

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра автоматизации и управления

Горбачев Георгий Викторович

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ БУКСИРОВЩИКАМИ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА по паправлению подготовки магистров <u>15.04.06 – Мехатроника и робототехника</u> магистерская программа «*Мехатроника и робототехника*»

г. Владивосток 2018

Автор работы _	(подпясь)	
« ³)	, unke	2018 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы (про	екта)
профессор, Д.л.н. (дояжность, ученое звание)	
Филар	стов В.Ф_
 (правись) (ФИО) 	10
\$ 3 » unoune	2018 г.

Пормоконтроль

(1	подпись)	(ФИО)	
«	»		_2018 г.

«Допустить к защите» Руководитель ОП И. о. зав. кафедрой, д.т.н., профессор (должиев, ученое звание) Филаретов В.Ф. (100 (110 cb) (ФИО) UNO Mar 2018 г. И. о. зав. кафедрой д.т.н., профессор (ученое звание)

Филаретов В.Ф. (портнев) (ФИО) 27 w 400 ma 2018 г.

Рецензент выпускной квалификационной работы (проекта)

Jab. 12 ШЭМБ, К. Т. Ч. (nagenes) (TOLO) «26» иноние 2018 г.

D - ALAR DOMA	5 Compacenor KBUN	vqueequannas par	form we copper marker
Duckepular gowine	us rogano allerago	miny, a conferme	e, nognessances we
wegener, wanter	Ne		
Hearop and y and y		der Corres	

Защищепа в ГЭК с оценкой ОТлигно

Секретарь ГЭК high My cannerob 7.04. 7 » Upo lue 2018 r.

Chequenti, cogep many and, roly-gapeskening to rating, ret. Decarges A Aluge Son

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа Кафедра автоматизации и управления

УТВЕРЖДЕНО Руководитель ОП _д.т.н., профессор (ученая степень, должность) Филаретов В.Ф. (подрись) (**ΦHO**) « 14 » июня 2017 г. И. о. заведующего кафедрой _____. профессор (ученая степень, званис) Филаретов В.Ф. (NONTINCE) (ФИО)

« 14 » июня 2017 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

	Горбачс	еву Георгию Викторовичу	Группа	M-3216	
18		(Фамилия, Имя, Отчество)		(номер группы)	
1. Наименован	ие темы Раз	зработка системы управления	подводными		
оуксировщика	ами				
2. Основания д	ля разработки	Выполнение НИР			
3. Источники р	азработки				
4. Технические	требования (па	араметры) Разрабатывасмая	і система упра	D ROMAN	
TERRETARD STATES OF A TANK	Same and the second second	Anna Carlon Constant and a second	- cares course Julia	вления	
движением нео задапной точн	обитаемого по, ости движени:	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет	еспечивать со ров аппарата.	хранение	
движением не: заданной точн 5. Дополнитель	обитаемого по, ости движения ныс требовани	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют.	еспечивать со ров аппарата.	хранение	
цвижением не заданной точн 5. Дополнитель 6. Перечень раз	обитаемого по, ости движения ные требовани вработанных во	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют. просов <u>1. Проведение иссле</u>	еспечивать со ров аппарата. дования моде.	хранение ли движения	
цвижением не заданной точн 5. Дополнитель 6. Перечень раз необитаемого)	обитаемого по, ости движения вные требовани гработанных во подводного ап	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют. просов 1. Проведение иссле парата на предмет ухудшения	еспечивать со ров аппарата. дования моде. гочности его	хранение ли движения движения	
цвижением не заданной точн 5. Дополнитель 6. Перечень раз необитаемого р при изменения 2. Разработия	обитаемого по, ости движения зные требовани работанных во подводного ап и параметров а	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют. просов 1. Проведение иссле парата на предмет ухудшения аппарата.	еспечивать со ров аппарата. дования моде. г точности его	хранение хранение ли движения движения	
движением не заданной точн 5. Дополнитель 6. Перечень раз необитаемого р ири изменения 2. Разработка г	обитаемого по, ости движения ные требовани работанных во подводного ап и параметров а метода синтеза	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют. просов <u>1. Проведение иссле</u> парата на предмет ухудшения аппарата. а адаптивной системы управл	еспечивать со ров аппарата. дования моде. точности его ения движени	хранение ли движения движения см	
движением не заданной точн 5. Дополнитель 6. Перечень раз необитаемого и при изменении 2. Разработка и	обитаемого по, ости движения вные требовани гработанных во подводного ап и параметров а метода синтеза подводного ап	дводного анцарата должна об я в случае изменения парамет ия Отсутствуют. просов <u>1. Проведение иссле</u> парата на предмет ухудшения аппарата. а адаптивной системы управл парата, обеспечивающего сох	еспечивать со ров аппарата. дования моде. сточности его ения движени ранение качес	хранение ли движения движения см тва	

7. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных плакатов) Презентация

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

№ 11/11	Наименование этапов дипломного проекта (работы)	Срок выполнения этапов дипломного проскта (работы)	Примечани
1	Написание введения и постановки задачи	До 16.02.2018	
2	Написание первой главы диссертации (обзор существующих подходов)	До 15.03.2018	-
3	Написание второй главы диссертации (исследование известных систем)	До 10.04.2018	
4	Написание третьей главы диссертации (основной раздел и описание результатов моделирования)	До 03.05.2018	
5	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями руководителя	До 01.06.2018	
6	Проверка диссертационной работы на Антиплагиат	До 06.06.2018	
7	Оформление ВКР, прохождение нормоконтроля, получение рецензии и отзыва руководителя ВКР	До 13.06.2018	
8	Подготовка к защите (подготовка доклада и презентация в Power Point)	До 17.06.2018	
9	Защита ВКР в ГЭК	27.06.2018-06.07.2018	

Дата выдачи

задания

14 unance 20172.

Срок представления к защите

UHOKB 2018roga

Руководитель ВКР

(подпись) F (полнись)

Филаретов В.Ф. (ФИО) Горбачев Г.В. (ФИО)

Студент

АННОТАЦИЯ

В данной диссертационной работе автором были рассмотрены особенности движения необитаемых подводных аппаратов в случаях, когда их параметры меняются вследствие размещения груза. Проведено исследование, в котором определяется степень ухудшения качества движения необитаемых подводных аппаратов вдоль криволинейных траекторий. Автором разработан метод синтеза адаптивной системы управления движением необитаемого подводного аппарата, позволяющий сохранить требуемую точность при движении в случае изменения параметров аппарата в разы.

Диссертационная работа разделена на три главы.

В первой главе проводится анализ существующих методов синтеза систем управления движением необитаемых подводных аппаратов. Объем главы – 7 страниц.

Во второй главе проводится построение модели необитаемого подводного аппарата, а также проводится исследование построенной модели на предмет ухудшения качества движения при увеличении параметров этой модели. Объем главы – 26 страниц.

В третьей главе разрабатывается метод синтеза адаптивной системы управления, позволяющей сохранить точность движения при изменении параметров модели. Исследование разработанной адаптивной системы управления показало, что эта система сохраняет качество движения при изменении параметров, которые приводили к значительным ухудшениям качества движения в случае использования системы управления без разработанной адаптивной коррекции. Объем главы – 17 страниц.

СПИСОК ВВЕДЕННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- БФО блок формирования отклонений,
- ВТ виртуальная траектория,
- ДРК движительно-рулевой комплекс,
- НПА необитаемый подводный аппарат,
- ПД пропорциональный дифференциальный,
- ПИД пропорциональный интегральный дифференциальный,
- РППТ регулятор положения программной точки,
- СК система координат,
- СПС система с переменной структурой,
- ССК связанная система координат,
- СУ система управления.

введение

В настоящее время для работы в мировом океане широко используются необитаемые подводные аппараты (НПА). Они могут использоваться в научных целях для картографирования рельефа донной поверхности, для получения гидрографических измерений и экологических исследований, для археологических исследований [1], а также разведки и исследования запасов углеводородов в шельфовых зонах [2]. С помощью НПА может выполняться целый класс задач, связанный с осмотром и обслуживанием подводной добывающей инфраструктуры: подводных добывающих комплексов, трубопроводов, кабельных линий и других гидросооружений [3]. На сегодняшний день уровень технологии разработки нефтяных шельфовых месторождений достиг уровня, когда участие водолаза не требуется, а все монтажные и осмотровые работы выполняются с помощью телеуправляемых НПА [4]. Также, НПА используются в рыбохозяйственной отрасли и в развлекательных целях.

Среди НПА можно выделить класс автономных НПА, которые сегодня выполняют простейшие осмотровые операции. Как правило, эти аппараты перемещаются по простейшим пространственным траекториям, однако для осмотровых задач, связанных с работой вблизи объектов подводной ΗΠА требуется инфраструктуры [5], OT двигаться вдоль сложных пространственных траекторий высокой избежание С точностью BO столкновения с подводными конструкциями.

Также, в настоящее время существуют системы управления (СУ) движением НПА, позволяющие им перемещаться как по простейшим пространственным траекториям, так и по сложным криволинейным траекториям [6]. Эти СУ были спроектированы для задач, в которых параметры НПА по умолчанию остаются неизменны в процессе всего движения. Однако уже сейчас возникают задачи управления НПА, параметры

которых меняются в процессе движения, что может быть следствием размещения груза.

Задача движения аппарата с грузом заключается в его доставке груза из начальной точки к заданной. В ситуациях, когда груз должен быть транспортирован вблизи объектов подводной инфраструктуры, необходимыми являются требования к точности движения вдоль заданных сложных пространственных траекторий в процессе всего движения.

Предварительный анализ показал, что эти задачи могут быть решены существующими методами только в тех случаях, в которых влиянием груза на динамику аппарата с грузом можно пренебречь либо в случаях, где с изменением динамических свойств аппарата справляются робастные системы в случае их использования. Другими словами, груз должен быть незначителен по сравнению с несущим его аппаратом, как и изменения параметров аппарата вследствие присоединения груза должны быть незначительны. Этими параметрами являются масса НПА, его форма, его плавучесть и посадка.

Добавление груза к аппарату увеличивает инерцию всей системы. Помимо сил инерции на аппарат с грузом действуют другие силы, влияние которых на движение имеет смысл рассматривать вместе с основными способами расположения грузов относительно аппарата. Груз может располагаться внутри самого аппарата. В этом случае габариты аппарата с грузом не меняются, то есть не меняется объем погруженного в жидкость тела. НПА проектируются таким образом, чтобы обеспечивалась их остойчивость и нейтральная (или незначительно положительная) плавучесть. Остойчивость обеспечивается несовпадением центра водоизмещения и центра масс аппарата, что приводит к существованию положения устойчивого равновесия НПА в водной среде. Добавление груза внутры аппарата увеличивает массу всей системы без изменения погруженного в жидкость объема, что неминуемо приводит к уменьшению плавучести. Помимо этого, неизбежное смещение центра масс изменит остойчивость. В

совокупности все эти факторы могут изменить динамику аппарата настолько, что качество движения аппарата с настроенной при исходной динамике СУ значительно снизится.

Груз также может быть жестко прикреплен к аппарату снаружи. В этом случае форма НПА изменяется, его габариты увеличиваются, что приводит к увеличению сил сопротивления жидкости. Кроме того, может быть нарушена симметрия аппарата, а обтекаемость ухудшена. При проектировании аппаратов их форма делается симметричной для того, чтобы воздействие жидкости было также симметричным и не приводило к появлению дополнительных моментных воздействий при движении [7, 8]. Как правило форма аппаратов также является обтекаемой для снижения действующих сил гидродинамического сопротивления [7, 8]. Однако при креплении груза снаружи аппарата форма аппарата с грузом может перестать быть как обтекаемой, так и симметричной, что приводит к дополнительным силовым и моментным воздействиям [8-10], которые ухудшат качество движения НПА.

Также, прикрепление груза снаружи к аппарату смещает его центр масс и центр водоизмещения и приводит к изменению посадки аппарата. В случае, если транспортируемый груз обладает плавучестью отличной от нейтральной, то и плавучесть аппарата с грузом также меняется. Как и в случае размещения груза внутри аппарата, из-за указанных факторов качество работы СУ может значительно снизиться.

Из описанного выше можно сделать вывод, что актуальной является разработка такой СУ, которая бы при изменении всех указанных выше параметров, учитывая их, не приводила к ухудшению качества движения НПА вдоль пространственных траекторий.

В соответствии с описанной задачей была определена структура диссертации, состоящей из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе были рассмотрены подходы к моделированию движения НПА, а также проводится анализ существующих способов синтеза СУ движением НПА.

В процессе анализа было выявлено, что все существующие системы управления синтезируются с учетом того, что параметры НПА либо остаются неизменны в процессе движения, либо их изменения происходят в пределах десятков процентов от их номинального значения. Это не позволяет использовать существующие методы синтеза СУ движением НПА с переменными параметрами.

Во второй главе выполняется построение и исследование модели НПА с переменными параметрами. Исследование модели НПА показали, что как при использовании линейной СУ, так и при использовании высокоточной СУ, изменение параметров модели приводит к ухудшению точности движения.

В третьей главе производится разработка метода синтеза адаптивной СУ НПА, обеспечивающей сохранение качества движения НПА в случае значительного изменения его параметров. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и эффективность разработанного метода синтеза адаптивной СУ НПА.

В заключении описаны основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

ΗΠΑ нелинейным объектом является многомерным сложным управления, чьи степени свободы подвержены взаимовлиянию [7-10]. В процессе движения на аппарат действуют силы различной природы: силы инерции, гидродинамические и гидростатические силы. При этом, НПА должен перемещаться с высокой точностью вдоль различных пространственных траекторий. Точность движения, в свою очередь, зависит от качества СУ, используемых в аппарате.

В данной главе проводится анализ существующих методов синтеза СУ пространственным движением НПА, указаны их преимущества и недостатки. Это позволит определить их пригодность для работы в случае, когда параметры НПА меняются в разы.

1.1 Анализ математических моделей движения НПА

Большое количество работ посвящено построению математических моделей динамики НПА [6-9, 11, 12]. В этих работах движение свободного тела в пространстве с учетом гидростатических и гидродинамических сил и моментов, действующих со стороны внешней среды описывается с помощью уравнений Ньютона-Эйлера или Эйлера-Лагранжа.

Из анализа указанных моделей можно выделить несколько ключевых особенностей НПА как объекта управления. В работах [8-10, 13] показано, что присоединенные массы и моменты инерции жидкости, добавляемые к инерционным параметрам НПА за счет вовлечения в движение объемов этой жидкости при движении НПА, определяются формой аппарата. Величины этих масс и моментов инерции зависят от многих факторов, а также могут существенно меняться в процессе движения аппарата.

При движении вдоль сложных пространственных траекторий проявляются взаимовлияния между всеми степенями свободы НПА [9, 10, 12], изменяющие параметры каждого канала управления аппарата. Помимо этого, при движении на НПА действуют внешние воздействия со стороны окружающей среды, такие как подводные течения и вязкие трения. Зачастую, оценить или измерить указанные воздействия весьма затруднительно.

Кроме того, на динамику НПА оказывает существенное влияние динамика его движительно-рулевого комплекса (ДРК) [2, 8, 14-16]. Проведенные различными исследователями экспериментальные исследования показывают [17-20], что динамика ДРК имеет сложные нелинейные зависимости, а уравнения, описывающие эту динамику, должны учитывать не только параметры самих движителей, но и режим движения НПА. Как правило, движители НПА описываются с помощью упрощенных моделей, учитывающих важных эффектов, не ряд связанных С взаимодействием винта и жидкости. Однако, как показали исследования [18, 19, 21], использование упрощенных моделей движителей при синтезе СУ приводит к ухудшению качества этих систем при управлении реальными НПА. Кроме динамики движителей необходимо также учитывать кинематику всего ДРК [10], которая может вносить дополнительные нелинейности в математическое описание движения НПА.

Расчет параметров модели НПА также представляет собой проблему. В работах [9, 22-28] отмечено, что в настоящее время параметры могут быть определены либо в процессе проведения серии натурных экспериментов, либо с использованием аналитических и численных методов. В любом случае эти параметры могут быть найдены лишь приближённо.

проведенного Из способы анализа становится ясно, что математического моделирования движения НПА с учетом всех возможных силовых и моментных воздействий, возникающих вследствие присоединения параметризованы. К тому груза, существуют И же, среди всех представленных математических моделей на сегодняшний день наиболее

широко применяемой является модель Фоссена [9], записанная в матричном виде, которая будет использована в рамках этой диссертации.

1.2 Обзор существующих методов синтеза систем управления необитаемыми подводными аппаратами

На сегодняшний день уже создано большое количество методов проектирования и синтеза СУ НПА [6, 9, 10, 29, 30]. Анализ указанных работ показывает, что существующие СУ НПА условно делятся на три группы: линейные СУ НПА, адаптивные СУ и робастные СУ. Ниже также отдельно рассмотрены СУ на основе нового принципа управления.

1.2.1. Обзор существующих линейных СУ движением НПА

Описываемые в этом параграфе СУ синтезируются на основе упрощенных математических моделей НПА либо на основе допущения постоянства их параметров. Относящиеся к таким системам классические линейные СУ описаны в работах [25, 31-33]. Как показала практика, использование подобных СУ эффективно только при прямолинейном движении (при движении галсами) НПА или при его стабилизации в пространстве. В таких случаях взаимовлияния между каналами управления отсутствуют. При движении НПА вдоль сложных пространственных траекторияй с одновременным изменением угловых координат указанные СУ уже не обеспечивают приемлемого качества работы. Например, в работе [34] экспериментальные исследования пространственных движений НПА с установленной на нём СУ на ПИД-регуляторах показали резкое снижение точности движения НПА при одновременном управлении линейными и угловыми координатами.

Для НПА также используется другой тип линейных СУ – системы с программным изменением коэффициента усиления [35]. Эти СУ используют

несколько различных линейных регуляторов для разных режимов работы, что позволяет учесть нелинейности динамики НПА. Как и рассмотренные ранее, эти СУ синтезируются на основе линейных моделей аппарата и используют ПИД-регуляторы. Как было отмечено выше, при движениях по нескольким степеням свободы ПИД-регуляторы не обеспечивают приемлемое качество управления. К тому же, эти системы требуют проведения исследования устойчивости для каждой линеаризованной области математической модели НПА.

1.2.2. Обзор существующих адаптивных СУ движением НПА

Адаптивные СУ являются более эффективными для управления НПА. Эти СУ позволяют подстраивать их параметры при изменении параметров аппарата в процессе их работы. Принципы их построения описаны в работах [36-38], а их применение для управления другими сложными робототехническими устройствами отражено в работах [39-42].

Адаптивные СУ движением НПА приведены в работах [43, 44]. Метод синтеза адаптивной СУ для управления движением в горизонтальной торпедообразного ΗΠΑ плоскости при неопределенности его гидродинамических коэффициентов приведен в работе [43], а метод синтеза адаптивного ПД-регулятора для управления движением НПА к заданной использующий точке, математическую модель гидростатических И гравитационных сил, приведен в работе [44].

Адаптивные СУ позволяют добиться достаточно высокого качества управления, однако высокая сложность при увеличении числа настраиваемых параметров и необходимость непрерывной их идентификации в процессе работы для осуществления настройки являются их основными недостатками. Помимо этого, при синтезе подобных СУ не дается обоснования используемого алгоритма настройки параметров, обеспечивающего

устойчивость всей системы в целом. Из-за этого использовать адаптивные СУ для управления движением НПА может быть затруднительно.

1.2.3. Обзор существующих робастных СУ движением НПА

Для управления ΗΠΑ робастные СУ. иногда используются Особенность этих СУ заключается в том, обеспечивают что они независимость процесса управления от свойств объекта управления, то есть в данном случае аппарата. Эта особенность гарантирует требуемое качество управления НПА при любых изменениях его параметров в заранее заданных диапазонах. Среди этого типа СУ можно выделить несколько видов.

Одним из типов таких СУ являются самонастраивающиеся системы с эталонной моделью, принципы работы которых описаны в работах [45, 46]. У этих СУ есть в явном виде техническое устройство (модель), которое обладает требуемыми динамическими свойствами. Динамику всей системы, при этом, сводят к динамике технического устройства. Подобного типа СУ для НПА представлены в работах [47, 48]. Они обеспечивают качественное управление с помощью сравнительно простых средств без необходимости идентификации параметров в процессе работы. Однако в контуре самонастройки могут существовать высокочастотные колебания, что и является основным недостатком систем с эталонной моделью, так как это может серьёзно снизить качество управления.

Другим видом робастных СУ являются оптимально-робастные СУ. В работах [49, 50] описаны принципы их построения. Этот тип СУ как правило используется для управления многомерными динамическими объектами, имеющими структурные и параметрические неопределённости различного типа, которые содержатся в их математических моделях [51, 52]. Такие системы иногда используются для управления отдельными степенями свободы НПА. Достаточно высокая робастность к неопределенным параметрам НПА является их преимуществом, но их синтез производится по

линеаризованным моделям. Это, в свою очередь, накладывает ограничение на их использование для управления пространственным движением НПА.

Еще одним видом робастных СУ являются системы с переменной структурой (СПС), работающие в скользящем режиме. Их принцип работы и теория синтеза изложена в работах [53, 54]. СПС широко применяются в качестве СУ движением НПА [55, 56]. Иногда СПС реализуются с использованием методов нечеткой логики [57-59] для упрощения настройки этих систем. Однако несмотря на свои преимущества СПС обладает недостатками, связанными с тем, что для обеспечения их работоспособности во всем диапазоне изменения параметров аппарата СПС синтезируется с учётом «наихудших» значений параметров, что значительно снижает быстродействие системы. Таким образом, СПС всегда имеют заниженное быстродействие, существенно снижая динамическую точность контурного управления движением НПА по пространственным траекториям.

Допустимый диапазон изменения параметров НПА для робастных СУ как правило составляет несколько десятков процентов от их номинального значения. При изменении параметров аппарата в разы, робастные системы перестают корректно работать.

1.2.4. СУ НПА, синтезированные с использованием принципа виртуальной траектории

Использование нового принципа управления – принципа виртуальной траектории (ВТ) позволяет улучшить качество движения НПА вдоль криволинейных пространственных траекторий даже в случае использования линейных СУ [6]. Этот принцип описан в работах [60-63] и подразумевает коррекцию программных сигналов, поступающих на вход уже установленной на НПА СУ. Принцип ВТ позволяет в разы улучшать качество движения вдоль пространственных траекторий. Синтез СУ этого типа не представляет затруднений.

Таким образом, выполненный анализ существующих методов синтеза СУ НПА показывает, что все существующие на сегодняшний день СУ рассчитаны либо на работу при неизменных параметрах НПА, либо в случае, когда параметры меняются на десятки процентов. Изменение параметров в разы ухудшит качество движения НПА вдоль пространственных траекторий, поэтому существует необходимость в синтезе специальной СУ, учитывающей изменения параметров аппарата.

1.3 Постановка задачи

Целью данной диссертационной работы является разработка метода синтеза адаптивной СУ движением НПА вдоль сложных пространственных траекторий, показатели качества движения которой не будут изменяться в случае значительно меняющихся параметров аппарата.

2 ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ НПА С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

2.1 Математическая модель пространственного движения НПА

Наиболее полная модель пространственного движения НПА, записанная в матричном виде в собственной системе координат аппарата (ССК) [6, 9, 10]:

$$M\dot{v} + (C(v) + D(v))v + g(x) = \tau_{\partial}, \qquad (1)$$

где $M \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ – матрица инерции НПА (включающая присоединенные массы и моменты инерции жидкости), которая также может быть представлена в виде четырех её компонент – матриц M_{11}, M_{12}, M_{21} и $M_{22} \in \mathbb{R}^{3\times 3}$; $\mathbb{C}(v) \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ – матрица кориолисовых и центробежных сил; $\mathbb{D}(v) \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ – матрица сил и моментов вязкого трения; $g(x) = [F_{gsx} \quad F_{gsy} \quad F_{gsz} \quad M_{gsx} \quad M_{gsy} \quad M_{gsz}]^T \in$ \mathbb{R}^6 – вектор гидростатических сил и моментов; $x = [x_n \quad y_n \quad z_n \quad \varphi \quad \theta \quad \psi]^T \in \mathbb{R}^6$ – вектор положения и ориентации НПА в ACK; $\tau_{\partial} = [\tau_{\partial x} \quad \tau_{\partial y} \quad \tau_{\partial z} \quad M_{\partial x} \quad M_{\partial y} \quad M_{\partial z}]^T \in \mathbb{R}^6$ – вектор проекций тяг и моментов движительно-рулевого комплекса (ДРК) на оси ССК; $v = [v_x \quad v_y \quad v_z \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T \in \mathbb{R}^6$ – объединенный вектор проекций линейной и угловой скоростей движения НПА на оси ССК.

Матрица инерции M состоит из матрицы инерции M_{RB} твердого тела и матрицы M_A присоединенных масс жидкости: $M = M_{RB} + M_A$. Матрица инерции твердого тела имеет вид [9]:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mE & -mS(r_g) \\ mS(r_g) & I \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где m – масса НПА, I $\in \mathbb{R}^{3\times3}$ – тензор инерции НПА, а I_{ij} – его компоненты, $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{3\times3}$ – единичная матрица, $\mathbf{r}_g = [x_g \quad y_g \quad z_g]^T \in \mathbb{R}^3$ – координаты центра масс (ЦМ) НПА в ССК, а оператор $\mathbf{S}(\mathbf{r}_g)$ – антисимметричный оператор, являющийся матричной записью векторного произведения [9, 10].

Известно, что, относительно центра масс аппарата, момент инерции может быть представлен диагональной матрицей $I_0 \in \mathbb{R}^{3x3}$. Если матрица I_0 справедлива для системы координат, связанной с аппаратом, её центр находится в центре масс аппарата, а её оси могут быть получены с помощью параллельного переноса осей ССК, то будет справедлив закон Гюйгенса-Штейнера в матричной форме [9]:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 - m\left(\mathbf{S}(\mathbf{r}_g)\right)^2. \tag{3}$$

Матрица присоединенных масс жидкости имеет вид [6, 9, 64]:

$$M_{A} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & \lambda_{26} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & \lambda_{46} \\ \lambda_{51} & \lambda_{52} & \lambda_{53} & \lambda_{54} & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & \lambda_{64} & \lambda_{65} & \lambda_{66} \end{bmatrix}; \quad \lambda_{ik} = \lambda_{ki}, \tag{4}$$

где λ_{ik} – элементы, соответствующие присоединенным массам и моментам инерции жидкости (*i*, *k* = 1,6).

Из уравнений Кирхгофа для движения свободных систем была выведена матрица кориолисовых и центробежных сил, которая может быть представлена в виде [3]:

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0_{3\times3} & -\hat{S}(M_{11}\,\nu_b + M_{12}\,\omega_b\,) \\ -\hat{S}(M_{11}\,\nu_b + M_{12}\,\omega_b\,) & -\hat{S}(M_{21}\,\nu_b + M_{22}\,\omega_b\,) \end{bmatrix},$$
(5)

где $v_b = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3$, а $\omega_b = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3$.

Матрица сил и моментов вязкого трения D(v) есть диагональная матрица, имеющая вид [6]:

$$D(v) = D_{1} + D_{2}(v) = diag(d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, d'_{1x}, d'_{1y}, d'_{1z}) + + diag(d_{2x}|v_{x}|, d_{2y}|v_{y}|, d_{2z}|v_{z}|, d'_{2x}|\omega_{x}|, d'_{2y}|\omega_{y}|, d'_{2z}|\omega_{z}|),$$
(6)

где $D_1, D_2(v), d_1, d_2, d'_1, d'_2$ — матрицы и коэффициенты вязкого трения, соответствующие линейной и квадратичной зависимостям гидродинамических сил и моментов от скоростей движения НПА по их конкретным степеням свободы.

Вектор гидростатических сил g(x) имеет вид: [6, 9]

$$g(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W - B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\varphi \\ (\mathbf{y}_{g}W - \mathbf{y}_{b}B)\cos\theta\cos\varphi + (\mathbf{z}_{g}W - \mathbf{z}_{b}B)\cos\theta\sin\varphi \\ (\mathbf{z}_{g}W - \mathbf{z}_{b}B)\sin\theta \\ + (\mathbf{x}_{g}W - \mathbf{x}_{b}B)\cos\theta\cos\varphi \\ (\mathbf{z}_{g}W - \mathbf{x}_{b}B)\cos\theta\sin\varphi - (\mathbf{y}_{g}W - \mathbf{y}_{b}B)\sin\theta \end{bmatrix},$$
(7)

где W – сила тяжести НПА, B – Архимедова сила, приложенная в центре водоизмещения, а (x_g , y_g , z_g) и (x_b , y_b , z_b) – координаты ЦМ и центра водоизмещения (ЦВ) в ССК соответственно.

Движитель НПА является нелинейным объектом, однако при использовании уже созданных методов синтеза специальных нелинейных регуляторов [6, 65], благодаря которым описание динамики каждого движителя НПА представляется линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, математическое описание динамики всего ДРК в целом может быть также представлен набором независимых линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами при условии, что конфигурация ДРК позволяет избежать взаимовлияний между всеми степенями подвижности НПА. Таким образом, динамика ДРК по каждой степени свободы может иметь следующий вид [6]:

$$\tau_{di} = T_i \dot{\tau}_{\partial i} + \tau_{\partial i}, \qquad i = \overline{1,6}, \tag{8}$$

где τ_{di} – программный сигнал проекции тяги или момента по i-й степени свободы, $\tau_{\partial i}$ – тяга или момент, развиваемая ДРК по i-й степени свободы, а T_i – желаемая постоянная времени ДРК по i-й степени свободы. Без ограничения общности можно допустить, что желаемые постоянные времени ДРК по всем степеням свободы одинаковы и равны *T*. В таком случае уравнение (8) можно представить в векторном виде:

$$\tau_d = T\dot{\tau}_\partial + \tau_\partial,\tag{9}$$

где $\tau_d = [\tau_{dx} \quad \tau_{dy} \quad \tau_{dz} \quad M_{dx} \quad M_{dy} \quad M_{dz}]^T \in \mathbb{R}^6$ – вектор программных сигналов проекций тяг и моментов на оси ССК.

2.2 Синтез СУ движением НПА в горизонтальной плоскости на основе принципа виртуальной траектории

Использование принципа виртуальной траектории подразумевает добавление управления программным сигналом в заранее синтезированную следящую систему управления необитаемым подводным аппаратом. В общем случае, указанная заранее синтезированная СУ может быть какой угодно, в том числе и простейшей, однако она должна обладать устойчивостью при движении вдоль желаемых программный траекторий. Управление же программным сигналом осуществляется посредством добавления некоторой величины к программному сигналу посредством определенного закона управления в каждый момент времени, что, по сути, и является формированием виртуальной траектории.

В качестве «заранее синтезированной» СУ будем использовать двухканальную СУ движения в горизонтальной плоскости, показанную на рис. 1:



Рисунок 1 – Структурная схема «заранее синтезированной» СУ НПА

Эта СУ имеет два канала управления: канал управления по углу курса и канал управления продольным движением. На вход СУ подаются два программных сигнала – две координаты x* и y* целевой точки в ACK. Используя сигналы х и у с датчиков текущего положения аппарата в горизонтальной плоскости АСК, формируются сигналы программных ошибок $\varepsilon_{ax} = x^* - x$ и $\varepsilon_{ay} = y^* - y$, которые вместе с сигналом с датчика курса аппарата у подаются на вход блока пересчета ошибок, на выходе которого формируются два сигнала: величина проекции вектора программной ошибки продольную ССК на ось \mathcal{E}_{χ} И величина рассогласования между желаемым и текущим значением угла курса ε_{ψ} .

Проекция ε_x вектора программной ошибки на продольную ось НПА имеет вид:

$$arepsilon_x = \cos\psi\,arepsilon_{\mathrm{a}x} + \sin\psi\,arepsilon_{\mathrm{a}y}$$
 ,

а для нахождения величины рассогласования по углу курса используется известное соотношение [6, 66]:

$$\varepsilon_{\psi} = \arccos\left(\frac{\varepsilon_{ax}\cos\psi - \varepsilon_{ay}\sin\psi}{\sqrt{\varepsilon_{ax}^2 + \varepsilon_{ay}^2}}\right) \cdot sign\left(\varepsilon_{ax}\sin\psi - \varepsilon_{ay}\cos\psi\right).$$

Для формирования управляющих воздействий в каждом из двух каналов используются ПД-регуляторы с передаточными функциями вида:

$$W_{x}(s) = P_{x} + D_{x} \frac{s}{T's+1},$$

$$W_{\psi}(s) = P_{\psi} + D_{\psi} \frac{s}{T's+1},$$

где T' = 0.01 с., а P_x , D_x , P_ψ и D_ψ – параметры регуляторов, для нахождения которых могут быть использованы стандартные методы теории автоматического управления.

Также предполагается, что контур управления тягами синтезирован одним из способов, указанных выше, и что математическое описание этого контура определяется выражением (9).

Введение управления программным сигналом осуществляется при помощи СУ [63], представленной на рис. 2.



Рисунок 2 – Структурная схема СУ НПА на основе принципа виртуальной траектории

Здесь блок формирования отклонения (БФО) вычисляет отклонение НПА от программной траектории $\varepsilon_n(t) = [\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}, \varepsilon_{nz}]^T \in \mathbb{R}^3$ в текущий момент времени с помощью известных способов [6, 67].

В общем случае сигнал, соответствующий программной траектории, имеет вид: $X^*(t) = [x^*(t), y^*(t), z^*(t)]^T \in \mathbb{R}^3$, сигнал, добавляемый к программному – $\Delta X^*(t) = [\Delta x^*(t), \Delta y^*(t), \Delta z^*(t)]^T \in \mathbb{R}^3$, а сигнал, соответствующий виртуальной траектории – $\widetilde{X^*}(t) = [\widetilde{x^*}(t), \widetilde{y^*}(t), \widetilde{z^*}(t)]^T \in \mathbb{R}^3$.

Регулятор положения программной точки (РППТ) на рис. 2 формирует сигнал $\Delta X^*(t)$ с помощью ПД-регулятора, определяемого выражением $\Delta X^*(t) = K_{np}\varepsilon_n(t) + K_{nd}\dot{\varepsilon}_n(t)$, где K_{np} и K_{nd} – коэффициенты, для нахождения которых может быть использован один из методов оптимизации.

Программные сигналы, обеспечивающие движение программной точки с задаваемой программной скоростью по заданной траектории, формируются при помощи существующих алгоритмов [6, 68].

При моделировании плоского движения НПА использовались следующие параметры [6]: m = 100 кг, $I_{zz} = 10$ кгм², $\lambda_{11} = 20$ кг, $\lambda_{22} = 40$ кг,

 $\lambda_{66} = 1$ кгм², $d_{1x} = 5$ Hc/м, $d_{1y} = 10$ Hc/м, $d'_{1z} = 1,5$ Hсм/рад,

 $d_{2x} = 10$ Нсм/рад, $d_{2y} = 20$ Нсм/рад, $d_{2z}' = 3$ Нс²м/рад², $\lambda_{12} = \lambda_{16} = \lambda_{26} = x_g = y_g = 0.$

Программная криволинейная траектория, вдоль которой производилось моделирование движения была задана уравнением $y(t) = 10 \sin(\pi x(t)/20)$, а программная скорость была равна 1 м/с.

Были использованы следующие параметры регуляторов: $P_x = 10, D_x = 15, P_{\psi} = D_{\psi} = 100, K_{np} = 8$ и $K_{nd} = 16$.

Для линейной СУ максимальное отклонение составило $\varepsilon_n^{max} = 1,08$ м, а максимальное расстояние до программной точки составило $\varepsilon_d^{max} = 3,01$ м.

Максимальное отклонение в процессе движения при неизменных параметрах составило $\varepsilon_n^{max} = 11,5$ см, а максимальное расстояние до программной точки составило $\varepsilon_d^{max} = 2,45$ м. Процессы изменения отклонения от траектории в процессе движения, скорости и расстояния до программной точки показаны на рис. 3.



Рисунок 3 – Процесс изменения указанных переменных при настроенной СУ на основе принципа виртуальной траектории $v = scale(M/c); \epsilon_n = scale \cdot 10(M); \epsilon_d = scale(M); y = scale \cdot 0,25 (M)$

2.3 Исследование движения НПА в горизонтальной плоскости при изменении его параметров

При размещении груза относительно аппарата одновременно будут меняться сразу несколько параметров модели. Тривиальным является тот факт, что какой бы груз не размещался относительно аппарата каким-либо образом, масса *m* аппарата и компонент тензора инерции I_{zz} увеличатся. В случае, где центр масс груза не совпадает с центром масс аппарата, их общий центр масс также сместится, следовательно, могут изменится координаты центра масс (x_g , y_g). Размещение груза снаружи аппарата изменяет влияние жидкости на движение НПА. В рассматриваемом случае плоского движения могут измениться присоединенные массы жидкости λ_{11} , λ_{22} , λ_{66} , λ_{12} , λ_{16} и λ_{26} , коэффициенты вязкого трения d_{1x} , d_{1y} , d'_{1z} , d_{2x} , d_{2y} и d'_{2z} .

Для каждой конфигурации размещенного груза параметры аппарата изменятся уникальным образом. Поэтому имеет смысл варьировать каждый параметр модели НПА по отдельности. В настоящей работе каждый из параметров будет увеличен в 2 раза. Качество работы СУ определяется максимальным отклонением от траектории в процессе всего движения, поэтому для отслеживания изменений в поведении системы в работе будут рассмотрены относительные изменения максимального отклонения при изменении указанных параметров.

При варьировании параметров имеет смысл отслеживать изменение величин отклонения от траектории ε_n , максимальное отклонение от траектории в процессе движения ε_n^{max} , расстояние до программной точки ε_d и максимальное расстояние до программной точки в процессе движения ε_d^{max} . Также представляет интерес изменение нагрузки на ДРК, поэтому ниже также будут отслеживаться величины проекций тяг движительного комплекса на оси ССК, а именно проекция на продольную ось $\tau_{\partial x}$ и создаваемый ДРК момент относительно вертикальной оси $M_{\partial z}$.

Влияние изменения параметров на качество движения будет рассмотрено на примере двух СУ: линейной (ПД-регуляторы) и СУ, синтезированной с помощью принципа виртуальной траектории.

На рис. 4 показаны процессы изменения $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_d(t)$ при увеличении массы в два раза при использовании линейной СУ (рис. 4а) и при использовании СУ на основе принципа виртуальной траектории (рис. 4б).



Рисунок 4 – Сравнение процессов изменения отклонения ε_n и расстояния до программной точки ε_d при неизменной и удвоенной массе: а – линейная СУ, $\varepsilon_n = scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м), б – СУ на принципе ВТ, $\varepsilon_n = 10 \cdot scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м)

При увеличении массы в 2 раза со 100 кг до 200 кг, максимальное отклонение от траектории в процессе движения увеличивается с 1,08 м до 1,82 м в случае использования линейной СУ, то есть в данном случае отклонение возросло в 1,7 раз. Максимальное расстояние до программной точки в данном случае увеличится с 3 м до 4,2 м, то есть в 1,4 раз. При использовании СУ на основе принципа виртуальной траектории, максимальное отклонение от траектории увеличится с 11,5 см до 22,7 см, в 1,96 раз. При этом максимальное расстояние до программной точки в процессе движения увеличится с 2,45 м до 3,22 м, в 1,3 раз.

На рис. 5 показано сравнение $\tau_{\partial x}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при массах 100 кг и 200 кг в случае использования обеих используемых выше СУ.



Рисунок 5 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК при неизменной и удвоенной массе: а – линейная СУ, δ – СУ на принципе BT, $\tau_{\partial x} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

Для линейной СУ удвоение массы приводит к повышению максимальной величины проекции тяг движителей на продольное направление $\tau_{\partial x}^{max}$ с 31 H до 43,4 H, то есть продольная составляющая нагрузки на ДРК увеличивается в 1,4 раза. Максимальный развиваемый ДРК момент $M_{\partial z}^{max}$ также увеличивается в 1,2 раза с 11,6 Hм до 14 Hм.

Для СУ, синтезированной на основе принципа виртуальной траектории, максимальная сила $\tau_{\partial x}^{max}$, развиваемая ДРК вдоль продольной оси ССК, увеличилась с 24,7 H до 33,9 H, в 1,37 раз. Максимальный момент $M_{\partial z}^{max}$ незначительно возрос менее чем на 1% с 8,69 Hм до 8,76 Hм.

Следует отметить, что при повышении массы вдвое появляются затухающие колебания величин $\tau_{\partial x}$ $M_{\partial z}$ для обеих рассмотренных СУ, однако колебания проявились сильнее для случая системы на основе принципа виртуальной траектории.

Далее рассмотрим увеличение в два раза коэффициентов вязкого трения. Настройка СУ осуществлялась при параметрах $d_{1x} = 5$ кгс⁻¹ и $d_{2x} = 10$ кгм⁻¹, а изменение осуществлялось при $d_{1x} = 10$ кгс⁻¹ и $d_{2x} = 20$ кгм⁻¹. В этом случае максимальное отклонение от траектории в процессе движения увеличивается с 1,08 м до 1,19 м в случае использования линейной СУ, то есть в данном случае отклонение возросло в 1,1 раз. Максимальное расстояние до программной точки в данном случае увеличится с 3,01 м до 4,1 м, то есть в 1,36 раз.

При использовании СУ на основе принципа виртуальной траектории, максимальное отклонение от траектории увеличится с 11,5 см до 14,2 см, в 1,2 раза. При этом максимальное расстояние до программной точки в процессе движения увеличится с 2,5 м до 3,5 м, в 1,4 раз.

На рис. 6 показаны процессы изменения $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_d(t)$ при увеличении коэффициентов вязкого трения d_{1x} и d_{2x} в два раза при использовании линейной СУ (рис. 6а) и при использовании СУ на основе принципа виртуальной траектории (рис. 6б).



Рисунок 6 – Сравнение процессов изменения отклонения ε_n и расстояния до программной точки ε_d при неизменных и удвоенных коэффициентах вязкого

трения d_{1x} и d_{2x} : а – линейная СУ, $\varepsilon_n = scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м),

б – СУ на принципе ВТ, $\varepsilon_n = 10 \cdot scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м)

Одновременное увеличение коэффициентов вязкости приводит к возрастанию нагрузки на ДРК. Для линейной СУ максимальный продольный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ увеличился в 1,38 раз с 30 H до 41,3 H, а максимальный момент $M_{\partial z}$, развиваемый ДРК относительно вертикальной оси увеличивается на 2% (с 11,6 Hм до 11,83 Hм).

При использовании СУ на основе принципа виртуальной траектории максимальный продольный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ возрастает с 24,7 Н до 35,8 Н, то есть в

1,45 раз. Максимальный развиваемый движителями момент $M_{\partial z}$ относительно вертикальной оси возрастает на 17% с 8,7 Нм до 10,2 Нм.

На рис. 7 показано сравнение $\tau_{\partial x}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при одновременном удвоении линейного d_{1x} и квадратичного d_{2x} коэффициентов вязкого трения вдоль продольной оси ССК для линейной СУ (рис. 7а) и для СУ, синтезированной на основе принципа виртуальной траектории (рис. 7б).



Рисунок 7 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК при неизменных и удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1x} и d_{2x} : а – линейная СУ, б – СУ на принципе ВТ,

$$\tau_{\partial x} = scale (H), M_{\partial z} = scale (HM)$$

При увеличении в два раза коэффициентов вязкого трения с $d_{1y} = 10$ кгс⁻¹ и $d_{2y} = 20$ кгм⁻¹ до 20 кгс⁻¹ и 40 кгм⁻¹ соответственно, и для линейной СУ, и для СУ на принципе виртуальной траектории, отклонение от траектории в процессе движения снижается. Это особенность проявляется изза того, что увеличение демпфирования по поперечному каналу приводит к снижению заноса, что и приводит как к уменьшению отклонения, так и к снижению нагрузки на движительный комплекс.

На рис. 8 показаны процессы изменения $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_d(t)$ при увеличении коэффициентов вязкого трения d_{1y} и d_{2y} в два раза при использовании линейной СУ (рис. 8а) и при использовании СУ, синтезированной на основе принципа виртуальной траектории (рис. 8б).



Рисунок 8 – Сравнение процессов изменения отклонения ε_n и расстояния до программной точки ε_d при неизменных и удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1y} и d_{2y} : а – линейная СУ, $\varepsilon_n = scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м),

 δ – СУ на принципе ВТ, $\varepsilon_n = 10 \cdot scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м)

В случае использования линейной СУ максимальное отклонение от траектории в процессе движения уменьшилось в 1,95 раз с 1,08 м до 0,55 м, а максимальное расстояние до программной точки уменьшилось в 1,15 раз с 3,01 м до 2,61 м. В случае СУ, использующей принцип виртуальной траектории, максимальное отклонение от траектории в процессе движения увеличилось в 2 раза с 11,5 см до 5,7 см, а максимальное расстояние до программной точки увеличилось в 1,04 раз с 2,449 м до 2,347 м.

Процессы изменения $\tau_{\partial x}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при одновременном удвоении линейного d_{1y} и квадратичного d_{2y} коэффициентов вязкого трения для обеих рассматриваемых СУ показаны на рис. 9.



Рисунок 9 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК при неизменных и удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1y}

и
$$d_{2y}$$
: а – линейная СУ, б – СУ на принципе ВТ,
 $\tau_{\partial x} = scale$ (Н), $M_{\partial z} = scale$ (Нм)

Максимальный продольный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ для линейной СУ снизился на 16% с 31 H до 26,8 H, а максимальное значение момента $M_{\partial z}^{max}$ снизилось в 1,5 раз с 11,6 Hм до 7,8 Hм. Для СУ на основе принципа виртуальной траектории $\tau_{\partial x}^{max}$ снизился на 3% с 24,7 H до 23,9 H, а значение $M_{\partial z}^{max}$ снизилось на 4% с 8,69 Hм до 8,33 Hм.

Рассмотрим увеличение в два раза присоединенной массы жидкости λ_{11} с 20 кг до 40 кг. На рис. 10 показаны процессы изменения $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_d(t)$ при увеличении λ_{11} в два раза для обеих рассматриваемых СУ.





присоединенной массы λ_{11} : a – линейная СУ, $\varepsilon_n = scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м), б – СУ на принципе ВТ, $\varepsilon_n = 10 \cdot scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м) В случае использования линейной СУ НПА максимальное отклонение от траектории в процессе движения увеличилось в 1,4 раза с 1,08 м до 1,55 м, а максимальное расстояние до программной точки увеличилось на 7% с 3,01 м до 3,22 м. При использовании СУ НПА на основе принципа виртуальной траектории максимальное отклонение от траектории увеличилось с 11,5 см до 15,2 см, то есть в 1,32 раз, а максимальное расстояние до программной точки в процессе движения увеличилось менее, чем на 1%.

Процессы изменения $\tau_{\partial x}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при удвоении λ_{11} для обеих рассматриваемых СУ показаны на рис. 11.



Рисунок 11 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК при неизменной и удвоенной величине присоединенной массы

$$\lambda_{11}$$
: а – линейная СУ, б – СУ на принципе ВТ,
 $\tau_{\partial x} = scale$ (Н), $M_{\partial z} = scale$ (Нм)

Процессы изменения $\varepsilon_n(t)$ и $\varepsilon_d(t)$ при увеличении присоединенной массы жидкости λ_{22} с 40 кг до 80 кг показаны на рис. 12 как в случае

использования линейной СУ (рис. 12а), так и в случае использования СУ на основе принципа ВТ (рис. 12б).



Рисунок 12 – Сравнение процессов изменения отклонения ε_n и расстояния до программной точки ε_d при неизменной и удвоенной величине присоединенной массы λ₂₂:

а – линейная СУ, $\varepsilon_n = scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м), б – СУ на принципе ВТ, $\varepsilon_n = 10 \cdot scale$ (м); $\varepsilon_d = scale$ (м)

Увеличение в два раза присоединенной массы жидкости приводит к снижению максимального отклонения в процессе движения в 1,66 раз с 1,08 м до 0,65 м при использовании линейной СУ НПА. В то же время, максимальное расстояние до программной точки увеличивается на 5% с 3,01 м до 3,18. Подобная тенденция прослеживается и для СУ на основе принципа виртуальной траектории, где максимальное отклонение уменьшается в 1,46 раз с 11,5 см до 7,9 см, а максимальное расстояние до программной точки увеличивается с 2,5 м до 2,8 м, то есть в 1,14 раз.

Процессы изменения $\tau_{\partial x}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при удвоении λ_{22} для обеих рассматриваемых СУ показаны на рис. 13.



Рисунок 13 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК при неизменной и удвоенной величине присоединенной массы λ_{22} : а – линейная СУ, б – СУ на принципе ВТ, $\tau_{\partial x} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

В случае линейной СУ максимальное значение $\tau_{\partial x}^{max}$ увеличилось на 14% с 30,1 H до 34,4 H, а $M_{\partial z}^{max}$ увеличилось в 2,7 раз с 11,6 Hм до 31,3 Hм. В случае СУ, работающей на принципе виртуальной траектории, максимальный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ увеличился на 11% с 24,7 H до 27,42 H, а $M_{\partial z}^{max}$ также как и в случае линейной СУ значительно возрос в 3 раза с 8,7 Hм до 26,9 H. Подобное возрастание нагрузки на ДРК может привести к вхождению движителей в режим насыщения и следующего за ним схода с траектории.

Удвоение момента инерции I_{zz} , присоединенной массы жидкости λ_{66} и коэффициентов вязкого трения d'_{1z} и d'_{2z} приводят к увеличению и максимального отклонения, и максимального расстояния до программной точки менее чем на 1%. Поэтому детальное рассмотрение влияния изменения этих параметров на движение является излишним.

Рассмотрим также смещение центра масс вдоль продольной оси. При смещении ЦМ назад на 0,5 м, то есть $x_g = -0,5$ м максимальное отклонение от траектории и максимальное расстояние до программной точки увеличиваются менее чем на 5%. Однако при смещении центра масс вперед более чем на 1,2 см происходит потеря устойчивости по каналу курса.

Рассмотрев особенности поведения обеих синтезированных СУ НПА при варьировании параметров аппарата можно заключить, что действительно происходит кратное ухудшение качества работы обеих СУ.

В реальности при добавлении груза или избавления от него одновременно изменяются сразу несколько связанных друг с другом параметров. Нелинейность всей системы позволяет говорить только о качественной суперпозиции изменений качества работы СУ при изменении нескольких параметров одновременно, а для количественной оценки следует проводить дополнительные исследования.

Таким образом, было выявлено ухудшение качества работы обеих СУ НПА при изменении параметров, которые в совокупности изменятся при размещении груза.

З РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СУ НПА, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Целью третьей главы является разработка адаптивного регулятора, предназначенного для приведения динамических свойств НПА с измененными параметрами движения к таким динамическим свойствам НПА, при которых производилась настройка СУ.

Предполагается, что параметры груза и способ его размещения известен, а значит известны измененные параметры НПА с присоединенным грузом, которые могут быть найдены с помощью одного из известных методов, описанных во введении.

3.1 Синтез адаптивного регулятора, учитывающего изменение динамических характеристик НПА

Разрабатываемый метод синтеза основан на принципе, описанном в работе [69]. Математическая модель ДРК и движения НПА полностью описывается выражениями (1), (9). Получим объединенное дифференциальное уравнение динамики всей системы, подставив в (9) вектор тяги и моментов движителей из (1), а также его производную по времени, определяя её дифференцированием (1), и которая будет иметь вид:

$$\dot{\tau}_{\partial} = \mathsf{M}\ddot{v} + \frac{d}{dt}(\mathsf{C}(v)v) + \frac{d}{dt}(\mathsf{D}(v)v) + \frac{d}{dt}(\mathsf{g}(\mathsf{x})).$$
(10)

Получим выражения для трех последних слагаемых выражения (10). Согласно правилам матричного дифференцирования:

$$\frac{d}{dt}(\mathcal{C}(v)v) = \frac{d}{dt}(\mathcal{C}(v))v + \mathcal{C}(v)\dot{v}.$$
(11)

Выразим производную матрицы C(v) по времени. Исходя из определяющего её выражения (5) видно, что не зависящие от времени матрицы $M_{11}, M_{12}, M_{21}u M_{22}$ размера 3х3, входят в её состав в качестве множителей при векторах линейной v_b и угловой скорости ω_b . Следовательно, производная по времени всей матрицы кориолисовых и центробежных сил имеет такой же вид, как и сама матрица, но с замененными $v_b u \omega_b$ на \dot{v}_b и $\dot{\omega}_b$ соответственно. Следовательно, $\frac{d}{dt}(C(v)) = C(\dot{v})$.

Выразим производную по времени матрицы сил и моментов вязкого трения. Исходя из определения матрицы D(v) (6) запишем:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{D}(v)v) = \mathbf{D}_1 \dot{v} + \frac{d}{dt}(\mathbf{D}_2(v)v).$$
(12)

Так как матрица $D_2(v)$ является диагональной, то каждый из шести компонентов второго слагаемого правой части выражения (12) будет иметь вид $d_{2i}|v_i|v_i$, где d_{2i} и v_i – i-е компоненты диагональной матрицы $D_2(v)$ и вектора скорости v. При дифференцировании каждой из компонент второго слагаемого правой части выражения (12) получается выражение $2d_{2i}|v_i|\dot{v}_i$, используя которое можно переписать выражение (12) в матричной форме:

$$\frac{d}{dt}(D(v)v) = D_1\dot{v} + 2D_2(v)\dot{v} = (D_1 + 2D_2(v))\dot{v} = D^d(v)\dot{v},$$
(13)

где $D^{d}(v) = D_1 + 2D_2(v)$ – матрица производных сил и моментов вязкого трения, также являющаяся диагональной.

Производная гидростатических сил и моментов по времени находится дифференцированием каждого компонента вектора g(x), определенного выражением (7):

$$\dot{g}(x,\dot{x}) = \frac{d}{dt}(g(x)) = \begin{bmatrix} (W - B)c\theta \dot{\theta} \\ (W - B)(-c\theta c\phi \dot{\phi} + s\theta s\phi \dot{\theta}) \\ (W - B)(c\theta s\phi \dot{\phi} + s\theta c\phi \dot{\theta}) \\ -(y_g W - y_b B)(-c\theta s\phi \dot{\phi} - s\theta c\phi \dot{\theta}) \\ (z_g W - z_b B)c\theta \dot{\theta} \\ -(x_g W - x_b B)(c\theta c\phi \dot{\phi} - s\theta s\phi \dot{\theta}) \end{bmatrix} + (14)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (z_g W - z_b B)(c\theta c\phi \dot{\phi} - s\theta s\phi \dot{\theta}) \\ (x_g W - z_b B)(c\theta c\phi \dot{\phi} - s\theta c\phi \dot{\theta}) \\ (y_g W - y_b B)c\theta \dot{\theta} \end{bmatrix},$$

где с $:= \cos(\cdot)$ и s $:= \sin(\cdot)$.

Таким образом, имея в виду полученные выражения (11), (13), (14), подставим их в выражение (10), которое, вместе с выражением (1), подставим в выражение (9), которое, в свою очередь, будет иметь вид:

$$\tau_d = T \operatorname{M} \ddot{v} + (T \operatorname{C}(v) + T \operatorname{D}^{\mathrm{d}}(v) + \operatorname{M}) \dot{v} + (T \operatorname{C}(\dot{v}) + \operatorname{C}(v) + \operatorname{D}(v)) v + (T \dot{g}(x, \dot{x}) + g(x)).$$
(15)

Предположим, параметры модели HΠA, что при которых осуществлялся синтез линейной СУ известны, а именно: известна матрица инерции М₀, компоненты соответствующей ей матрицы кориолисовых сил $C_0(v)$, компоненты матрица сил и моментов вязкого трения $D_0(v)$, а также координаты центра масс, центра водоизмещения, величины сил тяжести и Архимедовой силы, которые, В свою очередь, определяют вектор гидростатических сил и моментов $g_0(x)$. Предположим также, что параметры модели НПА с измененной массой и формой известны и определены также матрицами M, C(v), D(v) и вектором g(x) соответственно.

С учетом введенных обозначений, выражение (15) будет описывать динамику системы с измененными параметрами, а выражение, описывающее динамику системы с параметрами, при которых производилась настройка линейного регулятора, будет иметь вид, аналогичный виду выражения (15):

$$\tau_{d0} = T M_0 \ddot{v} + (T C_0 (v) + T D_0^d (v) + M_0) \dot{v} + + (T C_0 (\dot{v}) + C_0 (v) + D_0 (v)) v + (T \dot{g}_0 (x, \dot{x}) + g_0 (x)).$$
(16)

Задача синтеза адаптивного регулятора сводится к тому, чтобы к вектору программных сигналов τ_d из выражения (15) добавить такой вектор программных сигналов $\Delta \tau_d \in \mathbb{R}^6$, чтобы система, описываемая выражением (15) имела динамические свойства системы (16). Этот вектор определяется вычитанием выражения (16) из выражения (15):

$$\Delta \tau_{d} = \tau_{d} - \tau_{d0} = T \Delta M \ddot{v} + (T \Delta C(v) + T \Delta D^{d}(v) + \Delta M) \dot{v} + (T \Delta C(\dot{v}) + \Delta C(v) + \Delta D(v)) v + (T \Delta \dot{g}(x, \dot{x}) + \Delta g(x)),$$
(17)

где $\Delta \tau_d = [\Delta \tau_{dx} \quad \Delta \tau_{dy} \quad \Delta \tau_{dz} \quad \Delta M_{dx} \quad \Delta M_{dy} \quad \Delta M_{dz}]^T \in \mathbb{R}^6, \ \Delta M = M - M_0,$ $\Delta C(v) = C(v) - C_0(v),$ и т.д.

Сигнал вида (17), в общем случае, можно сформировать, если имеется возможность получать данные с датчиков линейных и угловых ускорений и скоростей, с датчиков углов крена и курса, а также скоростей изменения во времени углов крена и курса, при этом первое слагаемое правой части матричного выражения (17), содержащее вторую производную скорости по времени, можно опустить вследствие малости величины. Выражение (17) можно представить в виде шести дифференциальных уравнений, соответствующих движению вдоль каждой степени свободы. В случае движения в горизонтальной плоскости, третье, четвёртое и пятое дифференциальные уравнения системы (17) не участвуют в движении.

Используем двухканальные СУ, синтезированные в предыдущей главе (линейную и на основе принципа виртуальной траектории), добавим в неё адаптивный регулятор, три сигнала на выходе которого являются правыми частями первого, второго и шестого уравнения системы (17), соответствующие выражениям для $\Delta \tau_{dx}$, $\Delta \tau_{dy}$ и ΔM_{dz} .

Важно отметить, что в синтезированных в предыдущей главе СУ используются два канала: τ_{dx} и M_{dz} . Нетрудно, однако, заметить из системы (17), что при движении в горизонтальной плоскости и $\Delta M \neq 0, \Delta C(v) \neq 0$ и $\Delta D(v) \neq 0$ (то есть при измененных параметрах движения НПА), сигнал $\Delta \tau_{dv}$ также не будет нулевым. Это означает, что если при движении в горизонтальной плоскости с измененными параметрами ΗΠА не осуществлять нелинейную коррекцию вида (17) по каналу поперечного движения, то изменение динамических свойств НПА будет компенсировано вследствие обеспечивается не полностью, чего не эквивалентность динамических свойств системы с изменёнными параметрами НПА и системы с теми параметрами НПА, при которых производилась настройка СУ. Это приводит к необходимости введения нелинейной коррекции, определяемой вторым уравнением системы (17) по каналу поперечного движения. Структурная схема двухканальной СУ на основе ПД-регуляторов с нелинейной трехканальной коррекцией представлена 14. на рис.



Рисунок 14 – Структура СУ с адаптивным нелинейным регулятором (ПУДК – подсистема управления движительным комплексом)

На вход нелинейного регулятора подаются только те параметры системы, которые участвуют в движении в горизонтальной плоскости, а именно: скорость и ускорение системы $X = [\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{\omega}_z, v_x, v_y, \omega_z] \in \mathbb{R}^6$ и параметров ΗΠΑ вектор текущих модели движения q = $[m, \mathbf{x}_{g}, \mathbf{y}_{g}, I_{zz}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{16}, \lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}, d_{1x}, d_{1y}, d'_{1z}, d_{2x}, d_{2y}, d'_{2z}] \in \mathbf{R}^{16}.$ Ha основе этих параметров и параметров НПА, при которых производилась настройка СУ, при помощи первого, второго и шестого уравнения системы (17) формируются три программных сигнала $\Delta \tau_{dx}$, ΔM_{dz} и $\Delta \tau_{dy}$. Первые два сигнала суммируются с сигналами, поступающими из СУ, а третий напрямую подается на вход контура управления ДРК. Также следует первое слагаемое выражения (17) содержит вторую отметить, что производную скорости, что означает необходимость дифференцирования, вследствие чего это слагаемое было опущено при моделировании.

3.2 Исследование работы адаптивной СУ НПА при изменении параметров аппарата.

Для проверки работоспособности разработанной адаптивной коррекции рассмотрим работу двух адаптивных систем, в первой из которых в качестве

предварительно настроенной СУ будет линейная СУ движением в горизонтальной плоскости, разработанная во второй части работы, а в качестве второй – СУ, использующая принцип виртуальной траектории, также синтезированная выше в пункте 2.2.

В пункте 2.3 было выяснено, что основное изменение качества работы обеих СУ (без адаптивной коррекции) приходится на изменение следующих параметров: массы m, коэффициентов вязкого трения d_{1x} , d_{2x} , d_{1y} и d_{2y} и присоединённых масс λ_{11} и λ_{22} . Рассмотрим работу обеих СУ без адаптивной коррекции и с адаптивной коррекции и отследим улучшение качества работы в результате введения адаптивной коррекции. Во избежание ситуации, при которой высокая точность движения достигается за счет повышения нагрузки следует также отслеживать развиваемые ДРК силы и моменты, а именно упоры вдоль продольной $\tau_{\partial x}$ и поперечной $\tau_{\partial y}$ осей ССК, а также проекцию создаваемого ДРК момента на вертикальную ось ССК $M_{\partial z}$.

Рассмотрим увеличение массы в 2 раза со 100 кг до 200 кг. При добавления адаптивной коррекции в линейную СУ максимальное отклонение увеличилось на 0,7% и составило 1,09 м. Без использования адаптивной коррекции отклонение увеличилось в 1,7 раз и составило 1,82 м. Таким образом адаптивная коррекция, примененная к линейной СУ, снизила увеличение максимального отклонения от траектории на 0,73 м. Такое улучшение не приводит к кратному возрастанию нагрузки на ДРК. При двукратном увеличении массы, по сравнению с линейной СУ без адаптивной коррекции, добавление последней приводит к возрастанию $\tau_{\partial x}^{max}$ всего на 10% с 43,4 H до 47,4 H. Величина $M_{\partial z}^{max}$ и вовсе снизилась в 1,2 раза с 14 Hм до 11,5 Hм. Адаптивная коррекция подразумевает возможность управления поперечным каналом движения. Максимальный упор в поперечном направлении $\tau_{\partial y}^{max}$ в данном случае составил 11,4 H. Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при удвоенной массе для линейной СУ с адаптивной СУ с



Рисунок 15 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в линейной СУ в случае двойной массы без использования и с

использованием адаптивной коррекции,

 $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial v} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (HM)

В случае, если адаптивная коррекция добавляется к СУ на основе виртуальной траектории, то при удвоении массы максимальное отклонение от траектории увеличивается на 2% с 11,5 см до 11,8 см. Без адаптивной коррекции максимальное отклонение увеличивалось в 1,96 раз и составляло 22,7 см. Таким образом адаптивная коррекция снизило увеличение отклонения в 98 раз. При этом не наблюдается кратного увеличения нагрузки на ДРК: по сравнению с СУ без адаптивной коррекции, при удвоении массы $\tau_{\partial x}^{max}$ возрастает на 10% с 33,9 H до 37,6 H, а величина $M_{\partial z}^{max}$ уменьшается на 1% и составила 8,64 Hм. Максимальный упор в поперечном направлении $\tau_{\partial y}^{max}$ в данном случае составил 13,8 H. Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при удвоенной массе для СУ на основе виртуальной траектории с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 16.



Рисунок 16 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в СУ на принципе ВТ в случае двойной массы без использования

и с использованием адаптивной коррекции,

 $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (HM)

Увеличение в два раза коэффициентов вязкого трения с $d_{1x} = 5 \text{ кгc}^{-1}$ и $d_{2x} = 10 \text{ кгм}^{-1}$ до $d_{1x} = 10 \text{ кгc}^{-1}$ и $d_{2x} = 20 \text{ кгм}^{-1}$ при введении адаптивной коррекции в линейную СУ приводит к увеличению максимального отклонения менее чем на 0,1%. Без адаптивной коррекции максимальное отклонение при удвоении указанных коэффициентов увеличивалось на 10%. Сравним нагрузки на ДРК при увеличении коэффициентов вязкого трения: максимальный продольный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ на 2,7% больше в случае использования адаптивной коррекции и составляет 43 Н. Для линейной СУ с адаптивной коррекцией момент ДРК относительно вертикальной оси $M_{\partial z}^{max}$ снизился на 2,3% и составил 11,6 Нм.

Удвоение коэффициентов вязкого трения d_{1x} и d_{2x} при ведении адаптивной коррекции в СУ на основе принципа виртуальной траектории приводит к увеличению максимального отклонения от программной траектории менее чем на 1%. Без адаптивной коррекции максимальное отклонение увеличивается в 1,4 раз. При удвоении указанных параметров

максимальный продольный упор $\tau_{\partial x}^{max}$ в случае СУ с адаптивной коррекцией больше, чем в случае СУ без адаптивной коррекции на 5% и составляет 37,9 Н, а максимальный момент ДРК относительно вертикальной оси $M_{\partial z}^{max}$ меньше на 17% и составляет 8,7 Нм. И для линейной СУ с адаптивной коррекцией, и для СУ на основе принципа ВТ с адаптивной коррекцией при увеличении d_{1x} и d_{2x} продольный упор $\tau_{\partial y}$ равен нулю в процессе всего движения.

На рис. 17 представлено сравнение $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1x} и d_{2x} для линейной СУ с адаптивной коррекцией и без неё (рис. 17а), а также для СУ на основе виртуальной траектории с адаптивной коррекцией и без неё (рис. 17б).



Рисунок 17 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в случае удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1x} и d_{2x} без использования и с использованием адаптивной коррекции:

а – линейная СУ, б – СУ на принципе ВТ,

$$\tau_{\partial x} = scale$$
 (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

Рассмотрим увеличение в два раза коэффициентов вязкого трения с $d_{1y} = 10$ кгс⁻¹ и $d_{2y} = 20$ кгм⁻¹ до 20 кгс⁻¹ и 40 кгм⁻¹ соответственно.

Максимальное отклонение от программной траектории при таком увеличении в случае использования линейной СУ с адаптивной коррекцией уменьшается менее чем на 1%, а без адаптивной коррекции уменьшается в 1,95 раз. При этом максимальный упор вдоль продольной оси τ_{dx}^{max} возрастает на 15%, а максимальный момент ДРК относительно вертикальной оси M_{dz}^{max} увеличивается в 1,5 раз по сравнению с максимальным упором в линейной СУ без адаптивной коррекции. При использовании адаптивной коррекции максимальный упор вдоль поперечной оси τ_{dy}^{max} в процессе движения составляет 15,7 Н.

Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при увеличенных вдвое коэффициентах вязкого трения d_{1y} и d_{2y} для линейной СУ с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 18.



Рисунок 18 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в линейной СУ в случае удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1y} и d_{2y} без использования и с использованием адаптивной коррекции, $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

При удвоении указанных выше коэффициентов вязкого трения при использовании СУ на основе принципа ВТ с адаптивной коррекцией,

максимальное отклонение от траектории в процессе движения уменьшится менее чем на 1%, а без адаптивной коррекции максимальное отклонение от траектории снизится в 2 раза. В процессе движения с СУ с адаптивной коррекцией максимальный упор $\tau_{\partial x}$ больше на 3% максимального упора при движении без адаптивной коррекции при удвоении коэффициентов вязкого трения и составляет 24,7 H, а момент относительно вертикальной оси $M_{\partial z}^{max}$ при использовании СУ с адаптивной коррекцией больше на 5% чем при использовании СУ без адаптивной коррекции и составляет 8,34 Hм. В случае использования адаптивной коррекции максимальный упор в поперечном направлении $\tau_{\partial y}^{max}$ в процессе движения составляет 15,9 H.

Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при увеличенных в два раза коэффициентах вязкого трения d_{1y} и d_{2y} для СУ на основе виртуальной траектории с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 19.



Рисунок 19 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в СУ на принципе ВТ в случае удвоенных коэффициентах вязкого трения d_{1y} и d_{2y} без использования и с использованием адаптивной коррекции, $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

Можно сделать вывод, что использование адаптивной коррекции как для линейной СУ, так и для СУ на основе принципа ВТ в случае увеличения коэффициентов вязкого трения d_{1y} и d_{2y} нецелесообразна, так как без адаптивной коррекции точность движения вдоль траектории выше.

Рассмотрим увеличение в два раза присоединенной массы жидкости λ_{11} с 20 кг до 40 кг. В случае использования линейной СУ с адаптивной коррекцией максимальное отклонение от траектории в процессе движения уменьшается менее чем на 1%, тогда как без использования адаптивной коррекции максимальное отклонение от траектории увеличивается в 1,4 раза. Что касается нагрузки на ДРК, то нагрузка на движители в продольном направлении τ_{dx}^{max} уменьшилась на 2% и момент, развиваемый ДРК относительно вертикальной оси M_{dz}^{max} , уменьшился на 13% по сравнению с нагрузкой, которую испытывает ДРК при использовании СУ без адаптивной коррекции. При этом максимальный упор в поперечном направлении $\tau_{dy}(t)$ при использовании СУ с адаптивной коррекцией составляет 3,9 Н.

В случае использования СУ на основе принципа ВТ с адаптивной коррекцией, то увеличение вдвое присоединенной массы λ_{11} приводит к уменьшению максимального отклонения в процессе движения менее чем на 1%, тогда как без адаптивной коррекции максимальное отклонение увеличивается в 1,3 раза. При этом максимальный продольный упор ДРК в процессе движения τ_{dx}^{max} при использовании СУ с адаптивной коррекцией больше этого же параметра в случае без использования адаптивной коррекцие на 8%, а момент, развиваемый ДРК относительно вертикального направления M_{dz}^{max} при использовании СУ с адаптивной коррекцией меньше на 10% этой же величины, только без использования адаптивной коррекции.

Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при увеличенной вдвое присоединенной массе жидкости λ_{11} для линейной СУ с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 20, а для СУ на основе принципа виртуальной траектории с адаптивной коррекцией и без неё – на рис. 21.



Рисунок 20 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в линейной СУ в случае удвоенной величины присоединенной массы λ₁₁ без использования и с использованием адаптивной коррекции,

scale $au_{\partial x}$ 20 $au_{\partial x \, |}^{adapt}$ 10adapt $M^{adapt}_{\partial z}$ ∂y $M_{\partial z}^{\downarrow}$ 0 100 110120130140150t,c

 $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (HM)

Рисунок 21 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в СУ на принципе ВТ в случае удвоенной величины присоединенной массы λ_{11} без использования и с использованием адаптивной коррекции, $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

При увеличении в два раза присоединенной массы жидкости λ_{22} с 40 кг до 80 кг в случае линейной СУ с адаптивной коррекцией, максимальное отклонение от траектории увеличивается менее чем на 1%, а без адаптивной коррекции отклонение уменьшается в 1,7 раз. В случае использования СУ с адаптивной коррекцией, развиваемая ДРК максимальная сила вдоль продольной оси $\tau_{\partial x}^{max}$ больше на 10% силы, развиваемой ДРК при использовании СУ без адаптивной коррекции, а максимальный развиваемый ДРК момент относительно вертикальной оси $M_{\partial z}^{max}$ также на 10% больше момента, развиваемого ДРК в случае СУ без адаптивной коррекции. При этом максимальная величина поперечного упора $\tau_{\partial y}^{max}$ составляет 3,5 H.

Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при увеличенной вдвое присоединенной массе жидкости λ_{22} для линейной СУ с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 22.



Рисунок 22 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в линейной СУ в случае удвоенной величины присоединенной массы λ₂₂ без использования и с использованием адаптивной коррекции,

$$\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale (H), M_{\partial z} = scale (HM)$$

Результат моделирования СУ на основе принципа ВТ с адаптивной коррекцией показывает, что при увеличении присоединенной массы λ_{22} вдвое максимальное отклонение от программной траектории увеличивается на 1%, тогда как при использовании СУ без адаптивной коррекции отклонение уменьшается в 1,47 раз.

Изменение во времени величин $\tau_{\partial x}(t)$, $\tau_{\partial y}(t)$ и $M_{\partial z}(t)$ при увеличенной вдвое присоединенной массе жидкости λ_{22} для СУ на основе принципа виртуальной траектории с адаптивной коррекцией и без неё представлен на рис. 23.



Рисунок 23 – Сравнение создаваемых движителями проекций тяг и моментов на оси ССК в СУ на принципе ВТ в случае удвоенной величины присоединенной массы λ_{22} без использования и с использованием адаптивной коррекции, $\tau_{\partial x} = \tau_{\partial y} = scale$ (H), $M_{\partial z} = scale$ (Hм)

Суммируя написанное выше можно сделать вывод, что адаптивная коррекция значительно снижает ухудшение качества движения без повышения кратных нагрузок на ДРК в случаях, когда масса, присоединённая масса жидкости λ_{11} и коэффициенты вязкости d_{1x} и d_{2x}

возрастают. Эти параметры меняются при размещении груза внутри НПА или симметрично по бокам.

При увеличении присоединённой массы жидкости λ_{22} и коэффициентов вязкого трения d_{1y} и d_{2y} качество движения улучшается без адаптивной коррекции, а её добавление приводит к ухудшению качества. Поэтому при изменении этих параметров использование адаптивной коррекции возможно в случае, когда требуется избавиться от ухудшения качества движения, вызванного уменьшением этих параметров, то есть это случай, когда из НПА забирают груз. Перечисленные параметры меняются в случае, когда груз размещен сзади аппарата.

Проведенное исследование показало, что разработанная адаптивная коррекция позволяет сохранить заданную динамическую точность движения НПА вдоль траектории в случае изменения всех параметров, а особенно тех, которые приводили к значительному снижению точности движения в СУ без разработанной адаптивной коррекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации были получены следующие новые результаты:

1. Исследована модель НПА на предмет изменения качества движения вдоль криволинейных траекторий при кратном изменении параметров аппарата. Исследование проводилось на известных СУ: на линейной СУ и на СУ, синтезированной с помощью принципа виртуальной траектории. Определено качественное и количественное влияние изменения массы аппарата, присоединённых масс жидкости, коэффициентов вязкого трения и смещения центра масс.

2. Разработан метод синтеза адаптивных СУ, обеспечивающих сохранение требуемых качеств управления при изменении всех параметров НПА. Результаты проведенного моделирования подтвердили работоспособность и эффективность системы при изменении всех параметров, в том числе и тех, изменение которых приводило к ухудшению качества движения для СУ без адаптивной коррекции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Irion J., Ball D., Horrell E. The US Government's Role in Deepwater Archaeology: The Deep Gulf Wrecks Project // International Journal of Historical Archeology. – 2008. – No.12. – P. 75–81.
- Fjellstad O.E., Fossen T.I., Egeland O. Adaptive Control of ROVs with Actuator Dynamics and Saturation // Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, USA. – 1992. – P. 513–519.
- Chakrabarti S. Handbook of Offshore Engineering (2-volume set). Elsevier, 2005.
- Preedy J., Certificate in Subsea Engineering. Module 5. Underwater Operations, Subsea Maintenance and New Technologies // Azur Offshore Ltd, 2017.
- Yuh J., Marani G., Blidberg R. Applications of marine robotic vehicles // Intellegent Service Robotics. – 2011. – No.2. – P. 221–231.
- Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве – Владивосток: Дальнаука, 2016. – 400 с.
- Агеев М.Д. Автономные необитаемые подводные аппараты. Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.
- Пантов Е.Н., Махин Е.Е., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.:Судостроение, 1973. – 209 с.
- Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, 2011.
- Antonelly G. Underwater Robots. Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems – Springer-Verlag, 2006.
- Пельпор Д.С., Михалев И.А., Бауман В.А. Гироскопические приборы и системы: Учеб. для вузов по спец. «Гироскоп. приборы и устройства», 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 424 с.
- Ястребов В.С., Игнатьев М.Б., Кулаков Ф.М. и др. Подводные роботы. Л.:Судостроение, 1977. – 367 с.

- Автономные подводные роботы: системы и технологии/ под ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
- 14. Трупов А.Н. Математическая модель подводного аппарата с учетом динамических свойств управляющих систем // Проектирование подводных аппаратов. Сборник научных трудов. – 1990. – С. 35–40.
- Whitcom L.L., Yoerger D.R. Preliminary Experiments in the Model-Based Dynamic Control of Marine Thrusters // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1996. – P. 467–472.
- Yoerger D.R., Cooke J.G., Slotine J.-J.E. The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Vehicle Behavior and Their Incorporation into Control System Design // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1990. – Vol. 15. – No.3. – P. 167–178.
- Агеев М.Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА. Подводные роботы и их системы / Отв. ред. Л.В. Киселев. Под общ. ред. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – С. 33–49.
- Healey A.J., Rock S.M., Cody S., Miles D., Brown J.P. Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1995. – Vol. 20. – P. 354–361.
- Kim J. Thruster Modeling and Controller Design for Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) // Underwater Vehicles. – Rijeka, Croatia, Springer Verlag, 2009. – P. 235–251.
- 20. Kim J., Han J., Chung W.K., Yuh J. Accurate Thruster Modeling with Non-Parallel Ambient Flow for Underwater Vehicles // Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada. – 2005. – P. 1737–1742.
- 21. Kato N., Ito Y., Kojima J., S. Takagi, Asakawa K., Shirasaki Y. Control Performance of AUV AE 1000 for Inspection Underwater Cables // Proc. of OCEANS'94. – 1994. – P. 1135–1140.
- 22. Goheen K.R. Modeling Methods for Underwater Robotic Vehicle Dynamics // Journal of Robotic Systems. – 1991 – Vol .8. – No.3. – P. 295–317.

- Goheen K.R., Jefferys E.R. System Identification of ROV Dynamics // Proc. of the 8th Conf. on OMAE. Hague. – 1989. – P. 87–98.
- Khosla P., Kanade T. Parameter Identification of Robot Dynamics // Proc. of IEEE Conf. on decision and Control. Fort Lauderdale, USA. – 1985. – P. 1754–1760.
- 25. Lee P.M., Lee J.S., Hong S.W. Experimental Study of a Position Control System for ROV // Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conf. San Fran-cisco, USA. – 1992. – P. 533–539.
- 26. Ramadorai A.K., Tarn T.J. On Modeling and Adaptive Control of Underwater Robots // Journal of Robotics Systems. – 1993. – Vol. 5. – No.1. – P. 47–60.
- 27. Smith N.S., Crane J.W., Summey D.C. SDV Simulator Hydrodynamic Coefficients // NCSC Report, №TM-231-78. – 1978. – P. 82–96.
- 28. Smith R.N., Chyba M., Wilkens G.R., Catone C. A Geometrical Approach to the Motion Planning Problem for a Submerged Rigid Body // Int. Journal of Control. – 2009. – Vol. – 82. – No.9. – P. 1641–1656.
- 29. Craven P., Sutton R., Burns R. Control strategies for unmanned underwater vehicles // The Journal of Navigation. 1998. Vol. 51. No.1. P. 79–105.
- Roberts G., Sutton R. Advanced in unmanned marine vessels. Institute of Engeneering and Technology, Cornwall, UK, 2006. – 461 p.
- 31. Киселев Л.В. О точности стабилизации автономного подводного аппарата. Подводные роботы и их системы/ Отв. ред. Л.В. Киселев. Под общ. ред. М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – С. 84–93.
- 32. Hsu L., Costa R.R., Lizarralde F. ets. Underwater vehicle dynamic positioning based on a passive arm measurement system // Proc. of the Second International Advanced Robotics Programme Workshop on Mobile Robots for Subsea. Monterey, USA. – 1994.
- Mahesh H., Yuh J., Kakshmi R. A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator // Journal of Robotic Systems. – 1991. – Vol. 8. – No.3. – P. 339–370.

- 34. Perrier M., Canudas-de-Wit C. Experimental Comparison of PID vs. PID Plus Nonlinear Controller for Subsea Robots // Autonomous Robots. – 1996. – No.3. – P. 195–212.
- 35. Egeskov P., Bjerrum A., Pascoal A., Silvestre C., Aage C., Wagner Smitt L. De-sign, construction and hydrodynamic testing of the AUV MARIUS // Proceedings of the AUV Conference. Cambridge, Massachusetts. 1994. P. 199–207.
- 36. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1980. – 287 с.
- 37. Фомин В.Н., Фрадков А. Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динами-ческими объектами. – М.: Наука, 1981. – 447 с.
- 38. Narenda K., Annaswamy A. Stable adaptive systems. Prenice-Hall, 1989. –
 495 p.
- 39. Kooa M.-S., Choi H.-L., Lima J.-T. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback // Automatica. – 2011. – Vol. 47. – P. 2211–2217.
- 40. Lin W.-S., Yang P.-Ch. Adaptive critic motion control design of autonomous wheeled mobile robot by dual heuristic programming // Automatica. – 2008. – Vol. 44. – P. 2716–2723.
- 41. Rutkovsky V.Yu., Zemlyakov S.D., Sukhanov V.M., Glumov V.M. Modeling and adaptive attitude control of observation spacecrafts in view of flexible structure // Proc. of 17th IFAC Congress. Seoul, Korea. – 2008. – P. 3440– 3445.
- Slotine J.–J.E., Li W. On the Adaptive Control of Robot Manipulators // The Int. Journal of Robotics Research. – 1987. – Vol. 6. – No.3. – P. 49–59.
- 43. Cao J., Su Y., Zhao J. Design of an Adaptive Controller for Diveplane Control of a Torpedo-shaped AUV // Journal of Marine Science and Applications. 2011 Vol. 33. P. 333–339.
- 44. Sun Y.C., Cheah C.C. Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle // Robotica. 2008. Vol. 27. P. 119–129.

- 45. Громыко В.Д., Санковский Е.А. Самонастраивающиеся системы с моделью. М.: Энергия, 1974. 80 с.
- 46. Tao G. Adaptive control design and analysis John Wiley & Sons, Virginia, USA, 2003. 640 p.
- 47. Крутько П.Д. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными системами манипуляторов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1988. №4. С. 3–13.
- 48. Santhakumar M., Kim J. Modelling, simulation and model reference adaptive control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems // Proc. of 11th International Conference on Control, Automation and Systems. South Korea, KINTEX. – 2011. – P. 643–648.
- 49. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. Нижний Новгород: НГУ, 2006. 93 с.
- 50. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2003. – 303 с.
- 51. Haddadin S., Weis M., Wolf S., Albu-Schaeffer A. Optimal Control for Maximizing Link Velocity of Robotic Variable Stiffness Joints // Proc. of 18-th IFAC Congress. Milan, Italy. – 2011. – P. 6863–6871.
- 52. Xilin Y., Matthew G. A Nonlinear Position Controller for Maritime Operations of Rotary-Wing UAVs // Proc. of 18-th IFAC Congress, Milan, Italy. 2011. P. 1510–1515.
- 53. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
- 54. Slotine J.-J. Applied nonlinear control. Prentice-Hall, 1991. 461 p.
- 55. Дыда А.А. Синтез адаптивного и робастного управления исполнительными устройствами подводных роботов. Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 1998. – 346 с.
- 56. Filaretov V.F., Lebedev A.V. The Variable Structure System Synthesis for Autonomous Underwater Robot // Proc. of the 4th ECPD Int. Conf. on

Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems. Moscow, Russia. – 1998. – P. 417–421.

- 57. Guo J., Chiu F.-C., Huang C.-C. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. – 2003. – Vol. 30. – P. 2137–2155.
- 58. Lakhekar G.V. Tuning and Analysis of Sliding Mode Controller Based on Fuzzy Logic // International Journal of Control and Automation. – 2012 – Vol.
 5. – No.3. – P. 93–110.
- 59. Xu L., Dong C., Chen Y. An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Networked Control Systems // Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China. – 2007. – P. 1190–1195.
- 60. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Синтез системы автоматического формирования программных сигналов управления движением подводного аппарата по сложным пространственным траекториям // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – №1. – С. 99–107.
- 61. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ формирования программного управ-ления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – №4. – С. 167–176.
- 62. Filaretov V., Yukhimets D. Synthesis of Automatic System for Correction of Program Signal of the Underwater vehicle's Movement on Spatial Trajectory // CD-ROM Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2010. KINTEX, Korea. – 2010. – P. 126–131.
- 63. Filaretov V., Yukhimets D. The synthesis of AUV high-precision path following control system on the base of PD-controller //Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA), 2016 International Conference on. – IEEE, 2016. – C. 131-136.

- 64. Lamb H. Hydrodynamics //Hydrodynamics, by Horace Lamb and Foreword by Russ Caflisch, pp. 764. ISBN 0521458684. Cambridge, UK: Cambridge University Press, November 1993. – 1993. – C. 764.
- 65. Filaretov V. F., Lebedev A. V., Dyda A. A. The underwater robot thruster control system with non-linear correction and reference model self-adjustment //Control Conference (ECC), 1999 European. – IEEE, 1999. – C. 109-112.
- Yukhimets D., Filaretov V. Some features of vectored thruster autonomous underwater vehicle control //Annals of DAAAM & Proceedings. – 2007. – C. 821-823.
- 67. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Щербатюк А.Ф., Мурсалимов Э.Ш., Туфанов И.Е. Синтез и исследование системы контурного управления движением подводного аппарата // Труды всероссийского совещания по проблемам управления. Москва. – 2014. – С. 3338–3350.
- 68. Лебедев А.В. Синтез алгоритма и устройства формирования траектории движения динамического объекта с учетом ограничений на управляющие сигналы // Матер. IX Междунар. Четаевской конф. "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением". Иркутск. – 2007. – Т. 4. – С. 137–145.
- 69. Филаретов В. Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов //Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2000.

СОДЕРЖАНИЕ

Задание на ВКР	3
АННОТАЦИЯ	5
СПИСОК ВВЕДЕННЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СИНТЕЗУ СИСТЕМ	
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ	
АППАРАТОВ	1
1.1 Анализ математических моделей движения НПА11	1
1.2 Обзор существующих методов синтеза систем управления	
необитаемыми подводными аппаратами13	3
1.2.1 Обзор существующих линейных СУ движением НПА 13	3
1.2.2 Обзор существующих адаптивных СУ движением НПА 14	4
1.2.3 Обзор существующих робастных СУ движением НПА 15	5
1.2.4 СУ НПА, синтезированные с использованием принципа	
виртуальной траектории16	5
1.3 Постановка задачи17	7
2 ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ НПА С ПЕРЕМЕННЫМИ	
ПАРАМЕТРАМИ	3
2.1 Математическая модель пространственного движения НПА 18	3
2.2 Синтез СУ движением НПА в горизонтальной плоскости на основе	
принципа виртуальной траектории21	1
2.3 Исследование движения НПА в горизонтальной плоскости при	
изменении его параметров	5
З РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА АДАПТИВНОЙ СУ НПА,	
УЧИТЫВАЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ 39	9
3.1 Синтез адаптивного регулятора, учитывающего изменение	
динамических характеристик НПА 39)

3.2 Исследование работы адаптивной СУ НПА при изменении параметров	
аппарата	. 44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	. 56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	. 57



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра автоматизации и управления

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

На выпускную квалификационную работу студента(ки)

Горбачева Георгия Викторовича

(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки Мехатроника и робототехника

группа М3216

Руководитель ВКР д.т.н., профессор (ученая степень, ученое звание)

Филаретов В.Ф.

На тему Разработка системы управления подводными буксировщиками

Дата защиты ВКР <u>27 июня 2018</u> г.

Выпускная квалификационная работа Горбачева Г.В. посвящена синтезу адаптивной систем управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов (роботов-буксировщиков), параметры которых значительно меняются при изменении перемещаемых грузов. Актуальность решаемой задачи обусловлена тем, что в настоящее время в мире еще не разрабатывались системы, которые обеспечивали ли бы указанным объектам высокую динамическую точность в процессе перемещения по сложным пространственным траекториям в стесненных условиях подводных гидросооружений при существенных изменениях сразу нескольких параметров, связанных с изменениями параметров и габаритов перевозимых грузов.

В работе дано уточненное представление математических моделей указанных роботов-буксировщиков и в процессе моделирования продемонстрировано значительное ухудшение их динамической точности при быстрых перемещениях по криволинейным пространственным траекториям с использованием традиционных систем управления.

Синтезированные Горбачевым Г.В. новые адаптивные регуляторы в сочетании с недавно созданным новым принципом управления позволили сохранить заданную динамическую точность движения подводным роботов-буксировщиков при кратном изменении их массогабаритных характеристик.

Магистерская диссертация Горбачева Г.В. существенно превышает требуемый

теоретический уровень указанных работ. По своему уровню она приближается к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук и через два-три года может быть защищена именно в виде диссертации более высокого уровня.

Результаты, полученные в ходе выполнения рецензируемой работы, будут использованы в отчетах по уже выполняемым грантам.

Оригинальность текста составляет более 83% (по данным системы «SafeAssign», bb.dvfu.ru). Полагаю, что представленная выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично», а студент Горбачев Г.В. – присвоения квалификации «магистр».

подинсь)

Руководитель ВКР

<u>Филаретов В.Ф.</u> (ФИО)

3 июня 2018 г.