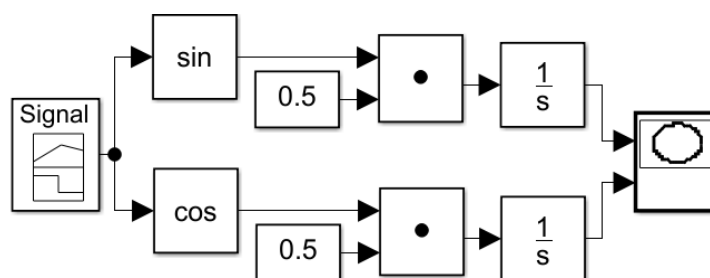


Рисунок 25 – Структурная схема счисления пути в пакете MATLAB Simulink

Сравним точность отработки заданного значения угла курса системами управления с ПИД-регуляторами и с пропорциональными регуляторами при осуществлении типовых пространственных движений в горизонтальной плоскости.

Проведём моделирование движения подводного аппарата по траектории типа «расходящаяся спираль».

Для целей организации движения по траектории, близкой к спиралеобразной, будем считать, что маршевая скорость аппарата  $v = 1$  м/с постоянна, текущий радиус спирали  $R$  увеличивается и длина каждого следующего витка больше предыдущего. Следовательно, время за которое угол курса изменяется от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  постепенно увеличивается, соответственно, угловая скорость  $\omega = v/R$  будет уменьшаться. Движение аппарата по расходящейся спирали можно получить при задании непрерывного изменения угловой скорости по линейному закону [12]. Можно считать, что каждому витку спирали соответствует определённая угловая скорость  $\omega_i$ , зависящая от радиуса  $R$ . Тогда для первого, второго и третьего витков спирали предлагается задавать курс АНПА с помощью следующих выражений:

$$\begin{cases} \psi_{\text{зад.}} = 360^\circ \sin(\omega_1 t) \text{ при } t \in [0 \dots t_1] \text{ с,} \\ \psi_{\text{зад.}} = 360^\circ \sin(\omega_2 t) \text{ при } t \in (t_1 \dots t_2] \text{ с,} \\ \psi_{\text{зад.}} = 360^\circ \sin(\omega_3 t) \text{ при } t \in (t_2 \dots t_3] \text{ с,} \end{cases} \quad (4.2)$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловые скорости движения аппарата по расходящейся спирали;

$t_1, t_2, t_3$  – время в секундах с момента начала движения АНПА по спирали.

Для того, чтобы обеспечить поворот аппарата на заданный угол по минимальному угловому расстоянию в моменты изменения задаваемого курса с  $360^\circ$  до  $0^\circ$  необходимо в контуре курса системы управления движением аппарата (рис.23) формировать ошибку ( $\varepsilon_\psi$ ) (рис.19) следующим образом [10]:

$$\varepsilon_\psi = \begin{cases} \varepsilon_\psi \text{ при } \varepsilon_\psi \in [-180^\circ \dots 180^\circ], \\ \varepsilon_\psi - 360^\circ \text{ при } \varepsilon_\psi > 180^\circ, \\ \varepsilon_\psi + 360^\circ \text{ при } \varepsilon_\psi < -180^\circ. \end{cases} \quad (4.3)$$



Результаты моделирования системы управления движением аппарата в горизонтальной плоскости с использованием ПИД-регуляторов и с использованием пропорциональных регуляторов представлены на рисунках 26 а) и 26 б).

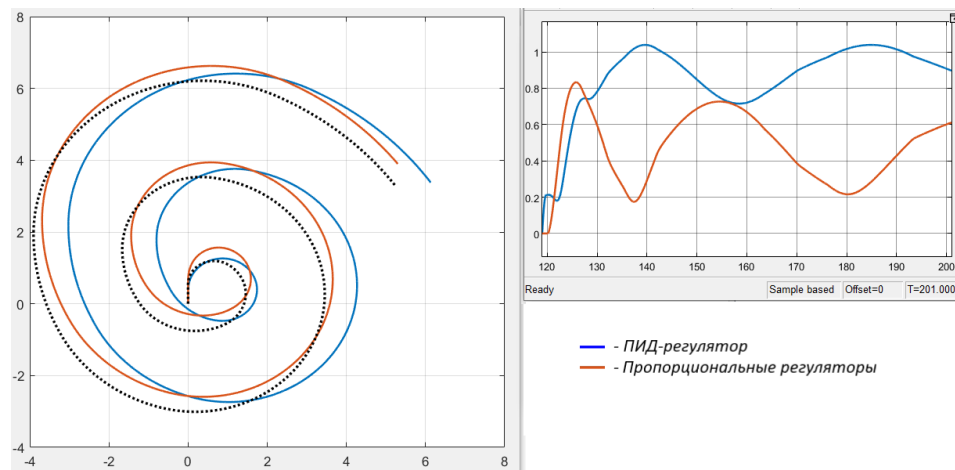


Рисунок 26 – Сравнение траекторий движения аппарата с различными системами управления: а) – траектории движения АНПА; б) – график ошибки, показывающей отклонение траекторий движения от заданной

В результате для нелинейной модели получаем, что максимальное значение ошибки для системы управления с ПИД-регулятором в 1,26 раза больше по сравнению с пропорциональными регуляторами.

Проведём моделирование движения подводного аппарата по траектории типа «змейка».

Заданный курс АНПА при движении «змейкой» на этапе отслеживания задаётся выражением:

$$\psi_{\text{зад.}} = \psi_{\text{текущ.}} + (-1)^n (90^\circ - \gamma), \quad (4.4)$$

где  $\psi_{\text{текущ.}}$  – текущий курс АНПА;

$\gamma$  – угол между продольной осью АНПА и направлением залегания ПМО;

$n$  – количество сигналов обнаружения от ЭМИ.

Результаты моделирования системы управления движением аппарата в горизонтальной плоскости с использованием ПИД-регуляторов и с использованием пропорциональных регуляторов представлены на рисунках 27 а) и 27 б).

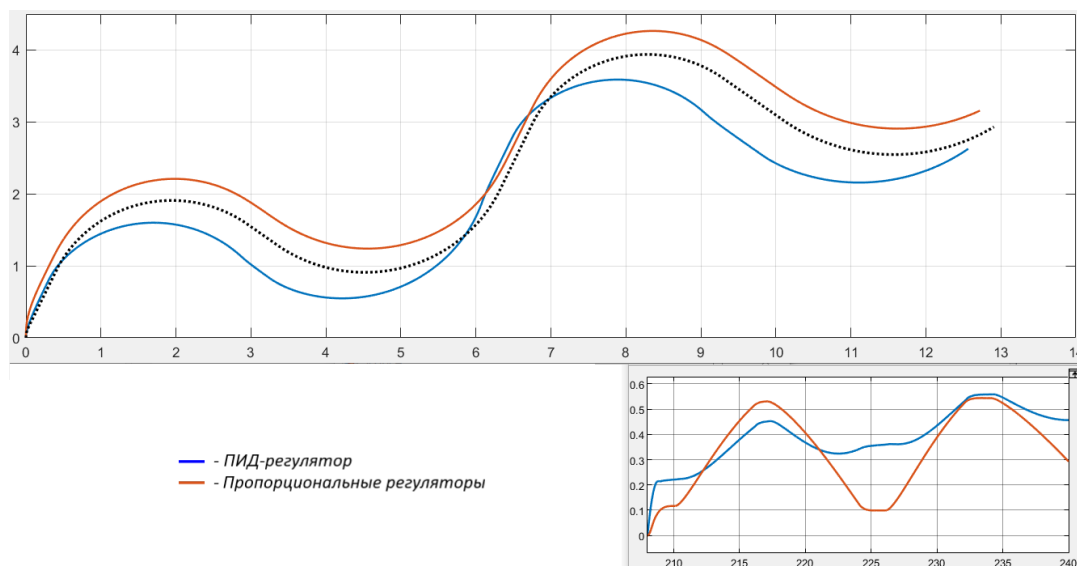


Рисунок 27 – Сравнение траекторий движения аппарата с различными системами управления: а) – траектории движения АНПА; б) – график ошибки, показывающей отклонение траекторий движения от заданной

В результате для нелинейной модели получаем, что максимальное значение ошибки для системы управления с ПИД-регулятором в 1,07 раза больше по сравнению с пропорциональными регуляторами.

Учитывая приведенные на рисунках 26 а), и 27 а) траектории движения АНПА, а также графики отклонения траекторий от заданной, отражающей заданное значение угла курса, можно сделать вывод, что использование пропорциональных регуляторов в системе управления обеспечивает меньшие ошибки и более точную отработку заданного значения угла курса по сравнению с ПИД-регуляторами. Следовательно, структурная схема системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости с использованием ПИД-регуляторов в п. 3.1 выбрана неправильно и необходимо дополнительно ввести в канал курса обратную связь по угловой скорости с пропорциональным регулятором.

В то же время при движении аппарата по траектории типа «расходящаяся спираль» и при движении по траектории типа «змейка» присутствует значительная динамическая ошибка. Для минимизации данной ошибки реализуем комбинированное управление путём введения в структуру системы управления параллельного регулятора с передаточной функцией  $W_{\text{ку}}(p)$  (рис.28).

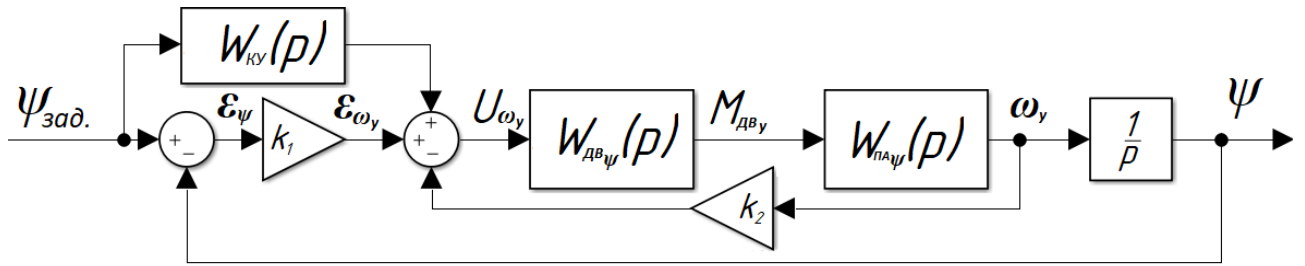


Рисунок 28 – Структурная схема системы управления АНПА в горизонтальной плоскости с комбинированным управлением

Под комбинированным управлением или регулированием понимается такой метод построения замкнутых автоматических систем, когда, наряду с регулированием по отклонению или ошибке, используется регулирование по задающему или возмущающему воздействию. Таким образом, в системе комбинированного управления осуществляется регулирование по замкнутому и разомкнутому циклам.

Введение дополнительного регулирования по задающему воздействию не изменяет передаточную функцию системы управления, следовательно, не изменяются условия устойчивости системы и сохраняются оценки качества переходного процесса.

Передаточная функция системы управления углом курса  $W_\psi(p)$ :

$$W_\psi(p) = \frac{\psi(p)}{\psi_{\text{зад.}}(p)} = \frac{W_{\text{па}\omega_y}(p) (k_1 W_1(p) + W_{\text{ку}}(p))}{p + k_1 W_1(p) W_{\text{па}\omega_y}(p)}.$$

Передаточная функция по ошибке  $E(p)$  равна:

$$E(p) = 1 - W_\psi(p) = \frac{p - W_{\text{ку}}(p) W_{\text{па}\omega_y}(p)}{p + k_1 W_1(p) W_{\text{па}\omega_y}(p)}.$$

Если  $E(p) = 0$ , то  $p - W_{\text{ку}}(p) W_{\text{па}\omega_y}(p) = 0$ , следовательно:

$$\begin{aligned} W_{\text{ку}}(p) &= \frac{p}{W_{\text{па}\omega_y}(p)} = \frac{p \left( 1 + k_2 W_{\text{дв}\psi}(p) W_{\text{па}\psi}(p) \right)}{W_{\text{дв}\psi}(p) W_{\text{па}\psi}(p)} = \\ &= \frac{1 + k_2 K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}}{K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}} p + \frac{(T_{\text{дв}} + T_{\text{па}\psi})}{K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}} p^2 + \frac{T_{\text{дв}} T_{\text{па}\psi}}{K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}} p^3. \end{aligned}$$

Производные задающего воздействия могут быть получены только приближённо при помощи использования дифференцирующих звеньев. Поэтому на практике второе и третье слагаемые не рассматриваются. Следовательно, выражение для  $W_{\text{ку}}(p)$  принимает вид:

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{1 + k_2 K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}}{K_{\text{дв}\psi} K_{\text{па}\psi}} p = 6,82p.$$

Введение первой производной от задающего воздействия в качестве комбинированного управления позволяет в системе с астатизмом первого порядка получить равной нулю динамическую ошибку, т.е. повысить степень астатизма относительно задающего воздействия на единицу.

На рисунке 29 приведены графики переходного процесса в модели системы управления по углу курса, построенной в пакете MATLAB Simulink, на этапе движения «расходящаяся спираль» с и без комбинированного управления.

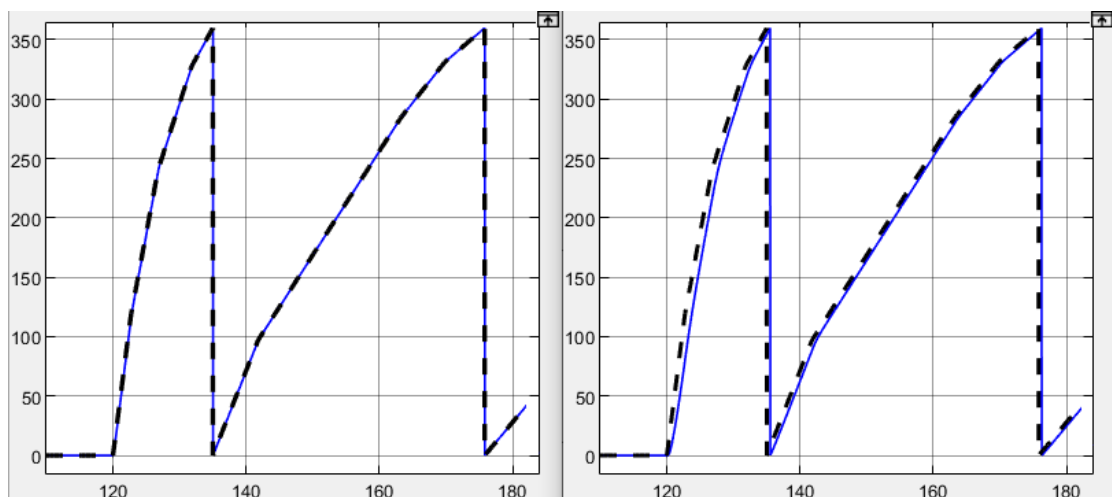


Рисунок 29 – Графики переходного процесса в модели системы управления по углу курса с и без комбинированного управления

Таким образом, по результатам моделирования полной нелинейной модели системы управления движением АНПА в горизонтальной плоскости можно сделать вывод о целесообразности использования линейных регуляторов: синтезированная система управления удовлетворяет условиям технического задания и обеспечивает требуемые характеристики переходного процесса, минимальную статическую и динамическую ошибки.

## 4.1 Выводы по разделу 4

В данном разделе проведено исследование полной нелинейной модели системы управления движением в горизонтальной плоскости:

1. Анализ переходных процессов в системе управления при ступенчатом входном воздействии показал, что время переходного процесса и перерегулирование соответствуют требованиям технического задания.
2. Проведено моделирование движения подводного аппарата по заданным траекториям типа «расходящаяся спираль» и «змейка» для двух методов синтеза регуляторов системы управления движением. Сравнительный анализ графиков отклонения полученной от заданной траектории позволяет сделать вывод, что использование пропорциональных регуляторов в системе управления обеспечивает меньшие ошибки и более точную отработку заданного значения угла курса по сравнению с ПИД-регуляторами.
3. При моделировании движения аппарата по траекториям типа «расходящаяся спираль» и «змейка» показано, что в системе управления движением присутствует значительная динамическая ошибка.
4. Для минимизации динамической ошибки реализовано комбинированное управление путём введения в структуру системы управления параллельного регулятора по управляющему воздействию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения курсового проекта была разработана и исследована система автоматического управления движением автономного необитаемого подводного аппарата в горизонтальной плоскости при поиске и обнаружении протяжённых металлодержащих объектов с помощью электромагнитного искателя.

По результатам проведённого анализа было установлено, что система поиска на основе ЭМИ может использоваться в качестве надёжного средства обнаружения ПМО. Особенностью организации работы системы управления движением исследуемого АНПА является интеграция ЭМИ в алгоритмы управления движением. При выполнении поиска и обнаружения ПМО, местоположение которого априорно неизвестно, необходима организация пространственного перемещения аппарата по типовым траекториям, которые состоят из участков прямолинейного движения (прямоугольный «меандр») и криволинейного («спираль», «змейка»). На основании проведённого анализа различных подходов к синтезу систем управления движением, с учётом конструктивных характеристик исследуемого АНПА и решаемых задач, сделан вывод о целесообразности использования традиционного подхода к синтезу системы управления движением исследуемого АНПА.

На основе выбранного подхода к синтезу системы управления движением исследуемого аппарата и с использованием метода декомпозиции нелинейной математической модели динамики подводного аппарата на сепаратные подсистемы, соответствующие движению по отдельным степеням свободы, разработана математическая модель динамики АНПА. Произведена линеаризация нелинейной модели подводного аппарата.

Для полученной линеаризованной модели динамики аппарата проведён синтез необходимых ПИД- и пропорциональных регуляторов в контурах маршевой скорости, угла курса и угловой скорости по курсу системы управления движением в горизонтальной плоскости. Было показано, что для устранения статической ошибки по задающему воздействию и возмущающему моменту

необходимо введение в систему управления ПИ-регулятора с пределом интегрирования, позволяющего повысить порядок астатизма, сохраняющего устойчивость системы и качество переходного процесса.

Целесообразность введенных регуляторов и корректность используемых алгоритмов синтеза была подтверждена путем моделирования полной нелинейной модели системы управления движением аппарата в горизонтальной плоскости. Анализ переходных процессов в системе управления показал, что время переходного процесса и перерегулирование соответствуют требованиям технического задания. Проведено моделирование движения аппарата по траекториям типа «расходящаяся спираль» и «змейка» для систем управления движением с ПИД-регуляторами и пропорциональными регуляторами в контурах маршевой скорости, угла курса и угловой скорости по курсу. Сделан вывод, что использование пропорциональных регуляторов в системе управления обеспечивает меньшие ошибки и более точную отработку заданного значения угла курса по сравнению с ПИД-регуляторами. Однако, при моделировании движения аппарата по траекториям типа «расходящаяся спираль» и «змейка» выявлено, что в системе управления движением присутствует значительная динамическая ошибка. Для минимизации динамической ошибки реализовано комбинированное управление путём введения в структуру системы управления параллельного регулятора по управляющему воздействию.

Таким образом, была разработана система управления движением АНПА в горизонтальной плоскости, удовлетворяющая условиям технического задания и обеспечивающая требуемые характеристики переходного процесса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инзарцев А.В. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, А.М. Павин. – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2018. – 368 стр.
2. Жуков Р.Ф. Системы, приборы и устройства подводного поиска / Р.Ф. Жуков, А.А. Кондратович, С.Д. Могильный, Б.И. Ципко. – М., Воениздат, 1972. – 184 стр.
3. Инзарцев А.В. Интегрированная система технического зрения и управления АНПА для поиска и обследования протяжённых кабельных линий / А.В. Инзарцев, А.М. Павин. – Подводные исследования и робототехника, 2007, № 2(4). – 6 стр.
4. Инзарцев А.В. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту автономного необитаемого подводного аппарата / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Ю.В. Матвиенко, Н.И. Рылов. – Подводные исследования и робототехника, 2015, № 2(20). – 9 стр.
5. Павин А.М. Разработка алгоритмов поиска и обследования искусственных протяжённых объектов с помощью автономного необитаемого подводного аппарата: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / А.М. Павин. – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2010. – 160 стр.
6. Инзарцев А.В. Модели, системы и технологии подводных роботов, и их применение для решения поисково-обследовательских задач. / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Л.В. Киселёв, В.В. Костенко. – ВСПУ-2019, 2019. – 8 стр.
7. Афонин, К.Ф. Высшая геодезия. Системы координат и преобразования между ними / К.Ф. Афонин. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 56с.
8. Инзарцев А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в



- акваториях различных типов / А.В. Инзарцев, А.В. Багницкий. – Подводные исследования и робототехника, 2016, № 2(22). – 11 стр.
9. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселёв, Ю.В. Матвиенко – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2005. – 398 стр.
10. Егоров С.А. Обзор алгоритмов локальных контуров управления движением подводных аппаратов / С.А. Егоров, А. В. Молчанов – Москва, Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011, №8 (август). – 10 стр.
11. Агеев М.Д. Автоматические подводные аппараты / М.Д. Агеев, Б.А. Касаткин, Л.В. Киселёв – СПб., Изд-во «Судостроение», 1981 – 224 стр.
12. Юхимец Д.А. Методы формирования программных сигналов и высокоточного управления скоростным движением подводных аппаратов: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Д.А. Юхимец. – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2014. – 315 стр.
13. Киселёв. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций / Киселёв, Медведев. – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 2010. – 16 стр.
14. Громыко В.Д. Самонастраивающиеся системы с моделью / В.Д. Громыко, Е.А. Санковский – Москва, Изд-во «Энергия», 1974. – 88 стр.
15. Дыда А.А. Синтез адаптивного и робастного управления исполнительными устройствами подводных роботов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.А. Дыда. – Владивосток, Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН, 1998. – 235 стр.
16. Дыда А.А. Синтез системы с переменной структурой для управления движением подводного робота / А.А. Дыда, А.В. Лебедев, В.Ф. Филаретов – Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000, № 1. – 162 стр.

17. Крутько П.Д. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными системами манипуляторов / П.Д. Крутько – Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1988, № 4. – 13 стр.
18. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы / П.В. Куропаткин – Москва, Высшая школа, 1980. – 287 с.
19. Лебедев А.В. Децентрализованное адаптивное управление скоростью движения подводного робота / А.В. Лебедев, В.Ф. Филаретов – Мехатроника. – 2000, № 6. – 39 стр.
20. Лебедев А.В. Синтез многоканальной системы с переменной структурой для управления пространственным движением подводного аппарата / А.В. Лебедев, В.Ф. Филаретов – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005, № 3. – 176 стр.
21. Егупов Н.Д. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления / Н.Д. Егупов – Москва, Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 стр.
22. Петров Б.Н. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами / Б.Н. Петров, Н.И. Соколов, А.В. Липатов – Москва, Изд-во «Машиностроение», 1986. – 256 стр.
23. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков – Москва, Изд-во «Наука», 2003. – 303 стр.
24. Солодовников В.В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В.В. Солодовников, Л.С. Шрамко – Москва, Изд-во «Машиностроение», 1972. – 270 стр.
25. Филаретов В.Ф. Программный комплекс моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата / В.Ф. Филаретов, В.А. Бобков, Д.А. Юхимец – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007, № 1. – 13 стр.
26. Ястребов В.С. Алгоритмы адаптивного движения подводного робота / В.С. Ястребов, С.В. Армишев – Москва, Изд-во «Наука», 1988. – 85 стр.

27. Wei W. 3D Track-keeping Method for Autonomous Underwater Vehicle / W. Wei, B. Xin-Qian, C. Zong-Hu – Journal of Marine Science and Application. – 2002, Vol. 1, №.2. – P. 18-22.
28. Киселёв Л.В. О некоторых особенностях динамики подводного автономного подводного робота при управлении эквидистантным движением вблизи дна / Л.В. Киселёв, А.В. Медведев – Гироскопия и навигация. – 2019, № 1 (104). – 106 стр.
29. Гостилович С.О. Разработка и исследование системы управления движением подводного аппарата в вертикальной плоскости. Синтез контура дифферента / С.О. Гостилович, А.О. Гостилович – Политехнический молодёжный журнал. – 2018, № 2. – 10 стр.
30. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учётом ограничений на управление в пакете MATLAB / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук – Моделирование объектов и систем управления. – 2007, № 2 (20). – 11 стр.