

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

Институт кибернетики

Направление подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах»

Кафедра автоматики и компьютерных систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Система управления движением телеуправляемого подводного аппарата

УДК 681.5.013

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Хожаев Иван Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. АиКС	Гайворонский С.А.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. менеджмента ИСГТ	Конотопский В.Ю.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ЭБЖ ИНК	Анищенко Ю.В.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС	Фадеев А.С.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

	Результаты
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.

P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

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

Институт кибернетики

Направление подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах»

Кафедра автоматизации и компьютерных систем

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) Фадеев А.С.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ41	Хожаев Иван Валерьевич

Тема работы:

Система управления движением телеуправляемого подводного аппарата	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 701/с от 04.02.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Корпус телеуправляемого необитаемого подводного аппарата.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Анализ существующих проблем использования и проектирования необитаемых подводных аппаратов. 2. Разработка структуры математической модели процесса движения необитаемых подводных аппаратов. 3. Разработка методик размещения одного вещественного и двух комплексно-сопряженных доминирующих полюсов системы автоматического управления с интервальными параметрами с помощью робастных регуляторов. 4. Разработка методик размещения одного вещественного и двух комплексно-сопряженных доминирующих полюсов системы автоматического управления с интервальными параметрами с помощью адаптивно-робастных регуляторов. 5. Разработка структуры системы управления движением телеуправляемого необитаемого подводного аппарата.

	6. Имитационное моделирование обтекания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. 7. Расчет гидродинамических параметров телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. 8. Синтез робастных регуляторов системы управления движением телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с интервальными параметрами. 9. Моделирование работы контуров синтезированной системы управления движением телеуправляемого необитаемого подводного аппарата.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Мультимедийная презентация в формате ppt в размере 18 слайдов
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Анищенко Ю.В.
Раздел на иностранном языке	Логинова А.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1 Теоретические основы управления необитаемыми подводными аппаратами (1 Theoretical basis of underwater unmanned vehicles control)	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. АиКС	Гайворонский С.А.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Хожаев Иван Валерьевич		

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

Институт кибернетики

Направление подготовки (специальность) 27.04.04 «Управление в технических системах»

Уровень образования – магистратура

Кафедра автоматики и компьютерных систем

Период выполнения – весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
31.05.2016	Основная часть	60
20.05.2016	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
20.05.2016	Социальная ответственность	10
26.05.2016	Раздел на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. АиКС	Гайворонский С.А.	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС	Фадеев А.С.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ41	Хожаеву Ивану Валерьевичу

Институт	кибернетики	Кафедра	АиКС
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	27.04.04 «Управление в технических системах»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость персонального компьютера, стоимость лазерного принтера и расходных материалов к нему, стоимость канцелярских принадлежностей.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Нормальный срок полезного использования вычислительной техники, оргтехники.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Проценты отчислений в Пенсионный фонд РФ, Фонд обязательного медицинского страхования РФ, Фонд социального страхования РФ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Доли участия исполнителей проекта в запланированных работах
2. Распределение трудоемкости запланированных работ по исполнителям
3. Линейный график запланированных работ
4. Изменение степени готовности проекта в процессе выполнения запланированных работ
5. Структура цены проекта
6. Оценка научно-технического уровня проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.2016
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. менеджмента ИСГТ	Конотопский В.Ю.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Хожаев Иван Валерьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Хожаеву Ивану Валерьевичу

Институт	кибернетики	Кафедра	АиКС
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	27.04.04 «Управление в технических системах»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Технология проектирования систем автоматического управления движением необитаемых подводных аппаратов.</i>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	<i>Исследование нормативов и мер защиты от:</i> – отклонений параметров микроклимата в рабочем помещении; – повышенного уровня шума; – электромагнитного излучения; – недостаточной освещенности рабочего места. <i>Анализ мероприятий по обеспечению электробезопасности.</i>
2. Экологическая безопасность	<i>Анализ негативного влияния процесса проектирования систем автоматического управления движением необитаемых подводных аппаратов на окружающую среду.</i>
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<i>Анализ технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.</i>
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	<i>Анализ правовых норм трудового законодательства, регламентирующих работу проектировщика систем управления движением необитаемых подводных аппаратов.</i> <i>Анализ требований к эргономике и санитарному состоянию рабочего места с ПК.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.2016
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ЭБЖ ИНК	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Хожаев Иван Валерьевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 136 с., 37 рис., 23 табл., 32 источника, 1 прил.

Ключевые слова: НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ, РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ, КОРНЕВОЙ ПОДХОД.

Объектом исследования является процесс проектирования системы автоматического управления движением телеуправляемого подводного аппарата.

Цель работы – рассчитать параметры регуляторов системы автоматического управления движением телеуправляемого подводного аппарата с интервальными параметрами.

В процессе исследования была построена математическая модель системы автоматического управления движением телеуправляемого подводного аппарата с интервальными параметрами; были разработаны методики параметрического синтеза робастных и адаптивно-робастных регуляторов, обеспечивающих заданные значения показателей качества регулирования; решена задача параметрического синтеза регуляторов исследуемой системы.

В результате исследования были рассчитаны параметры регуляторов робастной системы автоматического управления движением телеуправляемого подводного аппарата, обеспечивающие заданное качество регулирования. Результаты исследований позволяют упростить процесс проектирования и структуру исследуемой системы, а также повысить надежность ее работы.

В будущем планируется развитие разработанных методик синтеза, уточнение математической модели системы, а также проверка работоспособности синтезированной системы на практике.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

САУ – система автоматического управления;

НПА – необитаемый подводный аппарат;

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат;

ТНПА – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат;

ДРК – движительно-рулевой комплекс;

ГБО – гидролокатор бокового обзора;

ГАНС УКБ – гидроакустическая навигационная система с
ультракороткой базой;

СУ – система управления;

САР – система автоматического регулирования;

ИХП – интервальный характеристический полином;

НР – научный руководитель;

И – инженер.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	15
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	16
1 Теоретические основы управления необитаемыми подводными аппаратами	16
1.1 Понятие необитаемого подводного аппарата	16
1.1.1 Конструкция и классификация НПА	16
1.1.2 Гидродинамика НПА	21
1.1.2.1 Характеристики НПА	21
1.1.2.2 Параметры движения НПА	22
1.1.2.3 Гидродинамические параметры НПА.....	24
1.1.3 Система управления движением НПА.....	26
2 Текущее состояние проблемы.....	29
2.1 Проблемы использования НПА.....	29
2.2 Проблемы проектирования СУ движением НПА и известные способы их решения.....	30
3 Построение математической модели системы.....	33
3.1 Построение математических моделей объектов управления	33
3.1.1 Изменение скорости движения НПА и глубины погружения.....	36
3.1.2 Изменение курса НПА.....	38
3.1.3 Изменение дифферента НПА.....	39
3.1.4 Изменение крена НПА.....	40
4 Разработка методик синтеза регуляторов САУ с интервальными параметрами.....	42
4.1 Синтез робастных регуляторов.....	45

4.1.1	Разработка методики размещения одного вещественного интервального доминирующего полюса	45
4.1.2	Числовой пример размещения одного вещественного интервального доминирующего полюса	47
4.1.3	Разработка методики размещения пары комплексно-сопряженных интервальных доминирующих полюсов	50
4.2	Синтез адаптивно-робастных регуляторов.....	52
4.2.1	Разработка методики адаптивной стабилизации одного вещественного доминирующего полюса.....	53
4.2.2	Числовой пример адаптивной стабилизации положения одного вещественного доминирующего полюса.....	55
4.2.3	Разработка методики адаптивной стабилизации пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов.....	58
4.2.4	Числовой пример адаптивной стабилизации пары комплексно-сопряженных полюсов.....	60
5	Разработка системы управления движением ТНПА	64
5.1	Разработка структуры СУ движением	65
5.2	Разработка блока задатчика	67
5.3	Разработка блока распределения упоров движителей и мультиплексирование движителей.....	68
5.4	Синтез регуляторов контуров регулирования системы.....	71
5.4.1	Расчет гидродинамических параметров ТНПА	71
5.4.2	Синтез регуляторов СУ движением ТНПА.....	77
6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	82
6.1	Организация и планирование работ	82

6.1.1 Продолжительность этапов работ	84
6.1.2 Расчет накопления готовности проекта	90
6.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	91
6.2.1 Расчет расходов на материалы и покупные изделия	91
6.2.2 Расчет заработной платы	92
6.2.3 Расчет затрат на взносы во внебюджетные фонды	93
6.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	94
6.2.5 Расчет амортизационных расходов	95
6.2.6 Расчет прочих расходов	95
6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки	96
6.2.8 Расчет прибыли, НДС и цены разработки НИР	96
6.3 Оценка экономической эффективности проекта	97
6.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР	97
7 Социальная ответственность	100
7.1 Производственная безопасность	100
7.1.1 Микроклимат	102
7.1.2 Шум	104
7.1.3 Электромагнитное излучение	106
7.1.4 Освещенность	107
7.1.5 Электрический ток	108
7.2 Экологическая безопасность	110
7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	111
7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	111
7.4.1 Правовые вопросы охраны труда	111
7.4.2 Организационные вопросы обеспечения безопасности	112

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА.....	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	119
Приложение А	123

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена синтезу системы автоматического управления движением телеуправляемого подводного необитаемого аппарата. Объектом исследования является технология проектирования САУ движением подводных аппаратов.

В ходе выполнения работы была построена математическая модель процесса движения подводного аппарата в вязкой жидкости, разработаны методики синтеза регуляторов для систем автоматического управления с интервальными параметрами, проведен параметрический синтез регуляторов системы управления движением телеуправляемого подводного аппарата.

Научная новизна работы заключается в подходе к построению математической модели процесса движения подводного аппарата и оценке его гидродинамических параметров, а также в применении новых методик синтеза регуляторов. Используемый подход к построению модели системы позволяет значительно сократить объем экспериментальных данных, необходимых для ее настройки. Применяемые методики синтеза позволяют упростить структуру системы без потери качества работы.

Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и изложены в публикациях в изданиях, индексируемых РИНЦ и Scopus.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Теоретические основы управления необитаемыми подводными аппаратами

1.1 Понятие необитаемого подводного аппарата

Необитаемый подводный аппарат (НПА) – совокупность технических средств, объединенная в единый, способный свободно передвигаться под водой конструктив, выполняющая при этом некоторый спектр задач на глубинах и в условиях недоступных людям.

Современные НПА, в зависимости от полезной нагрузки, могут быть использованы для выполнения исследовательских, промышленных, спасательных и прочих видов работ. Рассмотрим подробнее наиболее часто встречающиеся варианты конструкции НПА.

1.1.1 Конструкция и классификация НПА

Любой НПА включает в себя несколько основных элементов: несущий корпус, бортовой компьютер, движительно-рулевой комплекс (ДРК). Номенклатура остальных элементов определяется типом и назначением НПА. Далее будем классифицировать НПА по набору признаков и описывать общие моменты конструкции каждого типа НПА.

Первый признак, по которому можно классифицировать НПА – *автономность*. По этому признаку различают телеуправляемые и автономные НПА (ТНПА и АНПА, соответственно). ТНПА связаны с базовым судном кабель-тросом, по которому получают питание и команды управления. В свою очередь, АНПА не связаны с базовым судном, питаются от встроенных аккумуляторов, управляются заранее составленной оператором программой миссии с коррекцией по гидроакустическим каналам связи и, чаще всего, не передают собранные данные оператору в реальном времени.

Такие особенности накладывают на использование НПА обоих типов некоторые ограничения. Так, например, на АНПА невозможно установить

энергоемкое оборудование, например, манипулятор. Однако, в то же время автономность позволяет АНПА работать на больших, чем ТНПА, глубинах и исследовать большие площади дна со сложным рельефом. В свою очередь, ТНПА не способен отходить от базового судна на дальние расстояния, однако не имеет проблем с передачей данных в реальном времени. Исходя из вышеизложенных соображений, АНПА и ТНПА обычно применяются вместе: АНПА – для масштабных работ, не требующих «эффекта присутствия» оператора на дне (например, поиска затонувшего корабля). ТНПА используются для точечных работ с применением разнообразных инструментов (например, для исследования или ремонта найденного с помощью АНПА корабля). Далее конструкцию элементов НПА будем описывать в двух вариантах: для ТНПА и АНПА.

Второй признак, по которому можно классифицировать НПА – это *конструкция движительно-рулевого комплекса (ДРК)*. Именно ДРК НПА обеспечивает его движение в заданном направлении.

ДРК АНПА должен иметь минимальное энергопотребление для обеспечения наибольшего времени автономной работы. Также АНПА обычно выполняют миссии, связанные с движением по относительно плавным траекториям. Эти особенности АНПА привели к созданию двух наиболее часто используемых конструкций ДРК. В первом случае АНПА оснащается одним или несколькими маршевыми двигателями и рулями (см. рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – АНПА LDUUV BMS США с рулевыми плоскостями

В примере на рисунке 1.4 АНПА маневрирует за счет поворота рулевых плоскостей и изменения частоты вращения гребных винтов маршевых движителей. За счет использования такой конструкции ДРК достигается значительная экономия энергии. Известно, что данный аппарат способен находиться в автономном плавании до 30 дней.

Во втором случае АНПА оснащается одним или несколькими маршевыми движителями, а также вертикальными и, по необходимости, горизонтальными подруливающими движителями (см. рисунок 1.5).

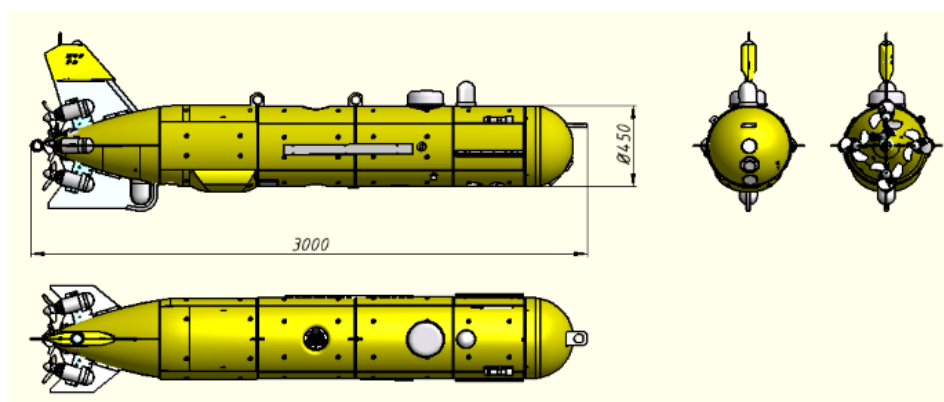


Рисунок 1.5 – АНПА МТ-2010 ИПМТ ДВО РАН с подруливающим движителем

В примере на рисунке 1.5 АНПА маневрирует за счет разности скоростей вращения маршевых движителей, погружается с помощью вертикального подруливающего движителя. Время автономного плавания МТ-2010 составляет 20 ч, запас хода – 100 км.

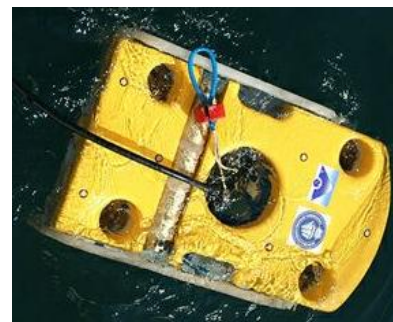
ДРК ТНПА не ограничен требованием минимального энергопотребления. Это позволяет проектировщикам не ограничиваться минимально необходимым количеством движителей и дает возможность поставить по одному или паре движителей на каждое направление движения. Таким образом, с помощью 6-8 движителей можно обеспечить движение ТНПА по всем шести степеням свободы. Такой подход и является в данный момент общепринятым (см. рисунок 1.6).



а



б



в

Рисунок 1.6 – ТНПА с различной компоновкой ДРК: а) «Фалкон»; б) I-90; в) «МАКС-300»

На рисунке 1.6 показаны различные варианты компоновки ДРК ТНПА. Двигатели, обеспечивающие движение в горизонтальной плоскости расположены одинаково, отличается расположение и количество вертикальных двигателей. Стоит отметить, что аппарат на рисунке 1.6 а не способен регулировать углы наклона относительно поверхности воды, так как оснащен только одним вертикальным двигателем. Аппарат на рисунке 1.6 б оснащен двумя вертикальными двигателями, что позволяет ему разностью тяг этих двигателей создавать момент вращения вокруг продольной оси. Аппарат на рисунке 1.6 в способен вращаться вокруг продольной и поперечной оси и обладает самыми полными возможностями для стабилизации.

Третий признак классификации НПА – *конструкция корпуса*. Различия в конструкции корпуса АНПА и ТНПА вытекают из решаемых задач и прослеживаются по рисункам 1.4, 1.5 и 1.6.

Ввиду особенностей ДРК АНПА для его устойчивого движения корпус АНПА должен обладать определенными гидродинамическими характеристиками. Именно поэтому корпус АНПА чаще всего имеет хорошо обтекаемую, торпедообразную форму и в некоторых случаях оснащается

стабилизаторами. При этом корпус АНПА изготавливается с учетом высокого давления на рабочих глубинах аппарата.

В свою очередь, корпус ТНПА в большинстве случаев представляет собой несущую раму практически произвольной формы, предназначенную только для удобного размещения элементов ТНПА и полезной нагрузки. Корпус ТНПА может не обладать высокими гидродинамическими качествами, так как движение по каждой степени свободы управляется отдельной парой движителей.

Таким образом, различия в конструкции корпусов следуют из отличий в их назначении: корпус АНПА участвует в обеспечении устойчивого движения аппарата за счет своих характеристик. Корпус ТНПА представляет собой всего лишь несущую раму для компонентов ТНПА.

Четвертый признак классификации НПА – *количество корпусов*. При классификации по этому признаку нет смысла отдельно рассматривать АНПА и ТНПА, так как в обеих группах есть многокорпусные аппараты.

Многокорпусный аппарат, безусловно, сложнее в проектировании, чем однокорпусный, однако движется более устойчиво, имеет большую грузоподъемность, чем однокорпусный аппарат аналогичных габаритов.

На данный момент известны образцы НПА в виде катамаранов и тримаранов, то есть НПА с двумя и тремя корпусами соответственно.

Пятый критерий классификации НПА – *способ навигации*. Подходы к навигации АНПА и ТНПА отличаются набором применяемых технических средств. Навигация ТНПА может осуществляться как за счет использования магнитного компаса, так и на основании изображения с видеосистемы аппарата, получаемого в реальном времени.

В свою очередь, АНПА оснащаются мощными средствами навигации. Например, АНПА МТ-2010 оснащен бортовой системой навигации, включающей в себя магнитный компас и доплеровский лаг. Бортовая система навигации корректирует информацию о положении аппарата, обмениваясь данными с гидроакустической системой навигации с ультракороткой базой

(ГАНС УКБ). В других аппаратах, наряду с перечисленными системами, для коррекции направления движения используются также гидролокаторы бокового обзора (ГБО).

1.1.2 Гидродинамика НПА

1.1.2.1 Характеристики НПА

Для оценки качества НПА используется набор количественных и качественных характеристик. Количественными характеристиками описываются свойства корпуса НПА; качественными – свойства НПА как судна.

Среди множества мореходных качеств судна применительно к НПА необходимо оценивать управляемость и остойчивость НПА.

Управляемость НПА оценивается несколькими показателями. В их числе поворотливость, устойчивость на курсе, остойчивость, движение судна под действием подруливающих устройств, качество активного торможения.

Поворотливость – способность судна изменять направление движения. Характеризуется диаметром циркуляции, который равен расстоянию между траекториями движения судна после разворота на 180°. Диаметр циркуляции измеряется в метрах или длинах судна.

Устойчивость на курсе характеризует способность судна сохранять направление движения под действием внешних возмущающих факторов.

Остойчивость судна характеризует способность судна сохранять допустимые значения крена и дифферента под действием внешних возмущающих факторов.

Качество активного торможения – способность судно использовать реверсивный режим маршевых движителей для торможения. Характеризуется временем торможения, тормозным путем судна.

Наиболее часто используемыми количественными характеристиками качества НПА являются: габаритные размеры, относительное удлинение, площадь миделя, водоизмещение, коэффициент продольной полноты,

координата центра водоизмещения относительно носа, вес аппарата, плавучесть аппарата, координаты центра тяжести, моменты инерции корпуса.

Относительное удлинение НПА рассчитывается для НПА торпедообразной формы как отношение длины НПА к его максимальному диаметру. Рекомендуется проектировать НПА так, чтобы его относительное удлинение принадлежало интервалу 3–6.

Площадь миделя, площадь мидель-шпангоута рассчитывается как площадь поперечного сечения НПА в том месте, где достигается его максимальный диаметр. Рекомендуется выбирать расстояние от носа НПА до его мидель-шпангоута равным 42-46% от его длины.

Водоизмещение НПА рассчитывается как объем воды, вытесняемой НПА. При этом вес вытесненной воды равен весу судна.

Коэффициент продольной полноты рассчитывается как отношение объемного водоизмещения к произведению площади мидель-шпангоута и длины НПА. Рекомендуемое значение для НПА малого водоизмещения – 0,6-0,7.

Координата центра водоизмещения равная расстоянию между носом НПА и его центром водоизмещения. Центр водоизмещения (для торпедообразных аппаратов) определяется как центр мидель-шпангоута и является геометрическим центром аппарата. Относительное расположение центра тяжести и центра водоизмещения влияет на остойчивость НПА.

Запас плавучести аппарата вычисляется как разность силы Архимеда и силы тяжести, действующих на аппарат. Характеризует способность НПА держаться на воде без использования ДРК.

Координаты центра тяжести характеризуют расположение центра тяжести относительно центра водоизмещения.

1.1.2.2 Параметры движения НПА

Движение НПА – совокупность поступательного движения вдоль и вращательного движения вокруг некоторых осей, связанных с корпусом

аппарата. Рассмотрим подробнее выбор систем координат для описания движения НПА, а также связанные с ними количественные параметры движения НПА.

Для описания движения НПА используются три системы координат, представленные на рисунке 1.7.

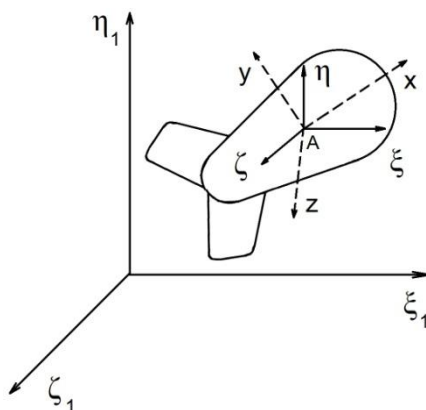


Рисунок 1.7 – Системы координат НПА

Система координат $\xi_1\eta_1\zeta_1$ является глобальной системой координат. Оси системы координат $\xi\eta\zeta$ параллельны соответствующим осям $\xi_1\eta_1\zeta_1$. Начало $\xi\eta\zeta$ совпадает с полюсом аппарата. Оси системы координат $xuyz$ совпадают с осями корпуса аппарата, центр – с полюсом аппарата А. Таким образом, плоскость xu совпадает с продольно-вертикальной плоскостью НПА; плоскость xz совпадает с плоскостью миделя; ось y представляет собой пересечение этих плоскостей и направлена вверх от центра водоизмещения.

Система координат $xuyz$ используется для вычисления моментов инерции НПА.

Системы координат $xuyz$ и $\xi\eta\zeta$ используются для задания положения НПА в воде через углы курса, крена и дифферента. Курс – угол между осью ξ и проекцией оси x на горизонтальную плоскость. Крен – угол между диаметральной плоскостью аппарата и вертикальной плоскостью, включающей в себя ось x . Дифферент – угол между осью x и ее проекцией на горизонтальную плоскость.

Система координат $\xi_1\eta_1\zeta_1$ используется для вычисления координат аппарата и его скорости.

Таким образом, положение НПА определяется его координатами в глобальной системе координат. Ориентация НПА определяется значениями углов курса, крена и дифферента.

1.1.2.3 Гидродинамические параметры НПА

Для расчета сил и моментов, действующих на НПА со стороны жидкости, используется ряд параметров. К этим параметрам относятся коэффициенты присоединенных масс, коэффициенты гидродинамических сил и моментов. Рассмотрим физический смысл и способы расчета этих параметров подробнее.

Коэффициенты присоединенных масс характеризуют инерционность жидкости, перемещающейся в результате движения НПА. Всего таких коэффициентов 36; их принято записывать в виде определителя квадратной матрицы из 6 строк и 6 столбцов:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \lambda_{16} \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot \\ \lambda_{61} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \lambda_{66} \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты λ_{ij} имеют разную размерность и не все являются массами. В частности, массы жидкости, сдвигаемые НПА при движении вдоль каждой из трех осей координат, равны $\lambda_{ij}; i, j \in [1;3]$. Моменты инерции жидкостей равны $\lambda_{ij}; i, j \in [4;6]$. Остальные величины характеризуют взаимовлияние разных типов движения.

Значения коэффициентов присоединенных масс полностью определяются формой корпуса НПА. В зависимости от сложности формы

корпуса, от его симметричности относительно основных плоскостей можно применить несколько прикладных методов расчета присоединенных масс. Например, для НПА обтекаемой формы с высоким значением коэффициента относительного удлинения применяется метод, основанный на гипотезе плоских сечений. Для аппаратов более сложной формы целесообразно аппроксимировать форму корпуса несколькими типовыми фигурами (эллипсоидом, параллелепипедом и т.д.), для которых выведены формулы коэффициентов присоединенных масс.

На НПА, движущийся в вязкой жидкости действуют три силы: сила лобового сопротивления R_x , подъемная R_y и боковая R_z силы.

Перечисленные силы могут быть рассчитаны по формулам

$$R_{x1} = c_{x1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}; R_{y1} = c_{y1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}; R_{z1} = c_{z1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}, \quad (1.1)$$

где c_{x1}, c_{y1}, c_{z1} – коэффициенты гидродинамических сил, ρ – плотность воды, V – водоизмещение НПА, v – скорость движения НПА. Как видно в этих формулах не учтено направление движения НПА или направление действия потока жидкости, однако то, что силы, действующие на НПА со стороны жидкости, меняются при изменении направления движения НПА, очевидно. Из этого можно сделать вывод, что коэффициенты гидродинамических сил нестационарны и зависят от углов атаки и дрейфа.

Коэффициенты гидродинамических сил обычно определяются экспериментально. Не имея возможности провести натурный эксперимент, ограничимся виртуальным экспериментом. В частности, построим поле давлений жидкости вокруг НПА при его движении на разных скоростях, углах атаки и дрейфа. Проанализировав эти данные, можно вывести зависимости между гидродинамическими коэффициентами и перечисленными параметрами. Использование этих зависимостей сделает математическую модель движения НПА более точной.

Кроме гидродинамических сил на НПА. движущийся в вязкой жидкости, действуют также и гидродинамические моменты вращения вокруг осей координат: момент крена M_x , момент курса M_y и момент дифферента M_z . Перечисленные моменты могут быть рассчитаны по формулам

$$M_{x_1} = m_{x_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V; M_{y_1} = m_{y_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V; M_{z_1} = m_{z_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V, \quad (1.2)$$

где $m_{x_1}, m_{y_1}, m_{z_1}$ – коэффициенты гидродинамических моментов.

Коэффициенты гидродинамических моментов, как и коэффициенты гидродинамических сил, определяются экспериментально и являются нестационарными величинами, изменяющимися в зависимости от скорости движения НПА, углов атаки и дрейфа.

При исследовании движения НПА обычно пересчитывают перечисленные гидродинамические силы и моменты из системы координат x, y, z в систему ξ, η, ζ . Для этого используются следующие формулы

$$\begin{aligned} c_x &= c_{x_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - c_{y_1} \cdot \sin(\alpha) + c_{z_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ c_y &= c_{y_1} \cdot \cos(\alpha) + c_{z_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) + c_{x_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ c_z &= c_{z_1} \cdot \cos(\beta) - c_{x_1} \cdot \sin(\beta); \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} m_x &= m_{x_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) + m_{y_1} \cdot \sin(\alpha) - m_{z_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ m_y &= m_{y_1} \cdot \cos(\alpha) + m_{z_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - m_{x_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta); \\ m_z &= m_{z_1} \cdot \cos(\beta) + m_{x_1} \cdot \sin(\beta), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где α, β – углы атаки и дрейфа.

Рассмотрев виды возмущающих воздействий со стороны вязкой жидкости на НПА как объект управления, рассмотрим подробнее структуру системы управления движением НПА в целом.

1.1.3 Система управления движением НПА

Система управления движением НПА выполняет управление параметрами движения НПА. Набор регулируемых параметров определяется

типом НПА. Рассмотрим структуру системы управления движением АНПА и ТНПА подробнее.

Традиционно структура системы управления движением АНПА состоит из трех уровней: стратегического, тактического и исполнительного уровней.

На стратегическом уровне ведется отработка программы миссии в целом. На тактическом уровне системы планировщик осуществляет выбор и выполнение программ тактического уровня. Исполнительный уровень системы осуществляет управление ДРК АНПА.

В свою очередь, исполнительный уровень СУ движением АНПА представляет собой САР с каскадным управлением. Подуровни исполнительного уровня осуществляет управление упорами движителей и создаваемыми ими момента, обеспечивая желаемое ускорение, скорость и координаты аппарата.

Система управления такой структуры позволяет АНПА с высокой скоростью и точностью двигаться по траектории, соответствующей миссии, при необходимости корректируя программу для обхода препятствий.

Ввиду того, что ТНПА управляется оператором, структура его СУ движением по сложности сравнима с исполнительным уровнем СУ движением АНПА.

Задача СУ движением ТНПА состоит, в основном, в управлении ориентацией ТНПА. Управление тягой маршевых движителей, курсом и глубиной в таком случае полностью передается оператору. Система при этом управляет креном и дифферентом, компенсируя при этом гидродинамические силы и моменты, возникающие при поступательном движении маршем или лагом.

Стоит отметить, что возможны ситуации, когда на один и тот же движитель ложатся несколько задач одновременно. Так, например, вертикальный движитель может быть одновременно использован для компенсации положительной плавучести аппарата и коррекции дифферента;

горизонтальный движитель может быть использован одновременно для обеспечения поступательного движения и для коррекции курса. Таким образом, система должна использовать один и тот же исполнительный механизм для регулирования двух величин одновременно. Для обеспечения такой возможности необходимо организовать мультиплексирование движителя, а именно наложить ограничение на максимальную долю упора движителя, которая может быть использована одним контуром регулирования. Например, разделить упор вертикального движителя на три равные доли, одна из которых будет использоваться для компенсации плавучести НПА, вторая – для регулирования дифферента, третья – для регулирования крена.

При таком подходе к использованию движителей возникает очевидная необходимость организовать и ручной режим управления отдельными долями упора движителя помимо автоматического.

Рассмотрим современные подходы к проектированию систем управления НПА, а также проблемы использования НПА в производственной и исследовательской деятельности.

2 Текущее состояние проблемы

Перед тем, как приступить к проектированию СУ движением НПА, изучим уже имеющийся опыт решения аналогичных задач. Это позволит определить проблемы, возникающие в процессе проектирования, а также заранее предусмотреть способы их решения, получив возможность более тщательно спланировать дальнейшие работы.

Ввиду того, что качество решения задачи управления движением НПА в значительной степени определяет качество работы НПА в целом, было принято решение начать изучение текущего состояния проблемы с особенностей использования НПА для решения исследовательских и промышленных задач. Затем, в соответствии с целью исследования, перейдем к изучению проблем, возникающих при проектировании СУ движением НПА в целом. Далее, рассмотрим существующие способы управления движением НПА в условиях неопределенности параметров аппарата и окружающей среды.

Такой подход к изучению текущего состояния проблемы позволит рассмотреть ее с обеих сторон: с точки зрения пользователя НПА и с точки зрения проектировщика СУ движением НПА.

2.1 Проблемы использования НПА

В результате анализа работ [5–10] было выяснено, что основные проблемы, возникающие при использовании НПА для решения исследовательских и промышленных задач, связаны с его динамическими характеристиками и степенью автоматизации управления движением.

Так, например в [5] приводятся примеры аппаратов, оснащенных контурами автоматического регулирования курса и дифферента и не имеющих контура регулирования крена. Очевидно, что такое решение может быть достаточным в определенных условиях, однако, полностью управляемым такой аппарат считать нельзя. В той же работе упоминается важность безынерционности движения НПА, из чего можно сделать вывод,

что переходные процессы в СУ движением НПА должны быть апериодическими или близкими к таковым.

Также из опыта личного общения с сотрудниками «Госкорпорации «Росатом» можно сделать вывод, что большую роль играет скорость отработки команд управления, что еще раз подтверждает необходимость обеспечения безынерционности движения НПА.

В [6] и [7] также упоминается необходимость качественной стабилизации аппарата и установленного на нем океанографического оборудования; приводятся примеры аппаратов с компоновкой ДРК, не обеспечивающей полной управляемости НПА по крену.

В [8–10] упоминается необходимость повышения степени автоматизации процесса управления движением НПА.

Таким образом, зная характерные проблемы использования существующих НПА, можно составить примерный набор требований, которым должна соответствовать качественная СУ движением НПА: апериодический вид переходных процессов, высокая скорость отработки управляющих воздействий, максимальное количество автоматически регулируемых параметров.

2.2 Проблемы проектирования СУ движением НПА и известные способы их решения

При проектировании СУ движением НПА решаются следующие задачи: определение структуры математической модели НПА, определение значений гидродинамических параметров НПА, линеаризация моделей устройств в составе НПА, выбор структуры и параметрический синтез регулятора, управление НПА в условиях неопределенности некоторых его параметров. Рассмотрим проблемы, возникающие при решении этих задач, и способы их решения. Для этого были изучены работы [11–33].

В [11] предпринята попытка формализовать гидродинамический расчет подводных аппаратов сложной формы. В частности, выделены два

режима обтекания: кризисный и докризисный, являющиеся аналогами ламинарного и турбулентного обтекания с некоторыми дополнениями. Упоминается нестационарность гидродинамических сил и моментов. Для решения проблемы нестационарности предлагается выполнять расчеты параметров НПА в нескольких рабочих точках диаграмм зависимости гидродинамических параметров НПА от скорости движения и прочих параметров.

В [12] и [13] в математической модели процесса движения НПА не учитывается взаимовлияние контуров регулирования курса, крена и дифферента, что значительно упрощает использование модели, но ставит под сомнение ее адекватность.

В [14] предложена методика вычисления значений гидродинамических характеристик НПА путем обработки данных имитационного моделирования обтекания НПА на различных углах атаки и скоростях движения. Аналогичным способом в [15] выполняется вычисление значений гидродинамических характеристик НПА нестандартных конфигураций.

В [16] и [17] показан вывод модели процесса движения НПА в виде системы дифференциальных уравнений в матричном виде.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что в большинстве случаев упрощение структуры математической модели процесса движения НПА для приведения ее к пригодному для синтеза регуляторов виду выполняется за счет снижения ее универсальности: введения допущений, исследования различных режимов обтекания по отдельности. Для оценки значений гидродинамических характеристик НПА проводится серия натурных или виртуальных экспериментов.

В [18] и [19] отмечена актуальность разработки новых методик синтеза регуляторов для СУ движением НПА; также упомянута важность решения задачи управления НПА в условиях неопределенности параметров среды.

В [20–23] описывается применение адаптивного подхода к траекторному управлению НПА и управлению его ДРК. Продемонстрированы преимущества адаптивных регуляторов по сравнению с регуляторами со стационарными параметрами, а именно лучшая динамика системы, более высокая точность регулирования.

В работах [24] и [25] показано использование нечетких законов регулирования и нейронных сетей соответственно. Во всех рассмотренных работах была решена задача адаптации параметров системы к изменению скорости движения аппарата и угла атаки.

Очевидно, что несмотря на разнообразие подходов к управлению НПА в условиях неопределенности параметров, наряду с нечетким управлением, управлением с помощью нейронных сетей, чаще всего применяются адаптивные системы управления.

Таким образом, основные затруднения при синтезе СУ движением НПА вызывает работа с математической моделью процесса движения НПА как объекта управления: составление многомерной модели процесса движения, декомпозиция ее на модели изменения регулируемых параметров процесса движения, оценка гидродинамических характеристик НПА. Стоит отметить, что наиболее часто для управления движением НПА в условиях неопределенности параметров аппарата используются адаптивные системы управления.

3 Построение математической модели системы

Система автоматического управления движением НПА должна выполнять следующие задачи:

- регулирование курса;
- регулирование крена;
- регулирование дифферента;
- регулирование скорости движения маршем;
- регулирование глубины погружения.

Каждый параметр должен регулироваться отдельным контуром, модель которого включает в себя модель объекта управления – процесса изменения регулируемых величин от управляющих воздействий ДРК, модель исполнительных устройств – движителей, создающих управляющие упоры и моменты, а также модель датчика, измеряющего регулируемую величину.

Движители будем моделировать апериодическими звеньями первого порядка; датчики будем моделировать их статическими передаточными коэффициентами.

Рассмотрим далее построение математических моделей процессов, протекающих при движении НПА в вязкой жидкости, выступающих в данном случае моделями объектов управления.

3.1 Построение математических моделей объектов управления

Для удобства рассмотрим сначала математические модели движения НПА в горизонтальной, продольно-вертикальной и поперечно-вертикальной плоскостях, данные в [1].

Три системы дифференциальных уравнений связывают между собой углы курса, крена и дифферента, скорость движения НПА с его гидродинамическими коэффициентами сил и моментов, моментами инерции корпуса НПА и прочими его характеристиками.

Приводить эти системы дифференциальных уравнений полностью нет смысла ввиду их избыточности. Вместо этого, рассмотрим отличия в

общепринятом подходе к моделированию движения НПА и подходе, предлагаемом в данной работе.

Основные различия заключаются в объеме допущений, принимаемых для упрощения модели. Так, например, некоторые члены уравнений движения НПА включают в себя квадраты скоростей. При использовании общепринятого подхода скорости принимаются малыми величинами, что делает их квадраты пренебрежимо малыми и позволяет не рассматривать их в дальнейших расчетах. При таком подходе из рассмотрения исключаются некоторые демпфирующие и позиционные гидродинамические силы и моменты. Чтобы избежать этого и одновременно сохранить линейность модели, применим интервальную линеаризацию. Приведем пример такой линеаризации.

Известно, что демпфирующий гидродинамический момент, возникающий при вращении НПА вокруг оси x прямо пропорционален квадрату скорости движения НПА вдоль оси x :

$$M_x^\omega = m_x^\omega \cdot v_x^2.$$

Зная значения коэффициентов присоединенных масс, а также максимальную тягу ДРК по оси x , можем рассчитать максимальную скорость НПА. Пусть для примера она равна 2 м/с. В таком случае, достаточно ввести один интервальный параметр, это позволит аппроксимировать квадратичную зависимость набором линейных. Два варианта такой линеаризации показаны на рисунке 3.1.

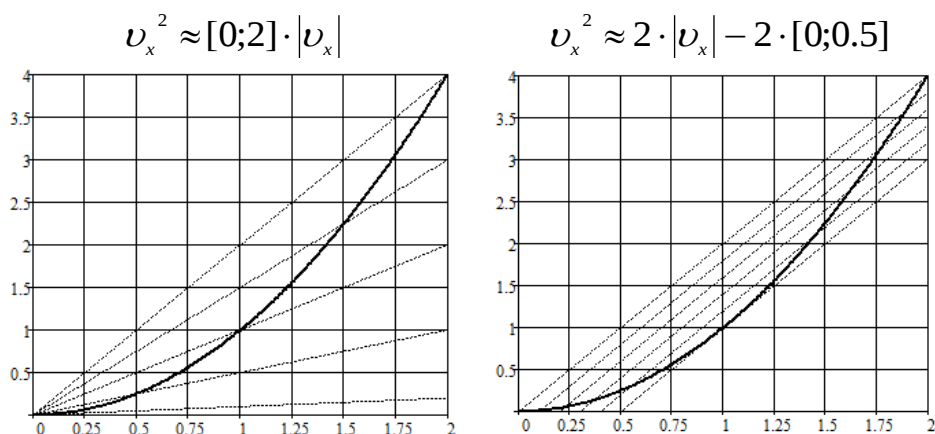


Рисунок 3.1 – Варианты интервальной линеаризации

Таким образом, исходное выражение для гидродинамического демпфирующего момента можно заменить на одно из приведенных ниже:

$$M_x^{\omega} \approx m_x^{\omega} \cdot k \cdot |\nu_x|, k = [0; 2];$$

$$M_x^{\omega} \approx m_x^{\omega} \cdot a \cdot (|\nu_x| - b), a = 2; b = [0; 0.5].$$

Очевидно, что первое выражение проще, однако, в том случае, если появится необходимость принять параметр ν_x интервальным, то в первом случае образуется полилинейная неопределенность, во втором же – только аффинная.

Другое общепринятое допущение связано со значениями тригонометрических функций углов курса, крена и дифферента. Ввиду нелинейности функций косинуса и синуса, значения углов курса, крена и дифферента обычно принимают малыми величинами, что позволяет приравнять синус угла к самому углу; косинус – к единице. В модели, использованной в данной работе, функции косинуса и синуса были заменены на интервал их значений. Такое решение позволяет с математической точки зрения расширить диапазон значений курса, крена и дифферента, при которых модель остается адекватной.

Еще одно отличие используемой модели от модели, построенной по общепринятым методикам, состоит в способе оценки значений нестационарных гидродинамических параметров. По принятым методикам для оценки значений гидродинамических параметров необходимо найти зависимость между этими параметрами и углами атаки или дрейфа. Пример графика такой зависимости, полученного экспериментальным путем, представлен на рисунке 3.2.

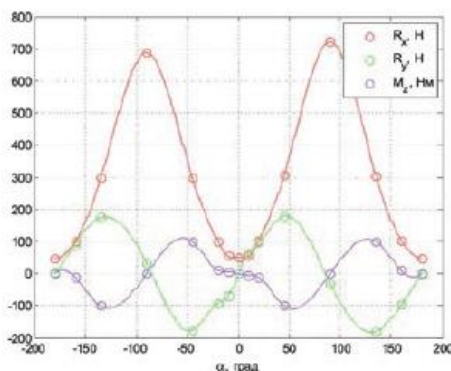


Рисунок 3.2 – Гидродинамические характеристики АНПА МТ-2012

На рисунке 3.2 представлен график зависимостей силы лобового сопротивления, подъемной силы и гидродинамического момента вращения вокруг оси z АНПА МТ-2012 при изменении угла атаки. В дальнейшем, такие экспериментальные характеристики аппроксимируются полиномами высоких степеней и используются при построении адаптивных регуляторов. Использование интервального анализа позволяет использовать только максимальное и минимальное значение этих характеристик, избежав длительной и сложной обработки экспериментальных данных.

Таким образом, основное отличие разработанной модели состоит в обеспечении ее линейности за счет введения интервальных параметров без потери адекватности.

Рассмотрим далее передаточные функции объектов управления отдельных контуров регулирования САУ движением НПА.

3.1.1 Изменение скорости движения НПА и глубины погружения

Скорость движения НПА маршем регулируется упором маршевых движителей и ограничена силой лобового сопротивления, величина которой прямо пропорциональна квадрату скорости движения НПА.

Для расчета передаточной функции процесса изменения скорости движения НПА маршем воспользуемся следующим уравнением:

$$(m + \lambda_{11}) \cdot \frac{dv_x}{dt} = T_x - c_x \cdot v_x^2,$$

где v_x – скорость движения НПА маршем; T_x – упор маршевых движителей; c_x – гидродинамический коэффициент силы лобового сопротивления; m – масса НПА; λ_{11} – масса жидкости, сдвигаемой НПА при движении маршем.

Выполним интервальную линеаризацию и перенесем в левую часть слагаемое, включающее в себя скорость движения НПА; затем, найдем передаточную функцию между упором маршевых движителей и скоростью движения НПА:

$$\begin{aligned}
(m + \lambda_{11}) \cdot \frac{dv_x}{dt} + [c_x] \cdot v_x^2 &= T_x; \\
(m + \lambda_{11}) \cdot s \cdot \frac{dv_x}{dt} + [c_x] \cdot a \cdot (v_x - [b]) &= T_x; \\
[(m + \lambda_{11}) \cdot s + [c_x] \cdot a] \cdot v_x &= T_x + \frac{[c_x] \cdot a \cdot [b]}{s}; \\
W_{v_x T_x}(s) &= \frac{1}{(m + \lambda_{11}) \cdot s + [c_x] \cdot a}.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

По аналогии получим передаточную функцию между упором вертикальных движителей и глубиной погружения НПА. Для расчета данной передаточной функции воспользуемся следующим уравнением:

$$(m + \lambda_{22}) \cdot \frac{dv_y}{dt} = T_y - c_y \cdot v_y^2 - p,$$

где v_y – скорость погружения НПА; T_y – упор вертикальных движителей; c_y – гидродинамический коэффициент подъемной силы; m – масса НПА; λ_{22} – масса жидкости, сдвигаемой НПА при погружении; p – плавучесть НПА. Найдем передаточную функцию между скоростью погружения НПА и упором вертикальных движителей:

$$\begin{aligned}
(m + \lambda_{22}) \cdot \frac{dv_y}{dt} &= T_y - c_y \cdot v_y^2 - p; \\
(m + \lambda_{22}) \cdot \frac{dv_y}{dt} &= T_y - c_y \cdot a \cdot (v_y - [b]) - p; \\
(m + \lambda_{22}) \cdot \frac{dv_y}{dt} + c_y \cdot a \cdot v_y &= T_y + c_y \cdot a \cdot [b] - p; \\
[(m + \lambda_{22}) \cdot s + c_y \cdot a] \cdot v_y &= T_y + \frac{c_y \cdot a \cdot [b] - p}{s}; \\
W_{v_y T_y}(s) &= \frac{1}{(m + \lambda_{22}) \cdot s + c_y \cdot a}.
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Обозначим глубину погружения как h . Известно, что $v_y = \frac{dh}{dt}$. Учитывая это, глубину погружения будем находить интегрированием скорости погружения:

$$W_{hTy}(s) = \frac{1}{((m + \lambda_{22}) \cdot s + c_y \cdot a) \cdot s}.$$

3.1.2 Изменение курса НПА

Изменение курса НПА осуществляется за счет вращения НПА вокруг оси у под действием момента, создаваемого парой маршевых движителей. При моделировании изменения курса НПА нужно учитывать моменты инерции корпуса НПА и сдвигаемой им при движении жидкости; гидродинамические моменты; демпфирующие моменты.

Для нахождения передаточной функции между курсом НПА и управляющим моментом упоров движителей воспользуемся уравнением:

$$\begin{aligned} & (J_y + \lambda_{55}) \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - (m \cdot x_g - \lambda_{35}) \cdot \beta \cdot \frac{dv_z}{dt} - (m \cdot x_g - \lambda_{35}) \cdot v_z \cdot \frac{d\beta}{dt} + \\ & + \lambda_{54} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (m \cdot x_g - \bar{m}_y^\omega - \lambda_{35}) \cdot v_x \cdot \frac{d\varphi}{dt} - (\lambda_{16} + \lambda_{34}) \cdot v_x \cdot \frac{d\theta}{dt} + \\ & + \lambda_{15} \cdot \frac{dv_x}{dt} = M_y + \bar{m}_y(\beta) \cdot v_y^2 - G \cdot x_g \cdot \sin(\theta), \end{aligned}$$

где J_y – момент инерции корпуса НПА относительно оси у; λ_{ij} – значения коэффициентов присоединенных масс; x_g – абсцисса центра тяжести НПА относительно центра водоизмещения; β – угол дрейфа; v_x, v_y, v_z – скорости движения НПА вдоль соответствующих осей; θ – крен НПА; φ – курс НПА; G – вес НПА; M_y – момент упоров движителей НПА; $\bar{m}_y$ – коэффициент гидродинамического момента вращения вокруг оси у; $\bar{m}_y^\omega$ – коэффициент демпфирующего момента вращения вокруг оси у.

Известно, что $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_y$. Учитывая это, найдем передаточную функцию

между скоростью вращения НПА вокруг оси у и управляющим моментом:

$$\begin{aligned}
& (J_y + \lambda_{55}) \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - (m \cdot x_g - \lambda_{35}) \cdot [\beta] \cdot \frac{dv_z}{dt} + \lambda_{54} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \\
& + (m \cdot x_g - [\overline{m}_y^{\omega}] - \lambda_{35}) \cdot v_x \cdot \frac{d\varphi}{dt} - (\lambda_{16} + \lambda_{34}) \cdot v_x \cdot \frac{d\theta}{dt} + \lambda_{15} \cdot \frac{dv_x}{dt} = \\
& = M_y + [\overline{m}_y] \cdot v_y^2 - G \cdot x_g \cdot \sin(\theta); \\
& (J_y + \lambda_{55}) \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - (m \cdot x_g - \lambda_{35}) \cdot [\beta] \cdot \frac{dv_z}{dt} + \lambda_{54} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \\
& + (m \cdot x_g - [\overline{m}_y^{\omega}] - \lambda_{35}) \cdot v_x \cdot \frac{d\varphi}{dt} - (\lambda_{16} + \lambda_{34}) \cdot v_x \cdot \frac{d\theta}{dt} + \lambda_{15} \cdot \frac{dv_x}{dt} = \\
& = M_y + [\overline{m}_y] \cdot a \cdot (v_y - [b]) - G \cdot x_g \cdot \sin(\theta); \\
& (J_y + \lambda_{55}) \cdot s \cdot \omega_y - (m \cdot x_g - \lambda_{35}) \cdot [\beta] \cdot s \cdot v_z + \lambda_{54} \cdot s^2 \cdot \theta + \\
& + (m \cdot x_g - [\overline{m}_y^{\omega}] - \lambda_{35}) \cdot [v_x] \cdot \omega_y - (\lambda_{16} + \lambda_{34}) \cdot [v_x] \cdot \frac{d\theta}{dt} = \\
& = M_y + \frac{[\overline{m}_y] \cdot a \cdot (v_y - [b]) - G \cdot x_g \cdot \sin(\theta) - \lambda_{15} \cdot [a_x]}{s}, \\
& W_{M_y \omega_y}(s) = \frac{1}{(J_y + \lambda_{55}) \cdot s + (m \cdot x_g - [\overline{m}_y^{\omega}] - \lambda_{35}) \cdot [v_x]}.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Крен НПА будем находить интегрирование значений угловой скорости вращения вокруг оси у.

3.1.3 Изменение дифферента НПА

Изменение дифферента НПА осуществляется за счет вращения НПА вокруг оси z под действием момента упоров вертикальных движителей.

Для моделирования процесса изменения дифферента НПА будем пользоваться уравнением:

$$\begin{aligned}
& (J_z + \lambda_{66}) \cdot \frac{d^2 \psi}{dt^2} - (m \cdot x_g + \lambda_{26}) \cdot \alpha \cdot \frac{dv_y}{dt} - (m \cdot x_g + \lambda_{26}) \cdot v_y \cdot \frac{d\alpha}{dt} - \\
& - (m \cdot y_g - \lambda_{16}) \cdot \frac{dv_x}{dt} + \left[m \cdot x_g + \lambda_{26} - \frac{1}{2} \cdot m_z^{\omega_z} \cdot \rho \cdot V \cdot L - (m \cdot y_g - \lambda_{16}) \cdot \alpha \right] \cdot \\
& \cdot v_y \cdot \frac{d\psi}{dt} + \lambda_{21} \cdot v_x^2 = M_z + \frac{1}{2} \cdot m_z \cdot \rho \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot v_z^2 - G \cdot (x_g \cdot \cos(\psi) + y_g \cdot \sin(\psi)),
\end{aligned}$$

где J_z – момент инерции корпуса НПА относительно оси z; λ_{ij} – значения коэффициентов присоединенных масс; x_g, y_g – абсцисса и ордината центра тяжести НПА относительно центра водоизмещения; α – угол атаки; v_x, v_y, v_z – скорости движения НПА вдоль соответствующих осей; ψ – дифферент НПА; G – вес НПА; M_z – момент упоров движителей НПА; m_z – коэффициент гидродинамического момента вокруг оси z.

Известно, что $\frac{d\psi}{dt} = \omega_z$. Учитывая это, найдем передаточную функцию

между угловой скоростью вращения НПА вокруг оси z:

$$\begin{aligned} & (J_z + \lambda_{66}) \cdot \frac{d\omega_z}{dt} - (m \cdot x_g + \lambda_{26}) \cdot [\alpha] \cdot \frac{dv_y}{dt} - (m \cdot y_g - \lambda_{16}) \cdot \frac{dv_x}{dt} + \\ & + \left[m \cdot x_g + \lambda_{26} - \frac{1}{2} \cdot [m_z^{\omega_z}] \cdot \rho \cdot V \cdot L - (m \cdot y_g - \lambda_{16}) \cdot [\alpha] \right] \cdot [v_y] \cdot \omega_z + \\ & + \lambda_{21} \cdot v_x^2 = M_z + \frac{1}{2} \cdot [m_z] \cdot \rho \cdot V^{\frac{2}{3}} \cdot v_z^2 - G \cdot (x_g \cdot \cos(\psi) + y_g \cdot \sin(\psi)); \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$W_{M_z \omega_z}(s) = \frac{1}{(J_z + \lambda_{66}) \cdot s + \left[m \cdot x_g + \lambda_{26} - \frac{1}{2} \cdot [m_z^{\omega_z}] \cdot \rho \cdot V \cdot L - (m \cdot y_g - \lambda_{16}) \cdot [\alpha] \right] \cdot [v_y]}.$$

Значение дифферента будем находить интегрированием угловой скорости вращения вокруг оси z.

3.1.4 Изменение крена НПА

Изменение крена НПА происходит за счет вращения НПА вокруг оси x под действием момента упоров вертикальных движителей.

Для моделирования процесса изменения крена НПА под действием момента упоров вертикальных движителей будем пользоваться уравнением:

$$\begin{aligned} & (J_x + \lambda_{44}) \cdot \frac{d\omega_x}{dt} + (m \cdot y_g + \lambda_{34}) \cdot \beta \cdot \frac{dv_z}{dt} - (m \cdot y_g + \lambda_{34} + \overline{m}_x^{\omega_x}) \cdot v_z \cdot \omega_x - \\ & - \lambda_{24} \cdot \frac{dv_x}{dt} = M_x + \overline{m}_x \cdot v_x^2 + G \cdot y_g \cdot \sin(\theta). \end{aligned}$$

Исходя из приведенного уравнения, получим передаточную функцию между угловой скорости вращения НПА вокруг оси x и управляющим моментам упоров вертикальных движителей:

$$\begin{aligned}
 & (J_x + \lambda_{44}) \cdot \frac{d\omega_x}{dt} + (m \cdot y_g + \lambda_{34}) \cdot [\beta] \cdot \frac{d\nu_z}{dt} - (m \cdot y_g + \lambda_{34} + [\overline{m_x^{\omega_x}}]) \cdot [\nu_z] \cdot \omega_x - \\
 & - \lambda_{24} \cdot \frac{d\nu_x}{dt} = M_x + [\overline{m_x}] \cdot \nu_x^2 + G \cdot y_g \cdot \sin(\theta); \\
 & (J_x + \lambda_{44}) \cdot \frac{d\omega_x}{dt} + (m \cdot y_g + \lambda_{34}) \cdot [\beta] \cdot \frac{d\nu_z}{dt} - (m \cdot y_g + \lambda_{34} + [\overline{m_x^{\omega_x}}]) \cdot [\nu_z] \cdot \omega_x - \quad (3.5) \\
 & - \lambda_{24} \cdot \frac{d\nu_x}{dt} = M_x + [\overline{m_x}] \cdot a \cdot (\nu_x - [b]) + G \cdot y_g \cdot \sin(\theta); \\
 & W_{M_x \omega_x}(s) = \frac{1}{(J_x + \lambda_{44}) \cdot s - (m \cdot y_g + \lambda_{34} + [\overline{m_x^{\omega_x}}]) \cdot [\nu_z]}.
 \end{aligned}$$

Имея в распоряжении передаточные функции объектов управления системы, разработаем методики синтеза регуляторов, обеспечивающих желаемое качество регулирования в системах с интервальными параметрами.

4 Разработка методик синтеза регуляторов САУ с интервальными параметрами

Полученные ранее модели процесса движения НПА и модель движителя содержат интервальные параметры. Разработаем методики, позволяющие синтезировать регуляторы, обеспечивающие желаемое качество регулирования в исследуемых системах.

Известно, что прямые показатели качества переходного процесса косвенно зависят от расположения полюсов системы. Например, время регулирования связано со степенью устойчивости выражением $t_{\text{инт}} \approx \frac{3..4}{\eta}$, где $t_{\text{инт}}$ – время регулирования; η – степень устойчивости системы. Поэтому, желаемое качество регулирования удобно задавать размещением полюсов системы.

В основу разрабатываемых методик синтеза положим корневой подход и принцип доминирования. Согласно принципу доминирования, в том случае, если часть полюсов системы расположена близко к вещественной оси комплексной плоскости, а остальные полюсы системы достаточно удалены от нее, то качество регулирования в системе определяется расположением ближайших к вещественной оси полюсов. Таким образом, для обеспечения желаемого качества регулирования достаточно соответствующим образом расположить доминирующие полюсы системы, а остальные – свободные полюсы – удалить на достаточное расстояние от доминирующих полюсов.

Рассмотрим задачу размещения полюсов системы с интервальными параметрами выбором соответствующих настроек робастного регулятора. Очевидно, что характеристический полином системы можно записать как $D(s) = \sum_{i=1}^n (s - \sigma_i)^i$, где σ_i – корни полинома, n – порядок полинома. Задав значения доминирующих полюсов, получим полином $A(s) = \sum_{i=1}^k (s - \lambda_i)^i$, где

λ_i – доминирующие полюсы; k – количество доминирующих полюсов. Разделив $D(s)$ на $A(s)$, получим полином $B(s)$ степени $n-k$, определяющий расположение свободных полюсов. От этого деления образуется остаток $R(s) = D(s) - A(s) \cdot B(s)$, представляющий собой полином степени $k-1$. Таким образом, с учетом интервальности задаваемых доминирующих полюсов и коэффициентов $A(s)$ и $B(s)$ исходный характеристический полином системы может быть представлен в следующем виде

$$D(s) = A(s) \cdot B(s) + R(s) = \sum_{i=1}^k (s - [\lambda]_i)^i \cdot \sum_{j=0}^{n-k} [b]_j \cdot s^j + \sum_{l=0}^{k-1} [r]_l \cdot s^l, \quad (4.1)$$

где $[\lambda]_i$ – интервальные доминирующие полюсы системы; $[b]_j$; $[r]_l$ – интервальные коэффициенты свободного полинома и остатка, зависящие от интервальных параметров системы и параметров регулятора. Ввиду того, что корни $A(s)$ расположены желаемым образом априори, задача расположения полюсов системы сводится к обеспечению желаемого расположения корней $B(s)$ и обеспечению равенства остатка $R(s)$ нулю.

Рассмотрим два практически значимых случая: размещение одного доминирующего вещественного полюса и размещение пары доминирующих комплексно-сопряженных полюсов.

В первом случае, за счет желаемого размещения доминирующего вещественного полюса будем обеспечивать гарантированное минимальное значение степени устойчивости системы и, следовательно, длительность апериодического переходного процесса. Свободные полюсы при этом будем располагать на комплексной плоскости левее прямой $\text{Re}(X) = \delta$, где δ меньше вещественной части доминирующего полюса, что позволит минимизировать их влияние на качество регулирования. Пример такого размещения приведен на рисунке 4.1.

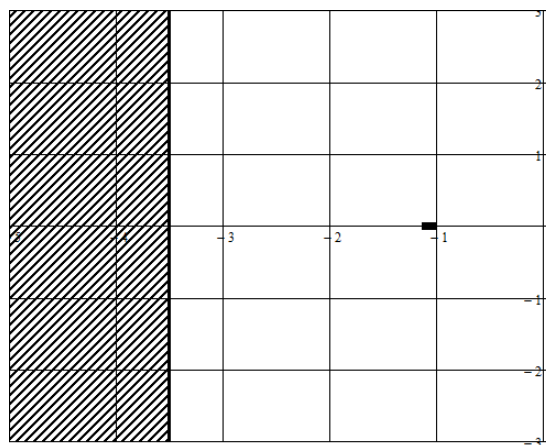


Рисунок 4.1 – Пример расположения доминирующего вещественного интервального полюса

Во втором случае, за счет желаемого размещения пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов будем обеспечивать гарантированное минимальное значение степени устойчивости и максимальное значение степени колебательности системы, влияя на длительность и степень затухания переходного процесса. Свободные полюсы при этом будем размещать внутри усеченного сектора, как показано на рисунке 4.2.

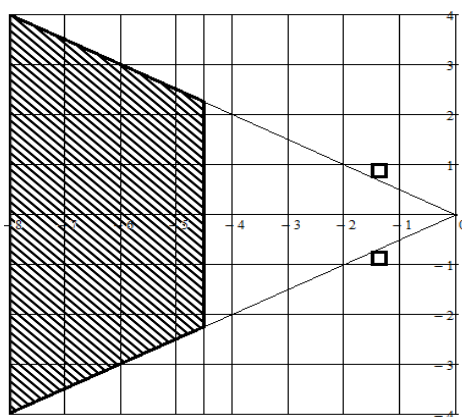


Рисунок 4.2 – Пример расположения пары комплексно-сопряженных интервальных полюсов

Исходя из сказанного выше, можем точнее сформулировать задачу: необходимо разработать метод определения таких параметров регулятора, при которых доминирующие полюсы системы располагаются в желаемых,

строго ограниченных областях, а свободные полюсы располагаются произвольно в области, ограниченной справа так, чтобы расположение свободных полюсов не оказывало влияния на переходный процесс.

Картины размещения областей локализации полюсов САУ с интервальными параметрами, показанные на рисунках 4.1 и 4.2, предполагают некоторое изменение значений корневых показателей качества и, следовательно, изменение динамических свойств системы. Для стабилизации динамики системы, необходимой в высококачественной САУ, разработаем также методики синтеза адаптивно-робастного регулятора, обеспечивающего расположение доминирующих полюсов системы в точках, а не в областях, комплексной плоскости.

4.1 Синтез робастных регуляторов

4.1.1 Разработка методики размещения одного вещественного интервального доминирующего полюса

Разработаем методику параметрического синтеза робастного ПИД-регулятора, обеспечивающего в системе с интервальными параметрами апериодический переходный процесс заданной длительности за счет желаемого размещения одного вещественного доминирующего полюса.

В рассматриваемом случае доминирующий полином $A(s) = s - \lambda$ имеет первую степень; свободный полином $B(s)$ имеет $n - 1$ степень, где n – степень характеристического полинома системы; остаток $R(s)$ имеет нулевую степень, то есть является интервальным числом, зависящим от настроек регулятора и параметров системы.

Разделив в общем виде полином степени n на полином $A(s)$, найдем выражения для коэффициентов свободного полинома $[b]_j$ и остатка R

$$[b]_j = [b]_{j+1} + [a]_{i+2} \cdot [\lambda]; \quad j \in n - 1 \dots 0, \quad (4.2)$$

$$R = \sum_{i=0}^n [a]_i \cdot [\lambda]^i = D([\lambda]) \quad (4.3)$$

где $[b]_j$ – интервальные коэффициенты свободного полинома; $[a]_i$ – интервальные коэффициенты исходного характеристического полинома $D(s)$.

Как было сказано выше, задача размещения желаемым образом полюсов системы сводится к обеспечению $R=0$ и размещению корней $B(s)$ внутри области, ограниченной справа прямой $\operatorname{Re}(X) = \delta$.

Обеспечивать равенство остатка нулю будем, исходя из решения системы алгебраических уравнений, связывающих настройки регулятора и интервальные коэффициенты характеристического полинома системы в двух вершинах ее многогранника коэффициентов $[a]_i$, соответствующих левой и правой границе доминирующего вещественного интервального полюса. Решая такую систему, получим зависимости между настройками регулятора, обеспечивающие желаемое расположение доминирующего полюса.

Желаемое расположение корней $B(s)$ будем обеспечивать, выбирая значения настроек регулятора из области D-разбиения, полученной по выражению $B(\delta + i \cdot \omega)$ в вершинах многогранника коэффициентов $[b]_j$, где δ – значение максимальной вещественной части свободных полюсов.

Сформулируем алгоритм решения этой задачи с помощью ПИД-регулятора. Для нахождения значений настроек ПИД-регулятора, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы, необходимо:

1. Исходя из желаемых значений показателей качества, задать интервал доминирующего полюса.
2. На основе выражения (4.3) вычислить зависимость значений остатка для левой и правой границ доминирующего полюса от настроек регулятора.
3. Приравняв полученные зависимости к нулю, получить систему уравнений.

4. Решив данную систему, получить зависимости между настройками ПИД-регулятора, обеспечивающие желаемое расположение доминирующего полюса.

5. Воспользовавшись выражением (4.2), вычислить коэффициенты свободного полинома.

6. Провести D-разбиение для свободного полинома и выбрать значение одной из настроек ПИД-регулятора.

7. Вычислить значения остальных настроек по зависимостям из п.4.

4.1.2 Числовой пример размещения одного вещественного интервального доминирующего полюса

Пусть передаточная функция неизменяемой части системы имеет вид

$$W(s, p_0, p_1, p_2) = \frac{1}{p_2 \cdot s^2 + p_1 \cdot s + p_0},$$

где $p_0 = [12; 15]$, $p_1 = [5; 8]$, $p_2 = [0.05; 0.15]$ – интервальные параметры системы.

Система состоит из ПИД-регулятора и неизменяемой части, охваченных единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_{PID}(s, K_p, K_I, K_D) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s, \quad (4.4)$$

где K_p, K_I, K_D – настройки пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора.

Необходимо обеспечить в данной системе апериодический переходный процесс длительностью не более 3-4 секунд. Такой длительности переходного процесса соответствует минимальная степень устойчивости, равная 1. Воспользуемся разработанной методикой для размещения доминирующего полюса в интервале $\lambda = [-1.1; -1]$. Свободные полюсы системы при этом разместим левее прямой $\text{Re}(X) = -10$.

Характеристический полином исследуемой системы имеет вид

$$D(s, K_p, K_I, K_D, p_0, p_1, p_2) = p_2 \cdot s^3 + (K_D + p_1) \cdot s^2 + (K_p + p_0) \cdot s + K_I.$$

Согласно разработанной методике найдем значения остатка для левой и правой границ интервала доминирующего полюса

$$\underline{\lambda}: R_1 = D(\underline{\lambda}, K_p, K_I, K_D, \underline{p_0}, \underline{p_1}, \underline{p_2}) = -1.1 \cdot K_p + K_I + 1.21 \cdot K_D - 3.5865$$

$$\overline{\lambda}: R_2 = D(\overline{\lambda}, K_p, K_I, K_D, \overline{p_0}, \overline{p_1}, \overline{p_2}) = -K_p + K_I + K_D - 10.15$$

Приравняв к нулю полученные выражения и решив систему из двух уравнений, получим зависимости двух настроек регулятора от третьей

$$\begin{aligned} K_I(K_p) &= 0.5238 \cdot K_p + 41.4050 \\ K_D(K_p) &= 0.4762 \cdot K_p - 31.2555 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Выполнение этих условий при расчете значений настроек регулятора обеспечит желаемое расположение доминирующего полюса.

Подставим найденные зависимости в исходный характеристический полином и воспользуемся выражением (4.2) для нахождения коэффициентов свободного полинома

$$[b_2] = [0.05; 0.15];$$

$$[b_1] = [0.4762 \cdot K_p - 50.2290; 0.4762 \cdot K_p - 47.1141];$$

$$[b_0] = [0.5238 \cdot K_p + 59.1141; 0.4762 \cdot K_p + 70.2519].$$

Выполнив подстановку $s \rightarrow -10 + i \cdot \omega$, выразим K_p из $B(-10 + i \cdot \omega, b_0(K_p), b_1(K_p), b_2)$ и построим кривые D-разбиения во всех вершинах многогранника коэффициентов $[b]_j$. Результат D-разбиения для свободного полинома в плоскости K_p изображен на рисунке 4.3.

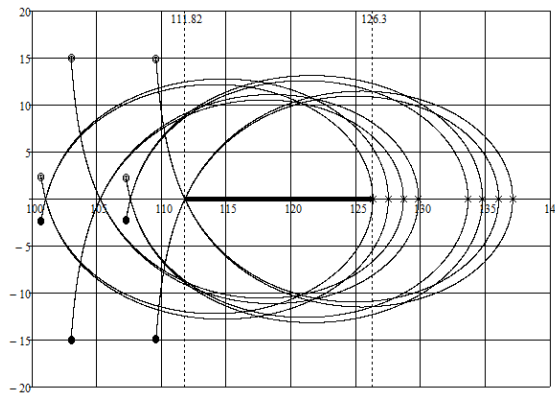


Рисунок 4.3 – D-разбиение для свободного полинома во всех вершинах его многогранника коэффициентов по K_p

Из рисунка 4.3 видно, что желаемое расположение свободных полюсов достигается при $K_p \in [111.82; 126.30]$. Выберем $K_p = 112$. Согласно (4.5), $K_I = 100.0721$; $K_D = 22.0782$ при выбранном K_p .

Для оценки полученного расположения полюсов системы с синтезированным регулятором на рисунке 4.4 построен ее многопараметрический интервальный корневой годограф.

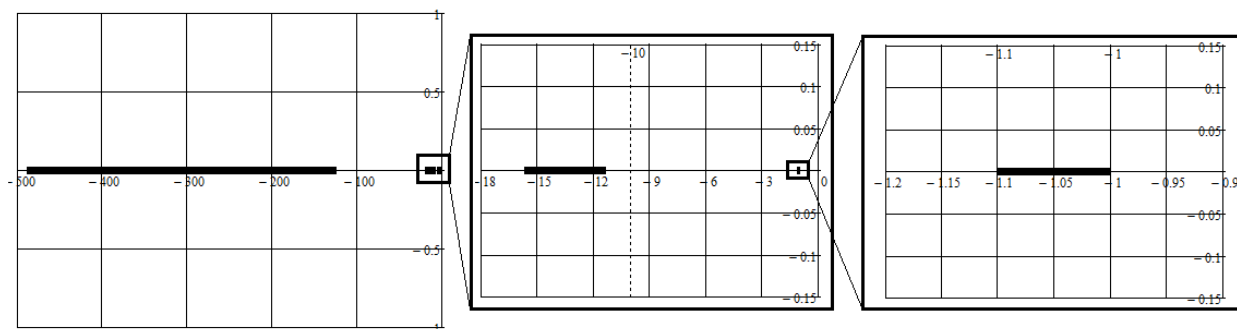


Рисунок 4.4 – МИКГ системы с робастным ПИД-регулятором

Из рисунка 4.4 очевидно, что доминирующий полюс расположился в заданном интервале $\lambda = [-1.1; -1]$, свободные полюсы при этом расположены левее прямой $\text{Re}(X) = -10$. Оценим качество переходных процессов в полученной системе. Для этого построим переходные характеристики системы во всех вершинах ее параметрического многогранника.

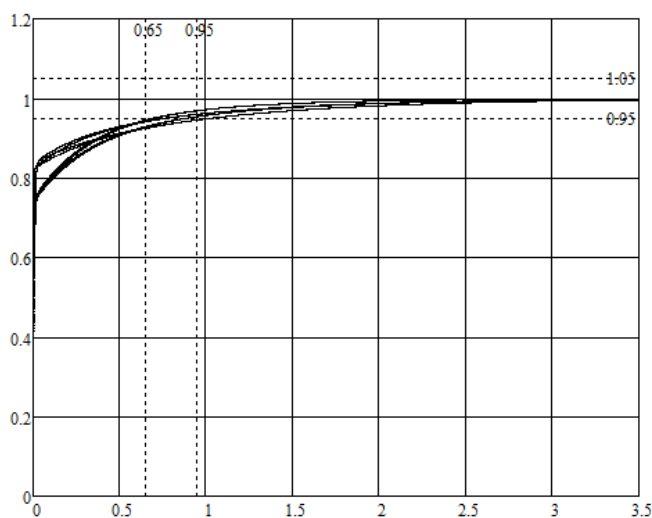


Рисунок 4.5 – Переходные характеристики системы с робастным ПИД-регулятором

Из рисунка 4.5 видно, что синтезированный регулятор обеспечивает апериодический переходный процесс с нулевым перерегулированием. Время регулирования составляет от 0.65...0.95 с, на установившее значение регулируемой величины система выходит за 3 с.

Таким образом, можно утверждать, что поставленная задача решена, и разработанная методика работоспособна.

4.1.3 Разработка методики размещения пары комплексно-сопряженных интервальных доминирующих полюсов

Разработаем методику параметрического синтеза робастного регулятора, обеспечивающего за счет размещения пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов системы с интервальными параметрами допустимую степень колебательности и переходный процесс заданной длительности.

В рассматриваемом случае доминирующий полином $A(s) = (s + \alpha + j\beta) \cdot (s + \alpha - j\beta)$ имеет вторую степень; свободный полином $B(s)$ имеет $n - 2$ степень, где n – порядок характеристического полинома системы; остаток $R(s)$ является полиномом первой степени.

Разделив в общем виде полином степени n на полином $A(s)$, найдем выражения для коэффициентов свободного полинома $B(s)$ и остатка $R(s)$

$$[b]_i = [a]_{i+2} + [x] \cdot [b]_{i+1} - [y] \cdot [b]_{i+2}, i \in n - 2 \dots 0; \quad (4.6)$$

$$R(s) = ([a]_1 + [x] \cdot [b]_0 - [y] \cdot [b]_1) \cdot s + [a]_0 - [y] \cdot [b]_0, \quad (4.7)$$

где $[x], [y]$ – сумма и произведение комплексно-сопряженных доминирующих полюсов соответственно; $[b]_j$ – интервальные коэффициенты свободного полинома; $[a]_j$ – интервальные коэффициенты исходного характеристического полинома $D(s)$.

Задача размещения полюсов системы желаемым образом сводится к обеспечению $R(s) = 0$ и размещению свободных полюсов внутри усеченного сектора.

Равенство остатка нулю обеспечивает желаемое размещение доминирующих полюсов. Выполнив подстановку $s \rightarrow j \cdot \omega$, покажем, что остаток $R(j \cdot \omega)$ представляет собой комплексное число. Известно, что комплексное число равно нулю, если его вещественная и мнимая части равны нулю. Из выражения (4.7) следует, что вещественная и мнимая части остатка – интервальные числа. Интервал можно считать равным нулю, если его границы равны нулю. Таким образом, из остатка получим систему из четырех уравнений

$$\begin{aligned} \overline{[\operatorname{Re}(R(j \cdot \omega, \bar{K}, \bar{q}))]} &= 0; \\ \underline{[\operatorname{Re}(R(j \cdot \omega, \bar{K}, \bar{q}))]} &= 0; \\ \overline{[\operatorname{Im}(R(j \cdot \omega, \bar{K}, \bar{q}))]} &= 0; \\ \underline{[\operatorname{Im}(R(j \cdot \omega, \bar{K}, \bar{q}))]} &= 0, \end{aligned} \tag{4.8}$$

где $\bar{K}$ – вектор настроек регулятора; $\bar{q}$ – вектор интервальных параметров системы.

Очевидно, что данная система имеет решение только в том случае, если регулятор имеет не менее четырех настраиваемых параметров. Таким образом, для размещения интервальных комплексно-сопряженных полюсов необходим регулятор с четырьмя настраиваемыми параметрами.

Размещать свободные полюсы в усеченном секторе будем за счет выбора значений еще двух настроек регулятора. Для этого используем D-разбиения для $B\left(\frac{1}{\mu} \cdot \omega + j \cdot \omega\right)$ и $B(\delta + j \cdot \omega)$, где μ – максимальная степень колебательности системы; δ – максимальная вещественная часть свободных полюсов.

Таким образом, для размещения полюсов желаемым образом требуется регулятор с 6 настраиваемыми параметрами. Пусть он имеет вид:

$$W(s, \bar{K}) = \frac{\sum_{j=0}^2 K_j \cdot s^{j-3}}{\sum_{i=3}^5 K_i \cdot s^i},$$

где $\bar{K}$ – вектор настроек регулятора.

Сформулируем алгоритм синтеза регулятора. Для нахождения параметров регулятора, обеспечивающих заданное расположение интервальных комплексно-сопряженных доминирующих полюсов необходимо:

1. Задать расположение доминирующих полюсов.
2. Вычислить мнимую и вещественную часть остатка, воспользовавшись выражением (4.7).
3. Приравняв границы интервалов мнимой и вещественной частей остатка к нулю, получить систему из четырех уравнений (4.8).
4. Решив систему уравнений, получить зависимости между параметрами регулятора, обеспечивающими желаемое расположение доминирующих полюсов.
5. Подставив найденные зависимости в исходный характеристический полином, получить зависимости его коэффициентов от двух параметров регулятора.
6. Вычислить коэффициенты свободного полинома, воспользовавшись выражением (4.6).
7. Исходя из областей D-разбиения по свободному полиному в плоскости двух параметров регулятора, обеспечить размещение свободных полюсов в заданном усеченном секторе.

4.2 Синтез адаптивно-робастных регуляторов

Разработанные методики синтеза робастных регуляторов не позволяют разместить доминирующий полюс системы в заданной точке комплексной плоскости, а только в некоторой ее области. Этим объясняется нестабильность качества регулирования при изменении значений

интервальных параметров, явно заметная из рисунка 4.5, на котором изображены переходные характеристики синтезированных робастных систем.

Задачу обеспечения желаемого расположения полюсов с использованием адаптивно-робастных регуляторов будем также решать в два этапа: размещение свободных полюсов с помощью D-разбиения по свободному полиному $B(s)$ во всех вершинах его многогранника коэффициентов; размещение доминирующих полюсов с помощью обеспечения значения остатка R нулю. Таким образом, желаемое качество регулирования будет достигаться за счет обеспечения робастной устойчивости $B(s)$ и подстройки коэффициентов регулятора, исходя из условия $R(K_i) = 0$.

Разработаем методики параметрического синтеза адаптивно-робастных регуляторов для двух практически значимых случаев: размещения в заданных точках комплексной плоскости одного вещественного доминирующего полюса и пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов.

4.2.1 Разработка методики адаптивной стабилизации одного вещественного доминирующего полюса

Для стабилизации одного вещественного доминирующего полюса в точке комплексной плоскости будем использовать выражения (4.2) и (4.3) с учетом того, что доминирующий полюс λ задан не интервалом, а числом:

$$[b]_j = [b]_{j+1} + [a]_{j+2} \cdot \lambda; \quad j \in n-1..0, \quad ,$$

$$R = \sum_{i=0}^n a(\bar{q})_i \cdot \lambda^i = D(\lambda),$$

где $[a]_i$ – интервальные коэффициенты характеристического полинома системы; $[b]_i$ – интервальные коэффициенты свободного полинома; λ –

вещественный доминирующий полюс; $a_i(\bar{q})$ – зависимости коэффициентов характеристического полиномов от интервальных параметров системы q .

Для решения поставленной задачи будем использовать ПИ-регулятор

$$W_{PI}(s, K_p, K_I) = K_p + \frac{K_I}{s}, \quad (4.9)$$

где K_p, K_I – настройки пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-регулятора соответственно. В таком случае, значение остатка R будет зависеть от обеих настроек регулятора, а свободный полином $B(s)$ будет зависеть только от коэффициента пропорциональной составляющей регулятора K_p . Это позволит обеспечить желаемое размещение свободных полюсов за счет выбора значения K_p , а размещение доминирующего полюса обеспечивать подстройкой коэффициента интегральной составляющей регулятора K_I .

Сформулируем алгоритм параметрического синтеза адаптивно-робастного ПИ-регулятора, обеспечивающего желаемое расположение полюсов системы:

1. Задать значение доминирующего полюса системы λ .
2. Вычислить $R(K_p, K_I, \bar{q})$.
3. Вычислить $K_I(K_p, \bar{q})$ из условия равенства $R(K_p, K_I, \bar{q})$ нулю.
4. Рассчитать коэффициенты свободного полинома $B(s, K_p, \bar{q})$.
5. Вычислить значение пропорционального коэффициента ПИ-регулятора K_p , при котором корни свободного полинома лежат левее прямой $\text{Re}(X) = \delta$.
6. Подставив найденное значение K_p в выражение $K_I(K_p, \bar{q})$, получить функциональную зависимость между значениями интервальных параметров системы и интегральным коэффициентом ПИ-регулятора.

4.2.2 Числовой пример адаптивной стабилизации положения одного вещественного доминирующего полюса

Пусть передаточная функция неизменяемой части системы имеет вид:

$$W(s, p_0, p_1, p_2) = \frac{1}{p_2 \cdot s^2 + p_1 \cdot s + p_0},$$

где $p_0 = [12; 15]$, $p_1 = [5; 8]$, $p_2 = [0.05; 0.15]$ – интервальные параметры системы.

Система состоит из неизменяемой ее части и ПИ-регулятора, охваченных единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция ПИ-регулятора задана выражением (4.9).

Пусть необходимо обеспечить в исследуемой системе апериодический переходный процесс длительностью не более 3-4 с. Такому переходному процессу соответствует минимальная степень устойчивости системы равная 1. Воспользуемся разработанной методикой для размещения доминирующего полюса λ в точке комплексной плоскости с координатами $(-1; j0)$ и свободных полюсов слева от прямой $\text{Re}(X) = -10$.

Характеристический полином исследуемой системы имеет вид

$$D(s, K_p, K_I, p_0, p_1, p_2) = p_2 \cdot s^3 + p_1 \cdot s^2 + (K_p + p_0) \cdot s + K_I.$$

Согласно разработанной методике найдем выражение для остатка R , затем из условия равенства остатка нулю найдем зависимость K_I от K_p и интервальных параметров системы:

$$R(K_p, K_I, p_0, p_1, p_2) = D(\lambda, K_p, K_I, p_0, p_1, p_2) = K_I - K_p - p_0 + p_1 - p_2;$$

$$R(K_p, K_I, p_0, p_1, p_2) = 0 \rightarrow K_I(K_p, p_0, p_1, p_2) = K_p + p_0 - p_1 + p_2.$$

Вычислим коэффициенты свободного полинома

$$B(s, K_p) = [b_2] \cdot s^2 + [b_1] \cdot s + [b_0];$$

$$[b_2] = [0.05; 0.15];$$

$$[b_1] = [4.85; 7.95];$$

$$[b_0] = [K_p + 4.05; K_p + 10.15];$$

Проведя подстановку $s \rightarrow -10 + j\omega$, построим кривые D-разбиения для свободного полинома во всех вершинах его многогранника коэффициентов.

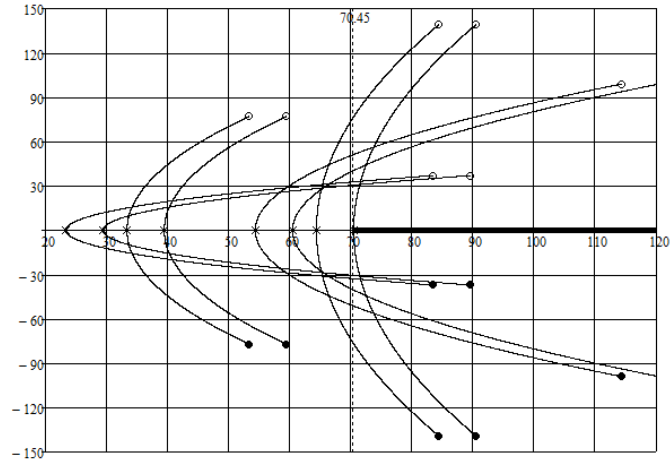


Рисунок 4.6 – D-разбиение для свободного полинома в вершинах его многогранника коэффициентов в плоскости K_p

Исходя из D-разбиения на рисунке 4.6, можно утверждать, что свободные полюсы располагаются желаемым образом при $K_p > 70.45$. Выберем $K_p = 71$. Тогда, синтезированный адаптивно-робастный ПИ-регулятор имеет настройки

$$K_p = 71;$$

$$K_I(p_0, p_1, p_2) = p_0 - p_1 + p_2 + 71.$$

Для оценки расположения полюсов системы с синтезированным регулятором построим ее МИКГ.

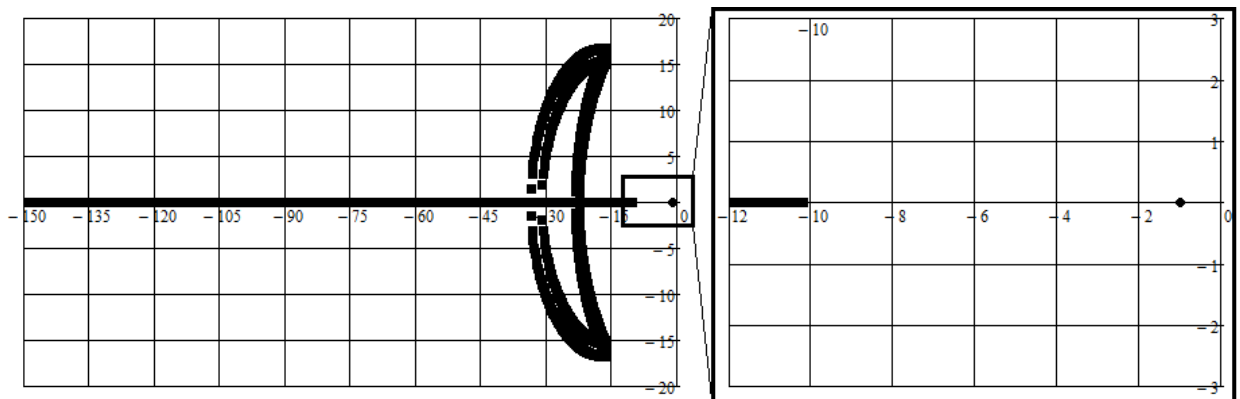


Рисунок 4.7 – МИКГ системы с адаптивно-робастным ПИ-регулятором

Исходя из рисунка 4.7, можно утверждать, что желаемое расположение полюсов достигнуто. Для оценки качества регулирования построим переходные характеристики системы в вершинах ее параметрического многогранника.

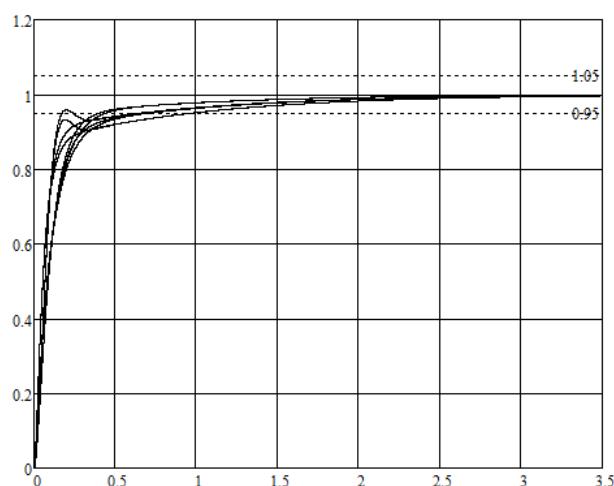


Рисунок 4.8 – Переходные характеристики системы с адаптивно-робастным ПИ-регулятором в вершинах ее параметрического многогранника

Из рисунка 4.8 видно, что время регулирования колеблется от 0.45 с до 0.95 с; на установившееся значение регулируемой величины система выходит за 3 с.

Следует отметить, что, как и ожидалось, качество регулирования в системе с адаптивно-робастным регулятором стабильнее, чем в системе с робастным регулятором. Это выражается в меньшем разбросе значений переходных характеристик в разных вершинах параметрического многогранника. Чтобы наглядно это продемонстрировать, построим переходные характеристики систем с робастным ПИД-регулятором и адаптивно-робастным ПИ-регулятором, обеспечивающими одинаковое расположение полюсов системы.

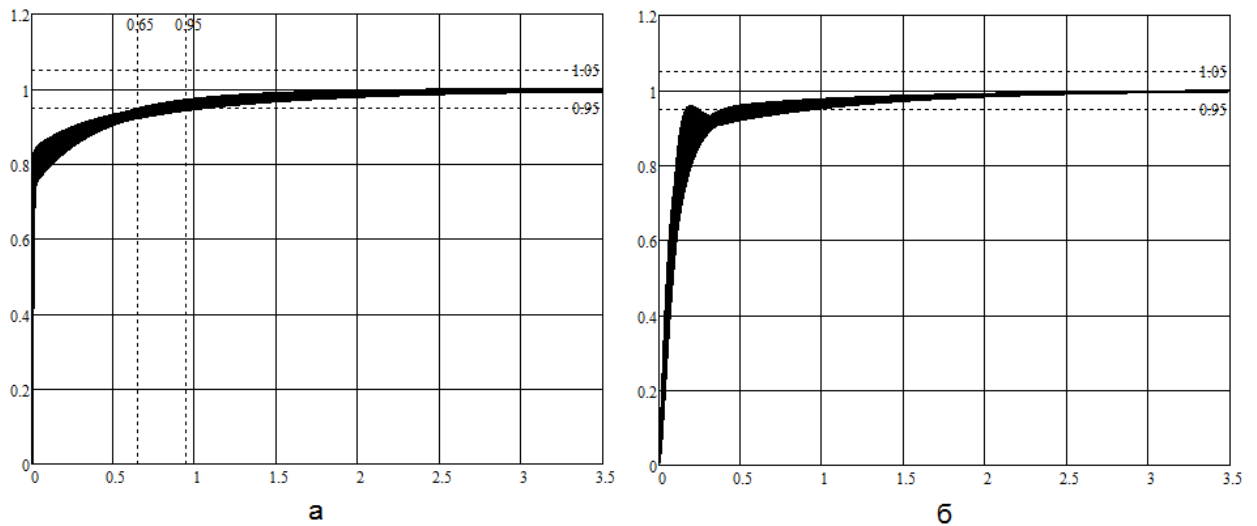


Рисунок 4.9 – Переходные характеристики систем с робастным ПИД-регулятором (а) и адаптивно-робастным ПИ-регулятором (б)

4.2.3 Разработка методики адаптивной стабилизации пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов

Для стабилизации пары комплексно-сопряженных доминирующих полюсов в точках комплексной плоскости будем использовать выражения (4.6) и (4.7) с учетом того, что доминирующие полюсы заданы не интервалами, а числами:

$$[b]_i = [a]_{i+2} + x \cdot [b]_{i+1} - y \cdot [b]_{i+2}; i \in n-2 \dots 0;$$

$$R(s) = (a_1(\bar{q}) + x \cdot b_0(\bar{q}) - y \cdot b_1(\bar{q})) \cdot s + a_0(\bar{q}) - y \cdot b_0(\bar{q}),$$

где $[a]_i$ – интервальные коэффициенты характеристического полинома системы; $[b]_i$ – интервальные коэффициенты свободного полинома; x, y – сумма и произведение комплексно-сопряженных доминирующих полюсов; $a_i(\bar{q}), b_i(\bar{q})$ – зависимости коэффициентов характеристического и свободного полиномов от интервальных параметров системы q .

Для решения поставленной задачи будем использовать ПИД-регулятор. Передаточная функция ПИД-регулятора задана выражением (4.4). В таком случае, значение остатка R будет зависеть от всех параметров регулятора; а коэффициенты свободного полинома – только от коэффициента

дифференциальной составляющей K_D . Это позволит обеспечить желаемое расположение свободных полюсов за счет выбора значения K_D ; желаемое расположение доминирующих полюсов – за счет подстройки пропорциональной и интегральной составляющих K_p и K_I из условия $R(K_p, K_D, \bar{q}) = 0$.

Сформулируем алгоритм параметрического синтеза адаптивно-робастного ПИД-регулятора, обеспечивающего желаемое расположение полюсов системы:

1. Задать положение доминирующих полюсов системы.
2. Вычислить $R(s, K_p, K_I, \bar{q})$ по выражению (4.7).
3. Исходя из условия равенства $\operatorname{Re}(R(j\omega, K_p, K_I, \bar{q}))$ и $\operatorname{Im}(R(j\omega, K_p, K_I, \bar{q}))$ нулю, найти $K_p(K_D, \bar{q})$ и $K_I(K_D, \bar{q})$.
4. Рассчитать коэффициенты свободного полинома $B(s, K_D, \bar{q})$ по выражению (4.6).
5. Найти область значений коэффициента дифференциальной составляющей ПИД-регулятора K_D , при которых свободные полюсы лежат левее прямой $\operatorname{Re}(X) = \delta$.
6. Найти область значений коэффициента дифференциальной составляющей ПИД-регулятора K_D , при которых свободные полюсы лежат внутри сектора, ограниченного прямыми, проходящими через начало координат и доминирующие полюсы.
7. Из пересечения найденных областей устойчивости выбрать значение K_D .
8. Подставив K_D в $K_p(K_D, \bar{q})$ и $K_I(K_D, \bar{q})$, получить зависимости между интервальными параметрами системы и коэффициентами ПИД-регулятора, обеспечивающие желаемое расположение доминирующих полюсов.

4.2.4 Числовой пример адаптивной стабилизации пары комплексно-сопряженных полюсов

Пусть передаточная функция неизменяемой части системы имеет вид

$$W(s, p_0, p_1, p_2, p_3) = \frac{1}{p_3 \cdot s^3 + p_2 \cdot s^2 + p_1 \cdot s + p_0},$$

где $p_0 = [350; 370]$, $p_1 = [215; 285]$, $p_2 = [28; 32]$, $p_3 = [1; 1.1]$ – интервальные параметры системы. Система состоит из неизменяемой части и ПИД-регулятора, охваченных единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция ПИД-регулятора задана выражением (4.4).

Пусть необходимо обеспечить в исследуемой системе максимальную степень колебательности равную 1 и длительность переходного процесса не более 3-4 с. Таким характеристикам системы соответствует расположение доминирующих полюсов в точках $\lambda_{1,2} = -1 \pm j \cdot 1$; свободные полюсы разместим в усеченном секторе, ограниченном прямыми $\text{Re}(X) = -10$; $\text{Im}(X) = |\text{Re}(X)|$; $\text{Im}(X) = -|\text{Re}(X)|$.

Характеристический полином исследуемой системы имеет вид

$$D(s, K_p, K_I, K_D, \bar{p}) = p_3 \cdot s^4 + p_2 \cdot s^3 + (K_D + p_1) \cdot s^2 + (K_p + p_0) \cdot s + K_I.$$

Положение доминирующих полюсов зададим через значения их суммы и произведения: $x = \lambda_1 + \lambda_2 = -2$; $y = \lambda_1 \cdot \lambda_2 = 2$. Согласно разработанной методике найдем, исходя из равенства остатка R нулю, зависимости для подстройки пропорционального и интегрального коэффициентов регулятора:

$$R(s) = (K_p + p_0 + x \cdot (K_D + p_1 + x \cdot (p_2 + x \cdot p_3) - y \cdot p_3) - y \cdot (p_2 + x \cdot p_3)) \cdot s + K_I - y \cdot (K_D + p_1 + x \cdot (p_2 + x \cdot p_3) - y \cdot p_3);$$

$$\text{Re}(R(j \cdot \omega)) = 0 \rightarrow \begin{cases} K_I - y \cdot (K_D + p_1 + x \cdot (p_2 + x \cdot p_3) - y \cdot p_3) = 0 \\ K_I(K_D, p_0, p_1, p_2, p_3) = 2 \cdot p_1 - 4 \cdot p_2 + 4 \cdot p_3 + 2 \cdot K_D \end{cases}$$

$$\text{Im}(R(j \cdot \omega)) = 0 \rightarrow \begin{cases} K_p + p_0 + x \cdot (K_D + p_1 + x \cdot (p_2 + x \cdot p_3) - y \cdot p_3) - y \cdot (p_2 + x \cdot p_3) = 0 \\ K_p(K_D, p_0, p_1, p_2, p_3) = -p_0 + 2 \cdot p_1 - 2 \cdot p_2 + 2 \cdot K_D. \end{cases}$$

Рассчитаем коэффициенты свободного полинома

$$B(s) = b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0;$$

$$b_2 = [1; 1.1];$$

$$b_1 = [25.8; 30];$$

$$b_0 = [K_D + 152.8; K_D + 231.4].$$

Зная выражение для свободного полинома, выполнив подстановку $s \rightarrow \omega + j \cdot \omega$, построим кривые D-разбиения в плоскости K_D во всех вершинах многогранника коэффициентов свободного полинома, получим область значений K_D , при которых свободные полюсы располагаются в нужном секторе.

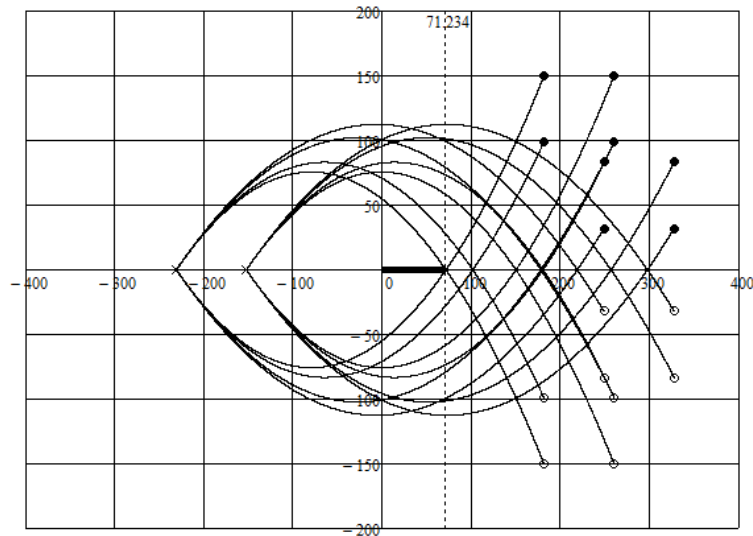


Рисунок 4.10 – D-разбиение для свободного полинома в плоскости K_D для задания максимальной степени колебательности

Таким образом, при $K_D \in [0; 71.234]$ свободные полюсы лежат внутри заданного сектора. Построим аналогичное D-разбиение с подстановкой $s \rightarrow -10 + j \cdot \omega$ и найдем область значений K_D , при которых вещественная часть свободных полюсов не превышает заданного значения.

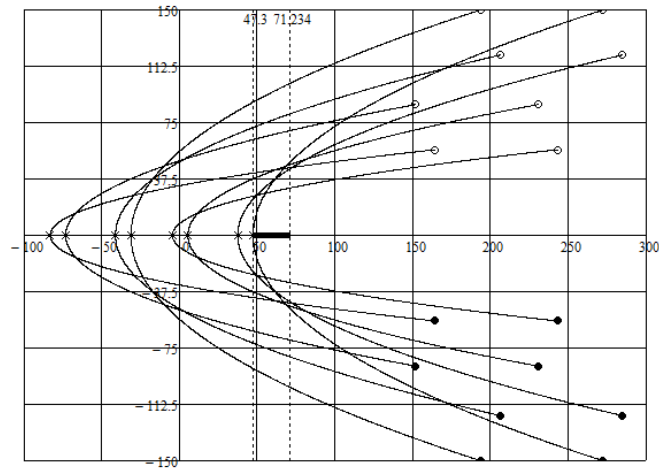


Рисунок 4.11 – D-разбиение для свободного полинома в плоскости K_D для задания максимальной вещественной части свободных полюсов

Из рисунков 4.10 и 4.11 видно, что расположение свободных полюсов в заданном усеченном секторе достигается при $K_D \in [47.300; 71.234]$. Выберем $K_D = 50$.

Таким образом, синтезированный адаптивно-робастный ПИД-регулятор имеет настройки

$$\begin{aligned} K_p(p_0, p_1, p_2, p_3) &= -p_0 + 2 \cdot p_1 - 2 \cdot p_2 + 100; \\ K_i(p_0, p_1, p_2, p_3) &= 2 \cdot p_1 - 4 \cdot p_2 + 4 \cdot p_3 + 100; \\ K_D &= 50. \end{aligned}$$

Построим МИКГ системы с синтезированным регулятором для оценки результатов синтеза.

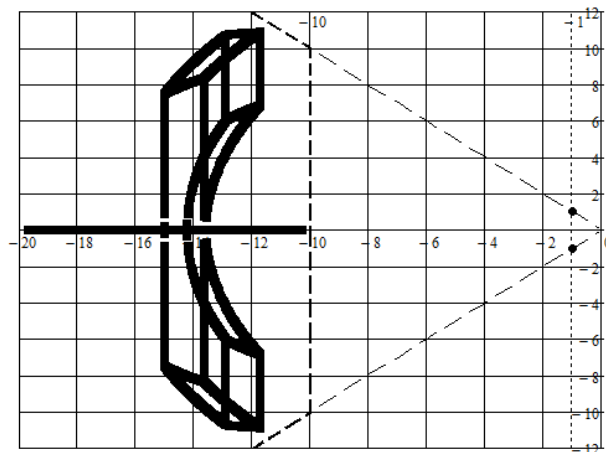


Рисунок 4.12 – МИКГ системы с адаптивно-робастным ПИД-регулятором

Из рисунка 4.12 очевидно, что синтезированный регулятор обеспечивает желаемое расположение полюсов системы. Для оценки качества переходного процесса построим переходные характеристики системы в вершинах ее параметрического многогранника.

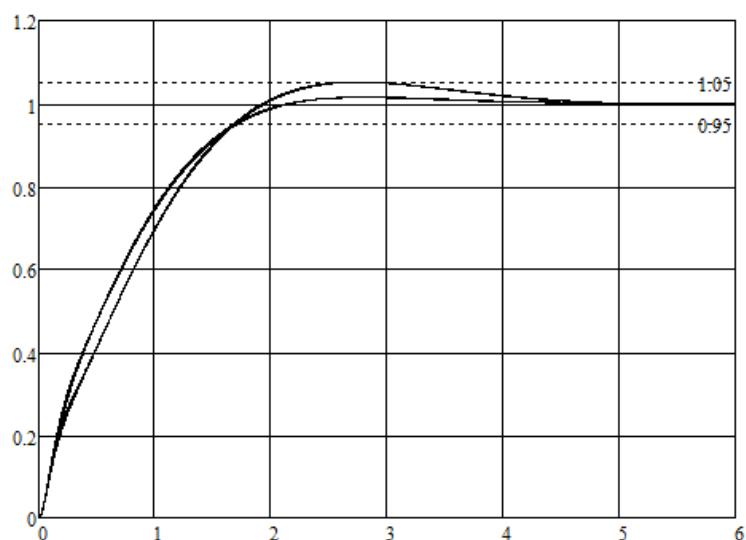


Рисунок 4.13 – Переходные характеристики системы с адаптивно-робастным ПИД-регулятором в вершинах ее параметрического многогранника

На рисунке 4.13 изображены 16 переходных характеристик, каждая из которых соответствует одной вершине параметрического многогранника системы. Малое отклонение характеристик друг от друга свидетельствует о высокой стабильности качества регулирования относительно изменения значений интервальных параметров.

5 Разработка системы управления движением ТНПА

В данном разделе рассмотрим разработку системы управления движением телеуправляемого необитаемого подводного аппарата.

Характеристики ТНПА приведены в таблице 5.1. Внешний вид и компоновка ДРК исследуемого ТНПА приведены на рисунке 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики исследуемого ТНПА

Параметр		Значение
Масса, кг		18
Длина, м		0,7
Ширина, м		0,5
Высота, м		0,4
Площадь миделя, м ²		0,039
Моменты инерции, кг·м ²	J_x	0,78
	J_y	0,80
	J_z	1,31
Координата центра водоизмещения, м		0,35
Координаты центра тяжести, м	x_g	0,08
	y_g	-0,05
Водоизмещение, м ³		0,02
Запас плавучести, Н		30

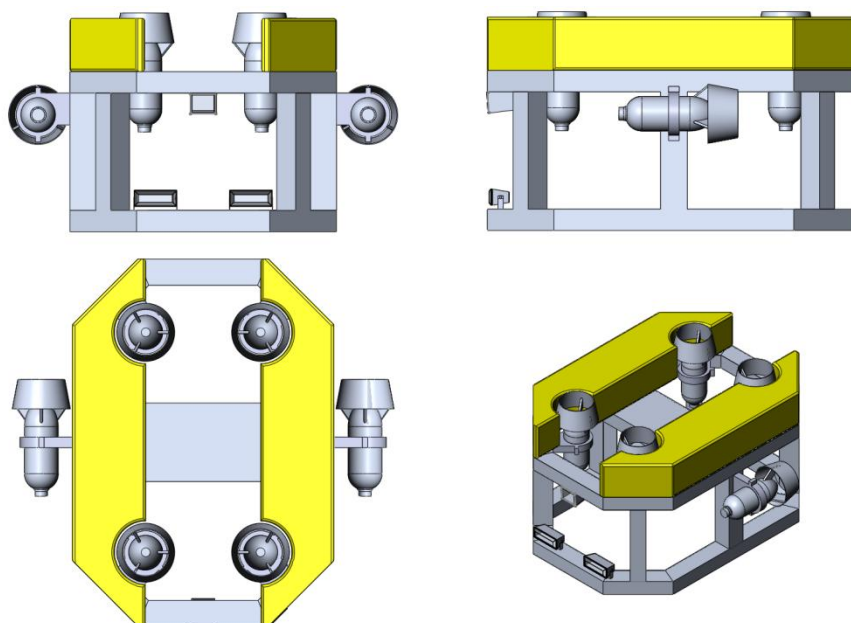


Рисунок 5.1 – Исследуемый ТНПА

Перечисленные характеристики дают большое количество информации о ТНПА, однако, не позволяют синтезировать для него систему управления. Недостающие характеристики, а именно значения коэффициентов гидродинамических сил и моментов, будем вычислять, исходя из данных, полученных с помощью моделирования обтекания исследуемого ТНПА.

Прежде чем приступить к расчетам, определим структуру разрабатываемой системы.

5.1 Разработка структуры СУ движением

Исследуемый ТНПА оснащен ДРК, обеспечивающим возможность движения маршем, всплытия и погружения, а также вращения вокруг всех трех осей координат. Соответственно, СУ движением будет состоять из шести контуров, регулирующих скорость движения ТНПА, координату НПА по продольной оси, глубину его погружения, углы курса, крена и дифферента.

Каждый такой контур представляет собой каскадную САР, внутренний контур которой регулирует скорость изменения регулируемого параметра, внешний – сам параметр. Во внутреннем контуре будем использовать ПИД-регулятор, во внешнем контуре – П-регулятор.

Каждый такой контур будет определять силу или момент, которые должны действовать на ТНПА в данный момент по каждой из осей. Тот факт, что силы и моменты обеспечиваются не одним движителем, а несколькими, каждый из которых в свою очередь используется для регулирования минимум двух параметров, вынуждает разработать систему распределения управляющих воздействий на элементы ДРК.

Структура разрабатываемой СУ движением ТНПА приведена на рисунке 5.2. Оператор ТНПА или программный задатчик формирует вектор уставок для параметров движения ТНПА. Уставки поступают на вход соответствующих контуров регулирования. Каждый контур регулирования

управляет одним из параметров движения, а также скоростью его изменения. Выработанные регуляторами управляющие сигналы, соответствующие силам и моментам, которые должны быть приложены к ТНПА, поступают в блок распределения упоров движителей. Блок распределения упоров движителей пересчитывает управляющие сигналы для ДРК в целом в управляющие сигналы для каждого из шести движителей. Упоры движителей изменяют положение и ориентацию аппарата. Изменившиеся значения параметров и скоростей их изменения передаются в контуры регулирования для вычисления рассогласования и дальнейшей работы.

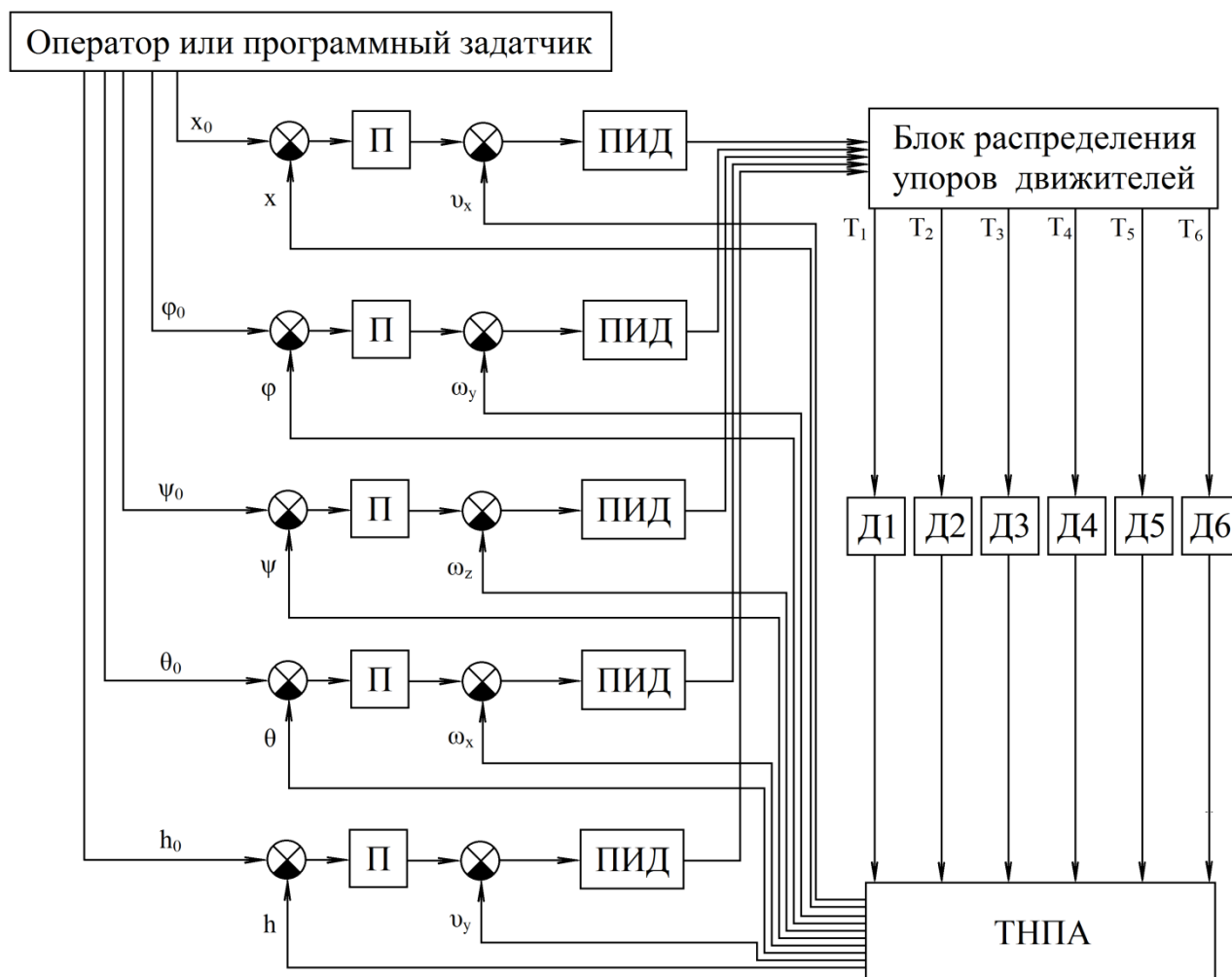


Рисунок 5.2 – Структура СУ движением ТНПА

Рассмотрим далее разработку элементов приведенной структуры.

5.2 Разработка блока задатчика

Назначение задатчика заключается в управлении вектором уставок регулируемых системой параметров. В частности, задатчик должен пересчитывать значение курса, вводимое оператором, а также обнулять текущее значение пройденного ТНПА расстояния.

Первая задача заключается разности представления курса оператором и аппаратом. Оператор ТНПА представляет себе курс как угол, изменяющийся в интервале от 0 до 360°. Для управления направлением движения ТНПА удобнее, чтобы курс изменялся от -180 до 180°. При этом также нужно учитывать периодичность изменения угла курса. Блок-схема пересчета вводимого оператором значения курса в уставку для контура регулирования приведена на рисунке 5.4

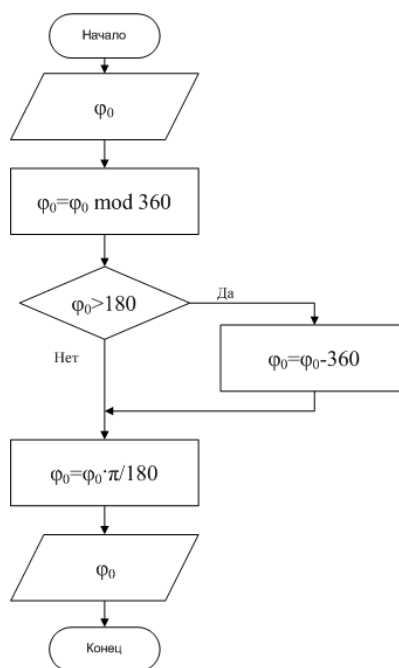


Рисунок 5.3 – Схема пересчета уставки курса

Согласно схеме на рисунке 5.2 пересчет уставки курса происходит следующим образом. На первом шаге оператор осуществляет ввод желаемого значения курса в градусах. На втором шаге обеспечивается изменение угла курса в пределах 360°. На третьем и четвертом шагах за счет вычитания из введенного значения угла курса 360° обеспечивается сдвиг интервала

изменения курса. Далее осуществляется перевод значения курса из градусов в радианы и вывод на вход контура регулирования курса.

Дополнительное управление требуется и контуру управления координатой ТНПА по его продольной оси. Ввиду того, что для задания длины пути используется не абсолютная, а относительная координата, перед началом отработки новой уставки необходимо обнулять переменную, хранящую длину пройденного пути.

Таким образом, задатчик разрабатываемой СУ движением ТНПА осуществляет пересчет уставки курса и обнуление пройденного ТНПА расстояния.

5.3 Разработка блока распределения упоров движителей и мультиплексирование движителей

Контуров регулирования формируют управляющие сигналы для всего ДРК в целом. Задача блока распределения упоров движителей пересчитать управляющие сигналы для ДРК в управляющие сигналы для каждого движителя.

Кроме этого, нужно учитывать, что каждый движитель используется для регулирования нескольких параметров. Необходимо организовать возможность использования движителя несколькими контурами регулирования без потери качества регулирования.

Рассмотрим пример пересчета управляющих сигналов для пары маршевых движителей, регулирующих скорость движения ТНПА и его курс.

Пусть контур регулирования скорости движения ТНПА сформировал управляющий сигнал T_x , определяющий силу, которая должна действовать на ТНПА вдоль оси x . Контур регулирования курса ТНПА сформировал управляющий сигнал M_y , соответствующий моменту вращения ТНПА вокруг оси y . Необходимо одновременно обеспечить рассчитанную силу и

момент с помощью двух маршевых движителей с упорами T_1 и T_2 , каждый из которых расположен на расстоянии a от центра тяжести ТНПА.

Очевидно, что пара маршевых движителей создает момент равный

$$M = T_2 \cdot a - T_1 \cdot a = \Delta T \cdot a.$$

Таким образом, для обеспечения желаемого момента необходимо обеспечить разность упоров движителей

$$\Delta T = \frac{M_y}{a}.$$

Для равномерного износа движителей будем изменять их упор на половину требуемого значения:

$$\Delta T_i = \frac{M_y}{2 \cdot a}$$

Силу T_x также будем распределять между двумя движителями равномерно. Таким образом, значения управляющих сигналов маршевых движителей следует пересчитывать по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{T_x}{2} - \frac{M_y}{2 \cdot a}; \\ T_2 &= \frac{T_x}{2} + \frac{M_y}{2 \cdot a}. \end{aligned} \tag{5.1}$$

При этом отрицательные значения M_y соответствуют повороту налево, положительные – направо.

Программно ограничим каждую составляющую приведенных выше выражения 40% от максимального упора движителя. Это позволит в любой момент времени обеспечить желаемое значение упора вне зависимости от упора движителя в предыдущий момент времени.

Фактически, пара маршевых движителей создает направленный вектор тяги, модуль которого можно изменять за счет изменения упоров движителей, направление – за счет разности упоров движителей.

Зависимости для пересчета упоров вертикальных движителей несколько сложнее ввиду того, что каждый вертикальный движитель

регулирует одновременно три параметра: плавучесть ТНПА, крен или дифферент, глубину погружения ТНПА. Рассмотрим далее пересчет упоров для пары движителей, расположенных на продольной оси ТНПА, оснащенного двумя парами движителей, расположенных на продольной и поперечной осях ТНПА.

Положительным считается дифферент, при котором осадка носа судна больше осадки его кормы. Таким образом, за положительное направление действия управляющего момента примем направление против часовой стрелки относительно оси z . Кроме регулирования дифферента, вертикальные движители, расположенные на продольной оси ТНПА, выполняют также компенсацию положительной плавучести и регулирование глубины погружения. Добавив соответствующие составляющие в выражения для пересчета упоров движителей, получим:

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} + \frac{M_z}{2 \cdot a}; \\ T_4 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} - \frac{M_z}{2 \cdot a}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

На компенсацию положительной плавучести выделим 25% максимального упора каждого движителя; на регулирование дифферента и глубины погружения выделим по 30% максимального упора каждого движителя.

Рассмотрим пересчет упоров для вертикальных движителей, расположенных на поперечной оси ТНПА. Эти движители применяются для регулирования крена, компенсации положительной плавучести ТНПА, а также для регулирования глубины погружения ТНПА.

Положительным считается крен на правый борт, отрицательным – на левый. В соответствии с этим, по аналогии с выражениями (5.2) запишем выражения для пересчета упоров движителей, регулирующих крен:

$$\begin{aligned} T_5 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} + \frac{M_x}{2 \cdot a}; \\ T_6 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} - \frac{M_x}{2 \cdot a}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

На компенсацию положительной плавучести выделим 25% максимального упора каждого движителя; на регулирование крена и глубины погружения выделим по 30% максимального упора каждого движителя.

Рассмотрим теперь выражения для пересчета упоров движителей для исследуемого ТНПА. Очевидно, что каждый вертикальный движитель вносит используется как для регулирования крена, так и для регулирования дифферента. Таким образом, в выражении для пересчета упора будет уже не три составляющих, как в (5.2) и (5.3), а четыре. Запишем последовательно выражения для пересчета упора переднего правого, переднего левого, заднего правого и заднего левого движителей:

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} + \frac{M_z}{2 \cdot a} + \frac{M_x}{2 \cdot b}; \\ T_4 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} + \frac{M_z}{2 \cdot a} - \frac{M_x}{2 \cdot b}; \\ T_5 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} - \frac{M_z}{2 \cdot a} + \frac{M_x}{2 \cdot b}; \\ T_6 &= \frac{T_p}{4} + \frac{T_y}{4} - \frac{M_z}{2 \cdot a} - \frac{M_x}{2 \cdot b}. \end{aligned} \tag{5.4}$$

В данном случае, на регулирование каждого параметра отведем по 20% максимального упора вертикального движителя.

Таким образом, выведенные выражения позволяют рассчитывать упоры каждого движителя в отдельности, при которых реализуются управляющие воздействия, выработанные контурами регулирования.

Разработав все вспомогательные компоненты системы, перейдем к синтезу контуров регулирования параметров движения системы.

5.4 Синтез регуляторов контуров регулирования системы

5.4.1 Расчет гидродинамических параметров ТНПА

Для выполнения синтеза необходимо рассчитать коэффициенты присоединенных масс ТНПА, коэффициенты его гидродинамических сил и моментов.

Известно, что коэффициенты гидродинамических сил и моментов связаны с проекциями сил, действующих на ТНПА со стороны жидкости выражениями (1.1) и (1.2). Также известно, что эти коэффициенты изменяются в зависимости от скорости движения ТНПА, углов атаки и дрейфа. Таким образом, для расчета коэффициентов гидродинамических сил и моментов нужно найти зависимости этих сил и моментов от скорости движения ТНПА, углов атаки и дрейфа. Пример таких зависимостей приведен на рисунке 3.2. Известно, что зависимости гидродинамических сил и моментов от углов атаки и дрейфа определяются выражением (1.3). Следовательно, осталось экспериментальным путем выяснить зависимости гидродинамических сил и моментов от скорости движения ТНПА.

Находить упомянутые зависимости будем на основании данных виртуального эксперимента по построению поля давлений при различных скоростях движения аппарата. Затем, исходя из распределения давления жидкости по поверхности ТНПА, вычислим силы и моменты, действующие на него со стороны жидкости. После этого, воспользовавшись выражениями (1.1) и (1.2) выразим значения коэффициентов гидродинамических сил и моментов.

Рассмотрим методику вычисления коэффициентов гидродинамических сил и моментов на примере движения ТНПА вдоль и вокруг оси x . Будем исследовать характер обтекания ТНПА при изменении скорости его движения от -2 до 2 м/с. Для каждого значения скорости будем строить поле давлений. Пример построенного поля давления окружающей аппарат жидкости представлен на рисунке 5.4

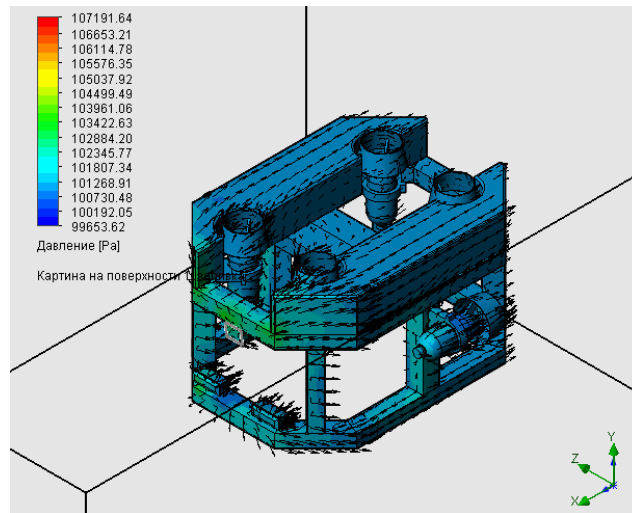


Рисунок 5.4 – Поле давлений на поверхности ТНПА, движущегося со скоростью 2 м/с

Исходя из распределения давления по поверхности аппарат, рассчитаем для каждого значения скорости движения ТНПА силу лобового сопротивления движению R_x и гидродинамический момент вращения вокруг оси x M_x . Зависимости этих характеристик от скорости движения ТНПА представлены на рисунке 5.5.

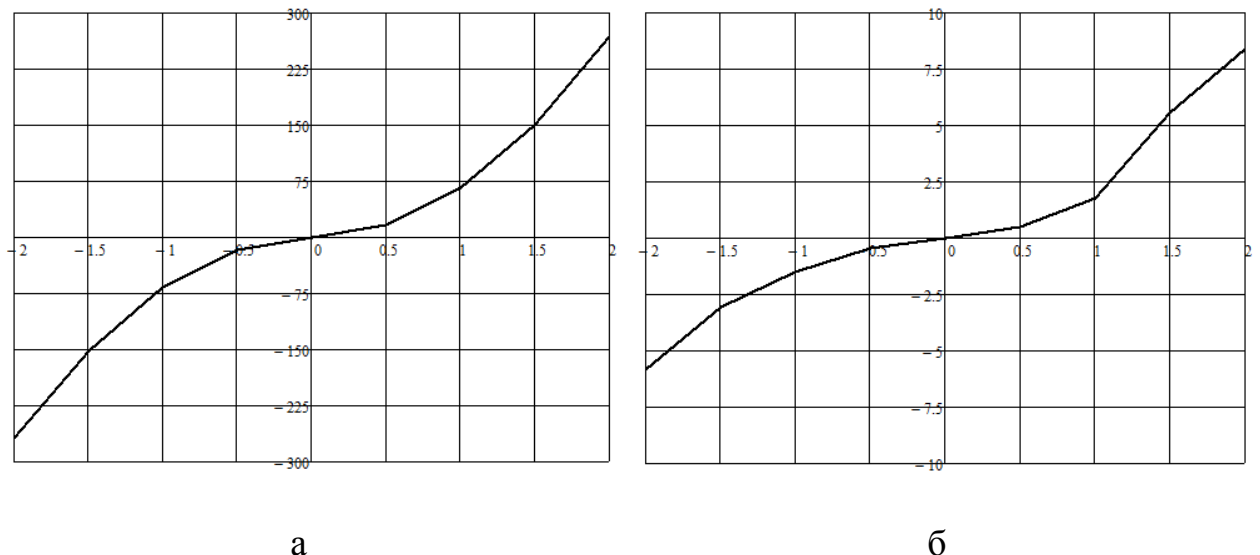


Рисунок 5.5 – Зависимости R_x (а) и M_x (б) от скорости движения ТНПА

Известно, что гидродинамические силы и моменты прямо пропорциональны квадрату скорости движения объекта в воде. Проверим

полученные в ходе имитационного моделирования данные, построив графики зависимостей R_x и M_x от квадрата скорости движения ТНПА (рисунок 5.6).

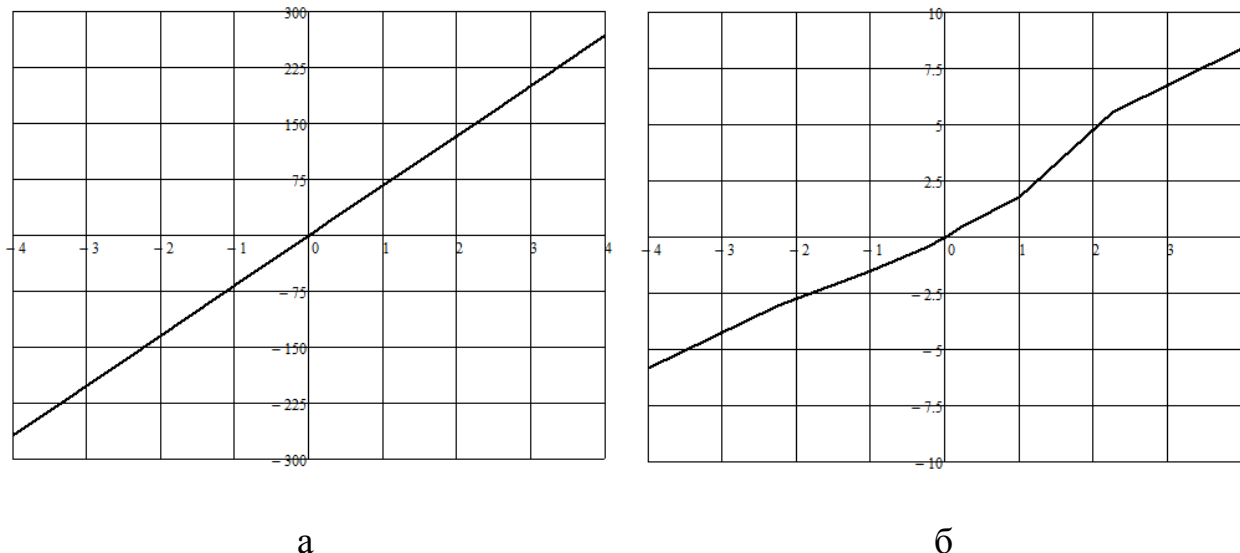


Рисунок 5.6 – Зависимости R_x (а) и M_x (б) от квадрата скорости ТНПА

Очевидно, что исследуемые величины прямо пропорциональны произведению скорости ТНПА на ее модуль.

Воспользовавшись выражениями (1.1) и (1.2), рассчитаем для каждого значения скорости значение гидродинамических коэффициентов c_{x_1} и m_{x_1} . Получим, что $c_{x_1} = 1,775 \pm 0,005$; $m_{x_1} = 0,2 \pm 0,01$ при движении вперед, $m_{x_1} = 0,15 \pm 0,01$ при движении назад на реверсивной тяге.

Проведя аналогичные эксперименты и вычисления, рассчитаем для каждого гидродинамического параметра исследуемого ТНПА интервал изменения, а также точное значение и погрешность. Результаты расчетов сведем в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Значения гидродинамических параметров ТНПА

Обозначение	Интервал значений	Точное значение с погрешностью	
c_{x1}	—	$1,775 \pm 0,005$	
c_{y1}	—	$3,623 \pm 0,008$	
c_{z1}	—	$2,55 \pm 0,08$	
m_{x1}	[0,14;0,21]	$v_x < 0$	$0,15 \pm 0,01$
		$v_x > 0$	$0,2 \pm 0,01$
m_{y1}	[0,047;0,097]	$v_y < 0$	$0,091 \pm 0,006$
		$v_y > 0$	$0,049 \pm 0,002$
m_{z1}	[−0,514;−0,00546]	$v_z < 0$	$-(5,52 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$
		$v_z > 0$	$-0,511 \pm 0,003$

Для учета изменения гидродинамических сил и моментов с изменением углов атаки и дрейфа, воспользуемся выражениями (1.3). Результаты сведем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Гидродинамические параметры ТНПА

	Интервал значений	Функциональная зависимость от углов атаки и дрейфа	
c_x	[−4,773;4,773]	$1,775 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - 3,623 \cdot \sin(\alpha) + 2,55 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)$	
c_y	[−4,773;4,773]	$3,623 \cdot \cos(\alpha) + 2,55 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) + 1,775 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta)$	
c_z	[−3,103;3,103]	$2,55 \cdot \cos(\beta) - 1,775 \cdot \sin(\beta)$	
m_x	[−0,551;0,551]	$v_x < 0$	$0,15 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) + 0,091 \cdot \sin(\alpha) + 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)$
		$v_x > 0$	$0,2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) + 0,049 \cdot \sin(\alpha) + 0,511 \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta)$
m_y	[−0,551;0,551]	$v_y < 0$	$0,091 \cdot \cos(\alpha) - 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - 0,15 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta)$
		$v_y > 0$	$0,049 \cdot \cos(\alpha) - 0,511 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - 0,2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta)$
m_z	[−0,549;0,549]	$v_z < 0$	$-5,5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(\beta) + 0,15 \cdot \sin(\beta)$
		$v_z > 0$	$-0,511 \cdot \cos(\beta) + 0,2 \cdot \sin(\beta)$

Определившись со значениями коэффициентов гидродинамических сил и моментов, перейдем к расчету матрицы присоединенных масс. Из рисунка 5.1 видно, что исследуемый ТНПА симметричен относительно своей диаметральной плоскости. Согласно [1] и [3], если аппарат симметричен относительно диаметральной плоскости, матрица присоединенных масс имеет вид:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{16} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{43} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & \lambda_{54} & \lambda_{55} & 0 \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{vmatrix}.$$

По свойству симметричности матрицы присоединенных масс относительно главной диагонали между собой равны λ_{ij} и λ_{ji} . Исходя из этого, при расчете обтекания исследуемого ТНПА значимы коэффициенты, лежащие на главной диагонали, а также $\lambda_{12}, \lambda_{16}, \lambda_{26}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{45}$; всего – 12 коэффициентов из 36.

Аппроксимируя корпус исследуемого ТНПА примитивными фигурами, и, рассчитывая для них присоединенные массы, получим:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} 21,135 & 22,498 & 0 & 0 & 0 & 14,850 \\ 22,498 & 23,86 & 0 & 0 & 0 & 9,654 \\ 0 & 0 & 46,566 & 21,332 & 34,497 & 0 \\ 0 & 0 & 21,332 & 10,517 & 21,493 & 0 \\ 0 & 0 & 34,497 & 21,493 & 30,473 & 0 \\ 14,850 & 9,654 & 0 & 0 & 0 & 0,183 \end{vmatrix}.$$

Зная значения коэффициентов присоединенных масс, а также коэффициентов гидродинамических сил, можем оценить максимальную скорость ТНПА при движении вдоль осей x и y . Очевидно, что максимальная скорость ТНПА достигается тогда, когда совокупный упор движителей оказывается равен силе сопротивления движению. Исходя из этого, запишем для оси x :

$$T_x - c_x \cdot v_{x_max}^2 = 0$$

$$v_{x_max} = \sqrt{\frac{T_x}{c_x}} = \sqrt{\frac{40}{4,773}} = 2,895 \text{ м/с}.$$

Таким образом, примем интервал изменения скорости движения ТНПА вдоль оси x равным $v_x = [0; 2,895] \text{ м/с}$. Аналогично рассчитаем границы интервала изменения скорости движения ТНПА вдоль оси y . Получим $v_y = [0; 2,895] \text{ м/с}$.

Зная значения всех гидродинамических параметров ТНПА, перейдем к синтезу регуляторов контуров управления параметрами движения ТНПА.

5.4.2 Синтез регуляторов СУ движением ТНПА

Воспользовавшись методиками, описанными в разделе 4, настроим регуляторы контуров разрабатываемой СУ движением ТНПА. Исходя из требований к ТНПА, выявленных в процессе обзора литературы по теме исследования, будем обеспечивать в контурах апериодические переходные процесса с нулевым перерегулированием.

Далее будут использоваться ПИД-регуляторы и П-регуляторы, передаточные функции даны в разделе 4.

Рассмотрим последовательно результаты настройки регуляторов каждого контура системы.

Глубина погружения ТНПА управляются каскадной САР, внутренний контур которой регулирует скорость погружения, внешний – глубину погружения. Параметры ПИД-регулятора внутреннего контура: $K_p = 5$, $K_i = 1.628$, $K_d = 3.405$. Передаточный коэффициент П-регулятора внешнего контура равен 0.55. Переходные характеристики контура регулирования глубины погружения изображены на рисунке 5.7.

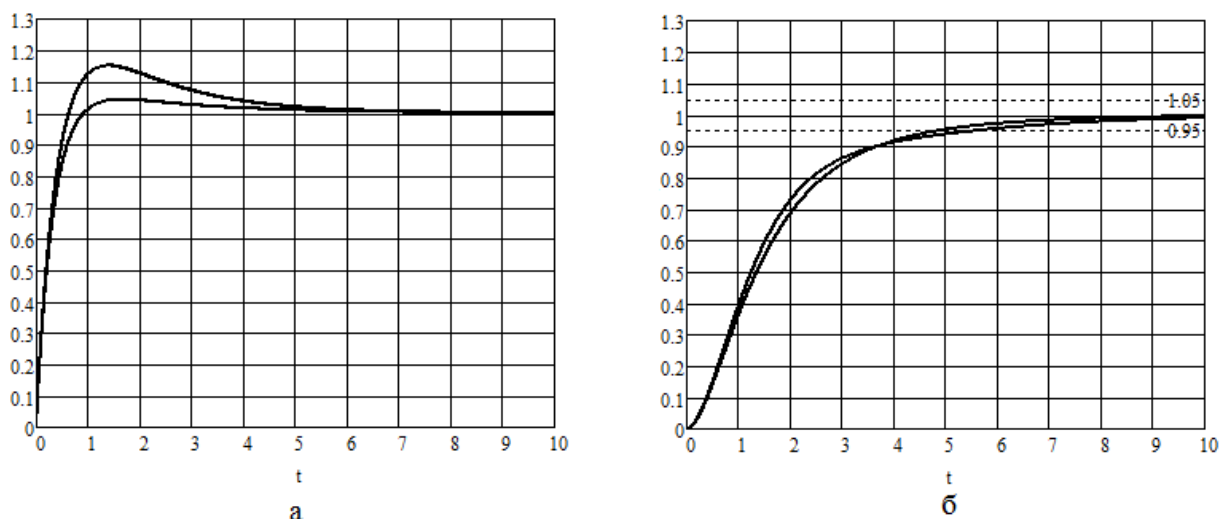


Рисунок 5.7 – Переходный процесс при регулировании скорости погружения (а) и глубины погружения (б)

Из рисунка 5.7 видно, что скорость контур регулирования скорости обладает хорошей динамикой; работа внешнего контура системы обеспечивает плавное управление глубиной погружения без перерегулирования.

Перемещение ТНПА на заданное расстояние управляется каскадной САР. ПИД-регулятор внутреннего контура регулирует скорость перемещения ТНПА и имеет следующие параметры: $K_p = 11,8$, $K_i = 5,555$, $K_d = 6.245$. П-регулятор внешнего контура управляет расстоянием перемещения ТНПА; его передаточный коэффициент равен 1,5. Переходные характеристики канала управления перемещением изображена на рисунке 5.8.

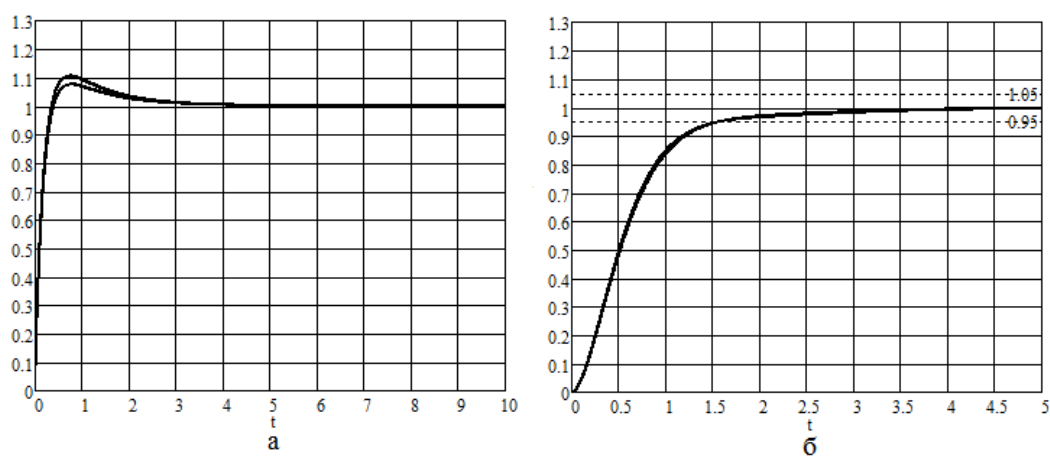


Рисунок 5.8 – Переходный процесс при регулировании скорости (а) и расстояния перемещения ТНПА (б)

Дифферент ТНПА управляется каскадной САР. ПИД-регулятор внутреннего контура управляет скоростью вращения ТНПА вокруг оси z и имеет следующие параметры: $K_p = 92$, $K_I = 44,761$, $K_D = 4,789$. П-регулятор внешнего контура управляет углом дифферента ТНПА, его передаточный коэффициент равен 1.1. Переходные характеристики контура регулирования дифферента изображены на рисунке 5.10.

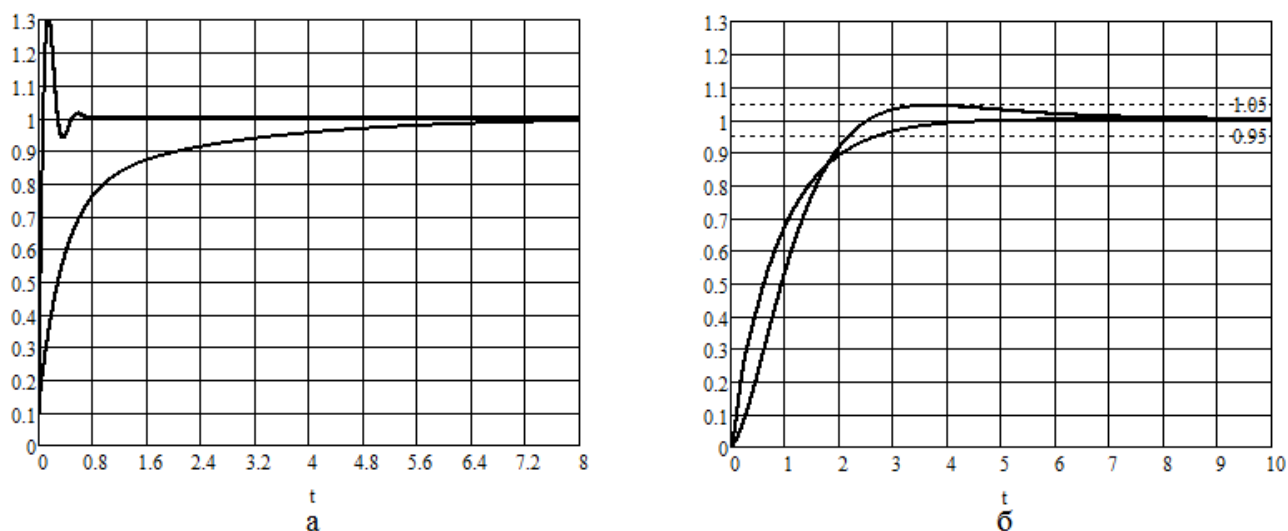


Рисунок 5.10 – Переходные процессы при регулировании скорости изменения дифферента (а) и значения дифферента (б)

Курс ТНПА управляется каскадной САР. ПИД-регулятор внутреннего контура управляет скоростью вращения ТНПА вокруг оси y и имеет следующие параметры: $K_p = 120$, $K_I = 40,471$, $K_D = 62,559$. П-регулятор внутреннего контура управляет значением курса; его передаточный коэффициент равен 1.5. Переходные характеристики контура регулирования курса изображены на рисунке 5.11.

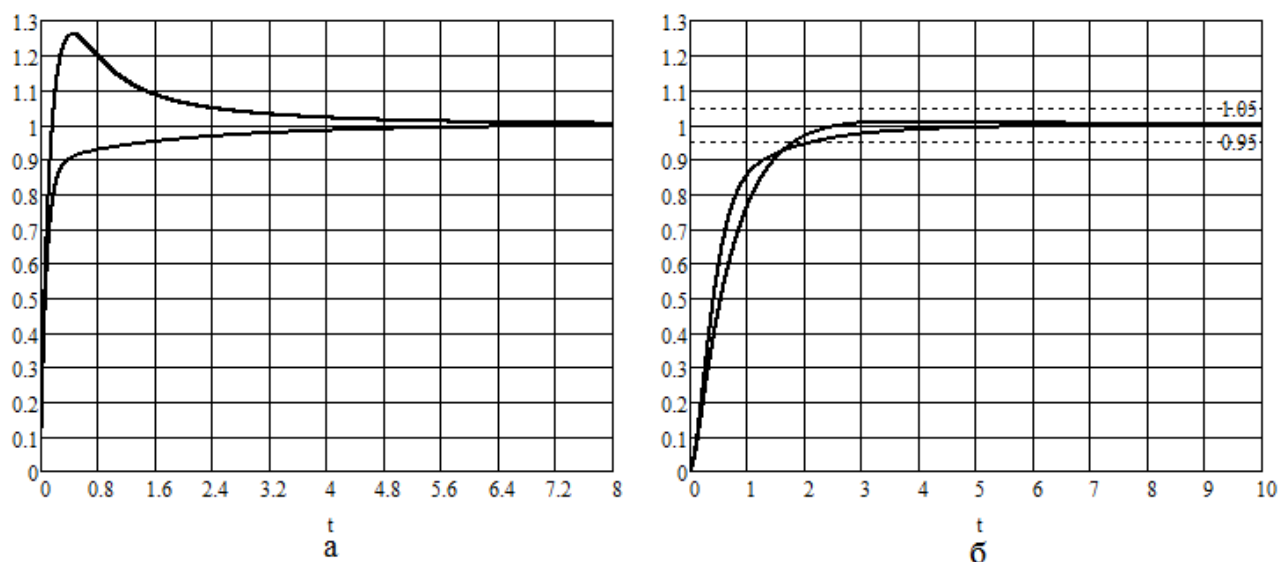


Рисунок 5.11 – Переходные процессы при регулировании скорости
изменения курса ТНПА (а) и значения курса (б)

Крен ТНПА управляется каскадной САР. ПИД-регулятор внутреннего контура управляет скоростью вращения ТНПА вокруг оси x и имеет следующие параметры: $K_p = 105$, $K_i = 35,74$, $K_d = 54,749$. П-регулятор внешнего контура управляет значением крена; его передаточный коэффициент равен 1.1. Переходные характеристики контура регулирования крена ТНПА изображены на рисунке 5.12.

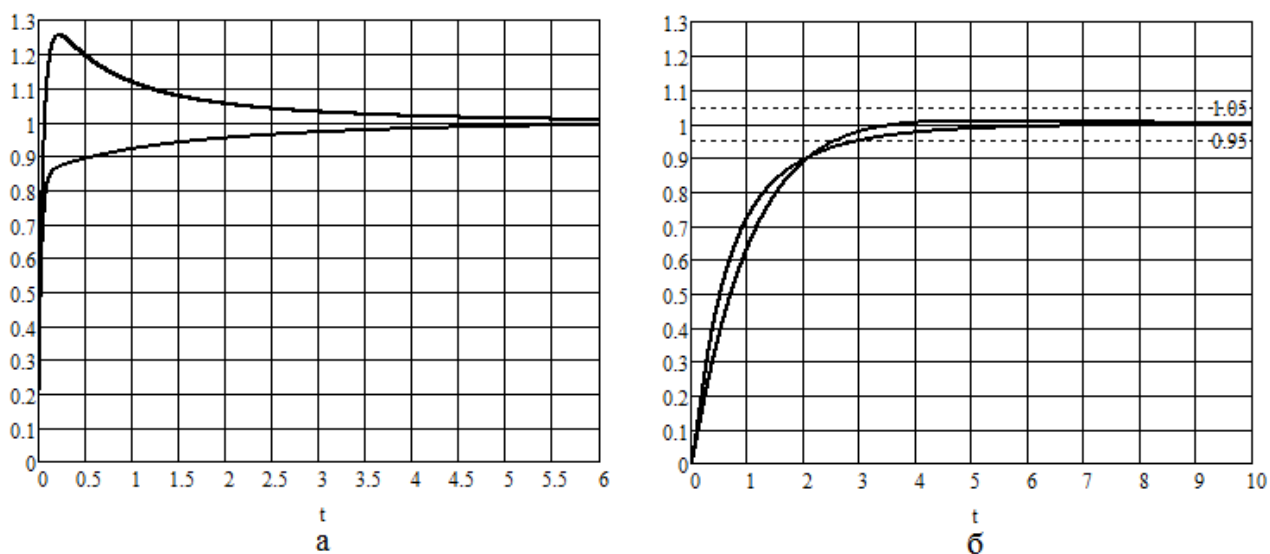


Рисунок 5.12 – Переходные процессы при регулировании скорости
изменения крена ТНПА (а) и значения крена (б)

Исходя из приведенных переходных характеристик, можно утверждать, что задача синтеза робастных регуляторов для системы управления движением ТНПА решена успешно. Согласно определенным ранее требованиям, все переходные процессы в системе – апериодические и характеризуются небольшим перерегулированием в 0–5%. Одновременно с этим, удалось сохранить динамику системы: время регулирования ни в одном из контуров не превышает 5 с.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1 Организация и планирование работ

Зная конечную цель исследований, а также изучив опыт ученых, решавших задачи, подобные решенным в данной работе, определим полный перечень и очередность работ. Для каждого из выделенных этапов определим его исполнителей и долю участия каждого из исполнителей в его выполнении. Полученные результаты сведем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Перечень выполняемых работ и доля участия исполнителей

Этап работы	Исполнители и их участие в работе
1 Получение исходных данных	–
1.1 Постановка цели и задач исследования	НР=70% И=30%
1.2 Изучение существующих подходов к решению поставленных задач	–
1.2.1 Подбор источников и изучение основ гидродинамики НПА	И=100%
1.2.2 Подбор источников и изучение подходов к идентификации НПА и их ДРК	И=100%
1.2.3 Подбор источников и изучение подходов к робастному и адаптивному управлению НПА	НР=20% И=80%
1.3 Разработка и утверждение технического задания	НР=30% И=70%
2 Разработка собственных оригинальных подходов к решению поставленных задач	–
2.1 Разработка способа декомпозиции многомерной математической модели процесса движения НПА с помощью введения интервальных параметров	И=100%
2.2 Разработка способа оценки значений границ интервалов изменения гидродинамических параметров НПА	И=100%
2.3 Разработка методик синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	НР=40% И=60%
2.4 Разработка методик синтеза адаптивно-робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	НР=25% И=75%

3 Апробация разработанных методик на реальной задаче	–
3.1 Построение математических моделей контуров регулирования параметров движения НПА	И=100%
3.2 Оценка границ интервалов параметров математических моделей	И=100%
3.3 Синтез робастных регуляторов контуров регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик	И=100%
3.4 Синтез адаптивно-робастных регуляторов контуров регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик	И=100%
3.5 Моделирование совместной работы синтезированных контуров и оценка качества полученных результатов	И=100%
4 Оформление расчетно-пояснительной записки	И=100%
5 Подведение итогов	НР=40% И=60%

Кратко опишем течение и результаты каждого этапа работы. Первый этап начинается с постановки в общих формулировках научным руководителем цели исследования. После тщательного изучения нюансов решения связанных с достижением поставленной цели задач инженер предлагает максимально детальный план работ, который утверждается научным руководителем при достаточной глубине проработки.

Результатом выполнения второго этапа является комплекс математических инструментов, позволяющих решить широкий спектр задач моделирования и синтеза систем автоматического управления с интервальными параметрами, в том числе и задачи, утвержденные руководителем в техническом задании.

Третий этап, помимо решения реальной задачи, даст информацию о применимости разработанных методик к процессу проектирования контуров системы управления движением НПА и позволит оценить результаты проектирования с помощью общепринятых показателей качества.

Результаты четвертого этапа очевидно. На пятом этапе предполагается представление полученных инженером результатов на оценку руководителю.

Зная состав и очередность работ, а также распределение нагрузки между руководителем и инженером для каждой из них, спланируем трудозатраты на выполнение работ.

6.1.1 Продолжительность этапов работ

Ввиду отсутствия нормативной базы по проводимым работам, а также достоверной информации о процессе выполнения аналогичных работ другими исполнителями, воспользуемся экспертным способом оценки продолжительности выполнения запланированных работ.

Для этого для каждого этапа определим, исходя из собственного опыта, минимальное и максимальное время выполнения. Затем, воспользовавшись следующей формулой, рассчитаем ожидаемое время выполнения работ:

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

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемое время выполнения i -го этапа работ в чел.-дн.; $t_{\text{min}i}; t_{\text{max}i}$ – оптимистическая и пессимистическая оценка времени выполнения i -го этапа работ в чел.-дн. соответственно.

Ожидаемое, минимальное и максимальное время исполнения оцениваются в рабочих днях на человека; переведем эти величины в календарные дни. Для этого воспользуемся формулой:

$$T_{\text{Кд}i} = T_{\text{Рд}i} \cdot T_{\text{К}},$$

где $T_{\text{Кд}i}$ – время выполнения i -го этапа работ в календарных днях; $T_{\text{Рд}i}$ – продолжительность выполнения i -го этапа работ в рабочих днях с учетом возможных потерь времени; $T_{\text{К}}$ – коэффициент календарности.

Продолжительность работ с учетом вероятных потерь времени $T_{РД}$ будем рассчитывать по формуле:

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

где $K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов (фактически, вероятность корректности установленных минимальное и максимальной границ времени выполнения работ; примем $K_{ВН}=1$); $K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий потери времени на непредвиденные задержки и согласование работ (обычно выбирается исполнителем в интервале $K_{Д}=1...1,2$; примем $K_{Д}=1,2$).

Коэффициент календарности $T_{К}$ равен отношению числа календарных дней в году к числу рабочих дне в году и рассчитывается по формуле:

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

где $T_{КАЛ}$ – количество календарных дней в году; $T_{ВД}, T_{ПД}$ – количество выходных и праздничных дней в году соответственно. Согласно производственному календарю, построенному с учетом шестиндевной рабочей недели, в 2016 году 366 дней, 66 выходных и праздничных дней. Таким образом, коэффициент календарности для текущего года равен:

$$T_{К} = \frac{366}{366 - 66} = 1,22.$$

Воспользовавшись данными из таблицы 6.1 и приведенными выше формулами, рассчитаем продолжительность выполнения работ руководителем и инженером в календарных днях. Результаты расчетов сведем в таблицу 6.2. На основе данных таблицы 6.2 составим линейный график работ (таблица 6.3).

Таблица 6.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители НР – научный руководитель; И – инженер	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям, чел.-дн.			
		$t_{\min}$	$t_{\text{о.ж.}}$	$t_{\max}$	$T_{\text{РД}}$		$T_{\text{КД}}$	
					НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка цели и задач исследования	НР, И	1	1,400	2	1,176	0,504	2	1
Подбор источников и изучение основ гидродинамики НПА	И	12	13,600	16	0	16,320	0	20
Подбор источников и изучение подходов к идентификации НПА и их ДРК	И	5	5,800	7	0	6,960	0	9
Подбор источников и изучение подходов к робастному и адаптивному управлению НПА	НР, И	5	5,800	7	1,392	5,568	2	7
Разработка и утверждение технического задания	НР, И	2	2,400	3	0,864	2,016	2	3
Разработка способа декомпозиции многомерной математической модели процесса движения НПА с помощью введения интервальных параметров	И	2	2,400	3	0	2,880	0	4
Разработка способа оценки значений границ интервалов изменения гидродинамических параметров НПА	И	5	5,800	7	0	6,96	0	9
Разработка методик синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	НР, И	23	23,800	25	11,424	17,136	14	21
Разработка методик синтеза адаптивно-робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	НР, И	2	2,400	3	0,720	2,160	1	3
Построение математических моделей контуров регулирования параметров движения НПА	И	3	3,400	4	0	4,080	0	5
Оценка границ интервалов параметров математических моделей разработанным способом	И	6	6,800	8	0	8,160	0	10
Синтез робастных регуляторов контуров регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик	И	2	2,400	3	0	2,880	0	4
Синтез адаптивно-робастных регуляторов контуров	И	4	4,800	6	0	5,760	0	8

регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик								
Моделирование совместной работы синтезированных контуров и оценка качества полученных результатов	И	1	1,400	2	0	1,680	0	3
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	6	6,400	7	0	7,680	0	10
Подведение итогов	НР, И	1	1,400	2	0,672	1,008	1	2
Итого		80	90	105	16,248	91,752	22	119

Таблица 6.3 – Линейный график работ

Этап	Исполн.	январь				февраль				март				апрель				май				июнь			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Постановка цели и задач исследования	НР (2)	■																							
	И (1)	■																							
Подбор источников и изучение основ гидродинамики НПА	И (20)	■	■	■																					
Подбор источников и изучение подходов к идентификации НПА и их ДРК	И (9)				■	■																			
Подбор источников и изучение подходов к робастному и адаптивному управлению НПА	НР (2)					■																			
	И (7)					■	■																		
Разработка и утверждение технического задания	НР (2)						■																		
	И (3)						■																		
Разработка способа декомпозиции многомерной математической модели процесса движения НПА с помощью введения интервальных параметров	И (4)							■																	
Разработка способа оценки значений границ интервалов изменения гидродинамических параметров НПА	И (9)							■	■																
Разработка методик синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	НР (14)								■	■	■	■	■												

6.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Зная трудоемкость проекта в целом, а также трудоемкости отдельных его этапов, просчитаем нарастание технической готовности проекта по мере выполнения этапа. Степень готовности будем рассчитывать по формуле:

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

где $TP_{k,j}$ – трудоемкость k -го этапа работ для j -го исполнителя; $TP_{общ}$ – общая трудоемкость проекта для всех исполнителей; i, m – количество этапов работы и исполнителей соответственно. Данные для расчета будем брать из столбцов 7 и 8 таблицы 6.2; результаты расчетов сведем в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Нарастание технической готовности проекта

Этап	Доля этапа в трудоемкости проекта, %	Степень готовности, %
Постановка цели и задач исследования	1,56	1,56
Подбор источников и изучение основ гидродинамики НПА	15,11	16,67
Подбор источников и изучение подходов к идентификации НПА и их ДРК	6,44	23,11
Подбор источников и изучение подходов к робастному и адаптивному управлению НПА	6,44	29,56
Разработка и утверждение технического задания	2,67	32,22
Разработка способа декомпозиции многомерной математической модели процесса движения НПА с помощью введения интервальных параметров	2,67	34,89
Разработка способа оценки значений границ интервалов изменения гидродинамических параметров НПА	6,44	41,33
Разработка методик синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	26,44	67,78
Разработка методик синтеза адаптивно-робастных регуляторов, обеспечивающих желаемое расположение полюсов системы	2,67	70,44
Построение математических моделей контуров регулирования параметров движения НПА	3,78	74,22
Оценка границ интервалов параметров математических моделей разработанным способом	7,56	81,78
Синтез робастных регуляторов контуров регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик	2,67	84,44

Синтез адаптивно-робастных регуляторов контуров регулирования параметров движения НПА с использованием разработанных методик	5,33	89,78
Моделирование совместной работы синтезированных контуров и оценка качества полученных результатов	1,56	91,33
Оформление расчетно-пояснительной записки	7,11	98,44
Подведение итогов	1,56	100,00

6.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Расчет сметной стоимости выполнения комплекса работ производится по следующим статьям затрат:

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

В процессе выполнения работ исполнители не несут командировочных расходов, расходов на оплату услуг связи; также нет необходимости использовать услуги сторонних организаций или арендованное имущество. Таким образом, необходимо рассчитать расходы на материалы и покупные изделия, заработную плату исполнителей, социальный налог, расходы на электроэнергию, амортизацию и накладные расходы.

6.2.1 Расчет расходов на материалы и покупные изделия

Планируемые работы заключаются в проведении теоретических исследований и не предполагают проведения натурных экспериментов или изготовления устройств. В состав используемого для исследований оборудования входит только персональный компьютер, однако, его стоимость

не входит в сумму затрат на материалы, так как компьютер был приобретен ранее, а не специально для проекта. Специфическое программное обеспечение удалось получить от производителей бесплатно по академической лицензии, следовательно, удалось избежать и этой части расходов. Таким образом, материальные затраты состоят из расходов на канцелярские принадлежности, расходные материалы для принтера.

В материальные затраты также входят транспортно-заготовительные расходы (ТЗР), обусловленные затратами на совершение сделок купли-продажи материалов, на их доставку к месту использования. Обычно транспортно-заготовительные расходы оцениваются в 5...20% от цены материалов. Примем норму ТЗР $k_{ТЗР} = 0,2$.

С учетом сказанного выше, будем оценивать материальные затраты Z_M по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_{ТЗР}) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_i,$$

где C_i и N_i – цена и используемое количество i -го ресурса соответственно; m – количество используемых ресурсов.

Структуру и величину материальных затрат отобразим в таблице 6.5

Таблица 6.5 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма
Бумага для принтера, упак. 500 листов	257	2	514
Ручка капиллярная, шт.	73	5	365
Тетрадь общая формата А4, шт.	97	5	485
Папка-скоросшиватель, шт.	73	3	219
Мультифоры, упак. 100 шт.	100	1	100
Итого			1683
Итого (с учетом ТЗР)			2019,60

6.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья включает в себя заработную плату инженера и научного руководителя. Для расчета заработной платы инженера примем величину месячного оклада равную окладу инженера кафедры $MO_1 = 7864,12p$; для

расчета заработной платы руководителя примем величину месячного оклада равную окладу доцента, к.н. $МО_2 = 23264,86 \text{ р.}$

Для дальнейшего расчета зарплаты необходимо вычислить среднедневную ставку с учетом среднего количества рабочих дней в месяце. Известно, что в 2016 году 300 рабочих дней, следовательно, среднее количество рабочих дней в месяце равно 25. Таким образом, среднедневная тарифная заработная плата $ЗП_{\text{дн-т}}$ рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25}.$$

Зная среднедневную заработную плату, на основании данных таблицы 6.2 можем вычислить основную заработную плату за период выполнения работ. Затем, учитывая премии, дополнительную заработную плату и районный коэффициент, можем рассчитать полную заработную плату $ЗП_{\text{полн}}$ по формуле:

$$ЗП_{\text{полн}} = ЗП_{\text{дн-т}} \cdot T_{\text{рд}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{дон}} \cdot K_{\text{р}},$$

где $T_{\text{рд}}$ – трудоемкость проекта для сотрудника в рабочих днях; $K_{\text{пр}} = 1,1$ – коэффициент премирования; $K_{\text{дон}} = 1,13$ – коэффициент дополнительной заработной платы для пятидневной рабочей недели; $K_{\text{р}} = 1,3$ – районный коэффициент. Выполним расчеты по приведенным формулам, результаты сведем в таблицу 6.6.

Таблица 6.6 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23264,86	930,59	17	1,62	15820,03
И	7864,12	314,57	92		28940,44
Итого					44760,47

6.2.3 Расчет затрат на взносы во внебюджетные фонды

Взносы во внебюджетные фонды включают в себя сборы в пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования, фонд социального страхования. Затраты на эти взносы рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{вн.взн}} = k_{\text{взн}} \cdot Z,$$

где $k_{\text{взн}} = 0,3$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды; Z – расходы на заработную плату.

В нашем случае, размер взносов во внебюджетные фонды составляет:

$$Z_{\text{вн.взн}} = 0,3 \cdot 44760,47 = 13428,14 \text{ р.}$$

6.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

В данной статье расходов учитываются затраты на электроэнергию, потребленную всем использованным в течение проекта оборудованием. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

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

где $P_{\text{об}}$ – мощность оборудования; $t_{\text{об}}$ – время работы оборудования; $C_{\text{э}} = 5,257 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$ – цена 1кВт·ч электроэнергии. Время работы оборудования определяется по формуле:

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t,$$

где $T_{\text{рд}}$ – трудоемкость проекта в часах (рабочий день – 8 часов); K_t – коэффициент загрузки оборудования (равен доле рабочего времени, в течении которой использовалось оборудование; определяется исполнителем).

Для выполнения работ инженер использовал персональный компьютер и лазерный принтер. Определим затраты на потребленную оборудованием электроэнергию, результаты расчетов сведем в таблицу 6.7.

Таблица 6.7 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	K_t	Время работы оборудования, ч	Затраты на электроэнергию, руб.
Компьютер персональный	0,350	0,80	588,800	1083,36
Принтер лазерный	3	0,002	1,472	23,22
Итого				1106,58

6.2.5 Расчет амортизационных расходов

Амортизационные расходы рассчитываются по формуле:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot C_{OB} \cdot t_{PФ} \cdot n}{F_D},$$

где H_A – годовая норма амортизации оборудования; C_{OB} – стоимость единицы оборудования; $t_{PФ}$ – фактическое время работы единицы оборудования в ходе выполнения проекта; n – количество однотипных единиц оборудования; F_D – действительный годовой фонд времени работы оборудования.

При выполнении проекта использовались по одной единице двух видов оборудования: персональный компьютер и лазерный принтер. Оба типа оборудования входят в одну группу – вычислительная техника, следовательно, оба типа оборудования имеют одинаковый срок полезного использования – 2...3 года. Выберем срок полезного использования 2,5 года; тогда норма амортизации составит 0,4. Цены компьютера и принтера равны 26000 рублей и 3500 рублей соответственно. Данные о времени использования возьмем из таблицы 6.7. Годовой фонд времени работы составляет 2400 часов. Воспользуемся приведенной формулой для расчета амортизационных расходов; результаты расчетов сведем в таблицу 6.8.

Таблица 6.8 – Расчет амортизационных расходов

Наименование оборудования	$H_A, \text{г}^{-1}$	$C_{OB}, \text{руб}$	$t_{PФ}, \text{ч}$	n	$F_D, \text{ч}$	$C_{AM}, \text{руб}$
Компьютер персональный	0,4	26000	588,8	1	2400	2551,47
Принтер лазерный	0,4	3500	1,472	1	2400	0,86
Итого						2552,33

6.2.6 Расчет прочих расходов

В данной статье учитываются непредвиденные расходы, не учтенные при расчете других статей расходов. Обычно такие расходы принимают равными 10% от суммы всех расходов.

В данном случае, прочие расходы составляют:

$$\begin{aligned}
C_{\text{проч}} &= (C_{\text{мат}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{вн.взн}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1 = \\
&= (2019,60 + 44760,47 + 13428,14 + 1106,58 + 2552,33) \cdot 0,1 = \\
&= 63867,12 \cdot 0,1 = 6386,71.
\end{aligned}$$

6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Вычислив сумму всех расходов на выполнение запланированных работ, рассчитаем общую себестоимость проекта. Результаты расчетов сведем в таблицу 6.9.

Таблица 6.9 – Расчет общей себестоимости проекта

Статья затрат	Обозначение	Сумма, руб
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	2019,60
Заработная плата	$C_{\text{зн}}$	44760,47
Отчисления во внебюджетные фонды	$C_{\text{вн.взн}}$	13428,14
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.об.}}$	1106,58
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	2552,33
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{пр}}$	0
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	6386,71
Итого		70253,83

6.2.8 Расчет прибыли, НДС и цены разработки НИР

Ввиду отсутствия информации для применения сложных методов расчета прибыли заложим в проект прибыль в размере 10% от себестоимости:

$$P = 0,1 \cdot C_{\text{полн}} = 7025,38 \text{ р.}$$

Рассчитаем НДС как 18% от суммы затрат на разработку и заложенной прибыли:

$$\text{НДС} = (P + C_{\text{полн}}) \cdot 0,18 = 13910,26 \text{ р.}$$

Цена разработки НИР складывается из полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = 70253,80 + 7025,38 + 13910,26 = 91189,47 \text{ р.}$$

6.3 Оценка экономической эффективности проекта

Результатом проведенной НИР является методика построения математических моделей контуров системы управления движением НПА, а также набор методик синтеза робастных регуляторов для них. Единственный положительный эффект, который может быть достигнут применением разработанных методик, это улучшение качества автоматического управления движением НПА.

Внедрение результатов НИР в организациях, использующих в своей деятельности НПА, позволит сократить количество операторов НПА или использовать труд менее квалифицированных специалистов за счет повышения степени автоматизации процесса работы оператора НПА. Также повышение степени автоматизации повысит качество работ, выполняемых самим НПА. Так, например, за счет более точной стабилизации положения НПА повышается качество фотосъемки и точность манипулирования объектами под водой.

Разработанные методики позволяют синтезировать робастные системы управления. При автоматизации процесса движения НПА робастность системы дает возможность полноценного функционирования НПА в нестабильных, изменчивых условиях, например, при сильных подводных течениях.

Таким образом, применение разработанных методик в процессе проектирования НПА позволит предприятиям, проектирующим или использующим в своей деятельности НПА, сократить расходы на заработную плату и повышение квалификации сотрудников, а также сократить длину производственного цикла. Косвенный социальный положительный эффект, возникающий при использовании НПА, спроектированных с применением разработанных методик, заключается в повышении безопасности подводных работ.

6.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Оценим научно-технический уровень разработки с помощью вычисления интегрального индекса научно-технического уровня (НТУ) $I_{НТУ}$.

Данный индекс вычисляется как взвешенная сумма количественных оценок НИР по трем признакам: уровню новизны, теоретическому уровню, возможности реализации.

Критерии оценки уровня новизны приведены в таблице 6.10; критерии оценки теоретического уровня – в таблице 6.11; критерии оценки возможности реализации – в таблице 6.12.

Таблица 6.10 – Критерии оценки уровня новизны НИР

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

Таблица 6.11 – Критерии оценки теоретического уровня НИР

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

Таблица 6.12 – Критерии оценки возможности реализации НИР

Время реализации НИР	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Разработанные в ходе выполнения НИР методики синтеза систем управления движением НПА, а также подход к декомпозиции многомерной математической модели процесса движения НПА являются по своей сути новыми способами решения известных задач, в некоторых аспектах превосходящими существующие аналоги. Исходя из этого, можно оценить

уровень новизны НИР на 7 баллов. Теоретический уровень разработки новых способов и алгоритмов оценивается на 6 баллов. Возможность реализации НИР можно оценить на 10 баллов, так как работа выполнялась для нужд одной из лабораторий ТПУ.

Таким образом, зная значения весовых коэффициентов признаков рассчитаем интегральный индекс НТУ НИР:

$$I_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 k_i \cdot n_i = 0,4 \cdot 7 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 8,4.$$

Таким образом, индекс НТУ равен 8,4 балла, что соответствует высокому НТУ проведенной НИР.

7 Социальная ответственность

Объектом исследования является технология проектирования систем управления движением необитаемых подводных аппаратов (НПА), способных функционировать в условиях неопределенных параметров самого аппарата и окружающей среды.

Сущность работы состоит в математическом и имитационном моделировании процесса движения, оценке интервалов изменения гидродинамических характеристик аппарата, разработке методик синтеза различных типов регуляторов для робастных и адаптивных систем управления движением.

Результат выполнения работы представляет собой набор математических методов, алгоритмов и программного обеспечения, применяемых инженерами-проектировщиками при разработке НПА любых классов.

Следует отметить, что процесс работы с объектом исследований, то есть проектирование НПА с использованием разработанных методик и алгоритмов, осуществляется в тех же условия, что и выполнение самих исследований. В частности, работы осуществляются с применением персональных компьютеров (ПК) в соответствующих помещениях.

Таким образом, в данном разделе дальнейшему рассмотрению с точки зрения профессиональной и экологической безопасности, безопасности в чрезвычайных ситуациях подлежит процесс работы с ПК.

7.1 Производственная безопасность

Согласно ГОСТ 12.0.003-74 опасные и вредные производственные факторы делятся на следующие группы:

- физические;
- химические;
- биологические;
- психофизические.

Работа проектировщика систем автоматического управления не связана с взаимодействием с токсичными веществами или патогенными микроорганизмами, следовательно, нет необходимости исследовать химические и биологические факторы. Среди физических факторов выделим воздействующие на человека, решающего инженерные задачи с использованием ПК, и исследуем каждый из них подробнее: определим источник факторов, объясним его физико-химическую природу; приведем допустимые нормы и предложим индивидуальные и коллективные средства защиты для минимизации влияния каждого фактора.

На своем рабочем месте проектировщик САУ может подвергнуться влиянию следующих физических факторов:

- повышенный уровень шума на рабочем месте;
- повышенная или пониженная влажность воздуха;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;
- повышенный уровень электромагнитных излучений;
- недостаточная освещенность рабочей зоны.

Очевидно, что в приведенном списке присутствуют только вредные факторы, и отсутствуют опасные. Для каждого из выделенных факторов определим источник и нормативные документы, собранную информацию сведем в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Вредные и опасные факторы при проектировании САУ подводных аппаратов

Источник фактора, наименования видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)	Нормативные документы
1. Моделирование объекта управления. 2. Разработка методик параметрического синтеза регуляторов. 3. Расчет параметров регуляторов САУ. 4. Оценка качества работы спроектированной системы.	1. Отклонение параметров микроклимата внутри рабочего помещения от нормы. 2. Повышенный уровень шума. 3. Электромагнитное излучение. 4. Недостаточная освещенность рабочего места. 5. Поражение электрическим током.	Микроклимат на рабочем месте регламентируется СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». Шум на рабочем месте регламентируется СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки». Освещение рабочего места регламентируется СП 52.13330.2011 «Естественное и

		искусственное освещение» и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий». Электромагнитное излучение на рабочем месте регламентируется СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях». Нормы токов и напряжений, а также меры электробезопасности регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов», ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура средств защиты.»
--	--	---

Кроме перечисленных в таблице документов, регламентирующих нормы факторов, будем также использовать санитарные правила, определяющие способы защиты от действия соответствующих факторов, например: СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», СП 51.13330.2011 «Защита от шума».

Ввиду того, что ПК является электрической установкой, рассмотрим также мероприятия по электробезопасности.

7.1.1 Микроклимат

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96, микроклимат характеризуется следующими показателями:

- температура воздуха;
- температура поверхностей (ограждающих поверхностей, поверхностей устройств и технологического оборудования);
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

При выполнении ВКР и при использовании ее результатов не применяется оборудование, создающее мощное тепловое излучение, следовательно, нет необходимости применять специальные нормы интенсивности теплового облучения от производственных источников. Нормирование остальных параметров микроклимата рассмотрим далее.

Оптимальные значения температуры воздуха, поверхностей и скорости движения воздуха приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	21 - 23	20 - 24	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	17 - 19	16 - 20	60 - 40	0,2
	III (более 290)	16 - 18	15 - 19	60 - 40	0,3
Теплый	Ia (до 139)	23 - 25	22 - 26	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	20 - 22	19 - 23	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	III (более 290)	18 - 20	17 - 21	60 - 40	0,3

Работа проектировщика САУ является малоподвижной с соответствует категории Ia. Следовательно, в холодный период года температура воздуха на рабочем месте должна быть приблизительно равна 22–24°С; температура поверхностей – 21–25°С; относительная влажность воздуха – 60–40%; скорость движения воздуха – 0,1 м/с.

Оптимальная температура воздуха и поверхностей может быть обеспечена за счет централизованной системы отопления или индивидуальных теплогенераторов; качество воздуха – за счет естественной вентиляции или применения механических вентиляционных систем.

7.1.2 Шум

Вредность шума оценивается по уровню звука L , рассчитываемому по формуле

$$L = 20 \cdot \lg \left(\frac{P_A}{P_0} \right),$$

где P_A – среднеквадратичная величина звукового давления с учетом коррекции шумомера; $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – исходное звуковое давление в помещении.

Деятельность проектировщика САУ можно квалифицировать как научную деятельность, что заставляет предъявлять повышенные требования к уровню шума на рабочем месте. Допустимые для научной деятельности значения уровня шума в различных октавных полосах представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Допустимые для научной деятельности значения уровня шума в различных октавных полосах

Вид деятельности	Допустимые значения уровня шума по среднегеометрическим частотам октавных полос, дБА								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность	86	71	61	54	49	45	42	40	38

Большую часть шума на рабочем месте проектировщика САУ создает ПК. Известны уровни шума, создаваемого современной системой охлаждения ПК, во всех октавных полосах. Схема эксперимента приведена на рисунке 7.1; гистограмма уровней шума в различных октавных полосах – на рисунке 7.2.



Рисунок 7.1 – Схема эксперимента по измерению уровней шума системы охлаждения ПК

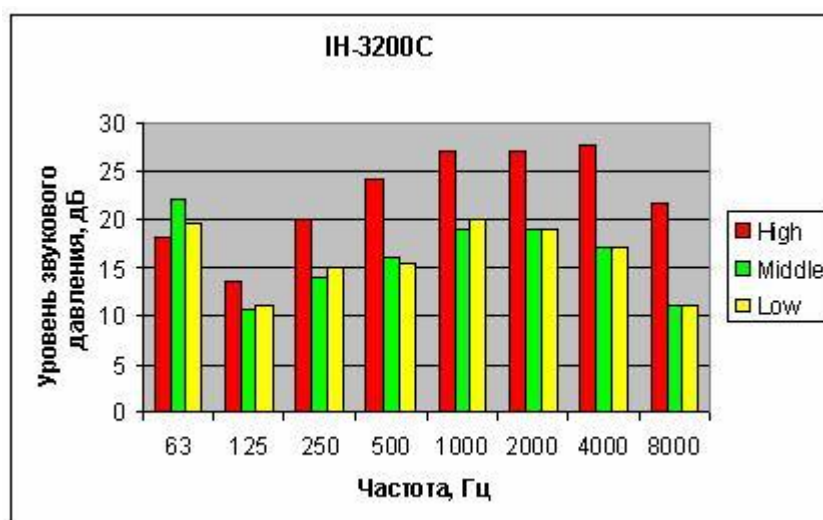


Рисунок 7.2 – Гистограмма уровней шума системы охлаждения ПК в различных октавных полосах на трех скоростях работы вентилятора

Из рисунка 7.2 можно видеть, что в максимальный уровень шума в 27,5 дБА приходится на октавную полосу со среднегеометрической частотой 4000 Гц и достигается на наибольшей скорости вращения вентилятора. Согласно результатам эксперимента, компьютер с исправной системой охлаждения не способен создать шум, мешающий научной деятельности.

В том случае, если уровень шума все же мешает работе, для защиты от шума можно применить звукоизолирующие материалы для изоляции как самого корпуса ПК, так и области, где он расположен.

7.1.3 Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучения – возмущение электромагнитного поля, создающееся любой техникой, подключенной к сети питания с переменным напряжением, например, к бытовой электрической сети ~220 В, 50 Гц. Известно, что длительное нахождение рядом с источником электромагнитного поля повышает риск возникновения заболеваний сердечнососудистой и центральной нервной систем человека.

Основные возможные источники питания при работе с ПК – монитор и бесперебойный источник питания. При выполнении работы применялся компьютер, не оборудованный бесперебойным источником питания; нормирование электромагнитного излучения монитора ПК рассмотрим подробнее.

При выполнении работы использовался ПК, оснащенный жидкокристаллическим монитором. Временные допустимые уровни электромагнитного поля приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Временно допустимые уровни электромагнитного поля, возникающие при работе с ПК

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Используемый монитор соответствует стандарту ТСО'99 и, следовательно, значения характеристик создаваемого им электромагнитного поля не превышают допустимых значений.

Для защиты от электромагнитного излучения монитора рекомендуется использовать защитные экраны; обеспечить заземление массивных металлических частей компьютера и монитора; делать перерывы во время работы за компьютером.

7.1.4 Освещенность

Работа проектировщика САУ, как и любая другая работа с применением ПК, связана с потреблением большого количества зрительной информации. Следовательно, достаточная освещенность рабочего места – один из основных факторов, определяющих качество результатов и безопасность процесса работы специалиста.

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий» освещенность в помещениях для работы с ПК, дисплеями и видеотерминалами должна составлять не менее 400 лк. Санитарные правила СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» устанавливают для работ высокой точности (размер различаемого объекта от 0,30 до 0,50 мм) допустимые значения освещенности, приведенные в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Показатели освещенности для работ III класса

Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
			Освещенность, лк		
			при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения
			всего	в том числе от общего	
а	Малый	Темный	2000	200	500
			1500	200	400
б	Малый	Средний	1000	200	300
	Средний	Темный	750	200	200
в	Малый	Светлый Средний-Темный	750	200	300
	Средний Большой		600	200	200
г	Средний Большой	Светлый-Средний	400	200	200

Таким образом, примем минимально допустимую достаточную для работы с ПК освещенность равной 200 лк.

7.1.5 Электрический ток

Работа проектировщика САУ предполагает использование ПК, который является электрической установкой. Следовательно, основным опасным фактором для проектировщика САУ является электрический ток. Поражение электрическим током может спровоцировать электролитическое разложение физиологических жидкостей (крови), непроизвольное сокращение мышц, разрывы и обугливание тканей, поражение глаз.

Степень опасности влияния электрического тока зависит от его рода и величины, частоты переменного тока, пути тока через тело человека, продолжительности воздействия тока на тело человека и дополнительных условий внешней среды.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 значения токов и напряжений, протекающих через тело человека при нормальном режиме работы электроустановки не должны превышать значений, указанных в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Максимально допустимые значения токов и напряжений, протекающих через тело человека в нормальном режиме работы электроустановок

Род тока	Напряжение, В	Ток, мА
	(не более)	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Отдельно регламентируются предельно допустимые токи и напряжения в аварийных режимах для производственных и бытовых электроустановок. Персональный компьютер можно отнести к бытовым электроустановкам до 1000 В, питаемых током 50 Гц. Предельно допустимые значения токов и напряжений, проходящих через тело человека в аварийном режиме работы таких электроустановок приведены в таблице 7.7.

Таблица 7.7 – Предельно допустимые значения токов и напряжений, протекающих через тело человека в аварийных режимах работы бытовых электроустановок, питаемых переменным током 50 Гц

Нормируемая величина	Предельно допустимые значения при разных продолжительностях воздействия t , с											
	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Напряжение, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
Ток, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6

Защита от воздействия электрического тока осуществляется за счет следующих способов и средств:

- защитные оболочки;
- защитные ограждения;
- защитные барьеры;
- безопасное расположение токоведущих частей;
- изоляция токоведущих частей;
- изоляция рабочего места;
- малое напряжение;
- защитное отключение;
- предупредительная сигнализация, блокировки, знаки.

Помещение, в котором выполнялась работа, относится к помещениям без повышенной опасности, так как является сухим (влажность менее 60%), беспыльным, имеет непроводящие полы; также в помещении поддерживается температура +22–24 °С. Таким образом, получить электротравму в описанном помещении можно только при работе с ПК.

Для защиты пользователя ПК от электрического тока применено несколько из перечисленных ранее методов. Так, например, все части компьютера, находящиеся под высоким напряжением находятся в недоступных для пользователя защитных корпусах и снабжены предупреждающими знаками; пользователь физически взаимодействует только с устройствами ввода информации, находящимися под малыми напряжениями (5 В). Для дополнительной защиты от поражения электрическим током предлагается проводить регуляторные инструктажи по технике безопасности.

7.2 Экологическая безопасность

Обеспечение экологической безопасности технологического процесса состоит в охране атмосферы, гидросферы и литосферы от вредных выбросов, образующихся в течение технологического процесса.

Сам процесс проектирования САУ не образует никаких видов отходов, не оказывая негативного влияния на состояние окружающей среды. Однако, при выполнении данного вида работ предполагается использование ПК. Рассмотрим негативное влияние факторов, сопутствующих эксплуатации ПК, на окружающую среду.

Ранее упоминалось, что ПК являются источниками электромагнитного излучения, следовательно, могут оказывать негативное воздействие на атмосферу. Негативно повлиять на литосферу или гидросферу ПК, как и любая другая вычислительная техника, могут только при неправильной их утилизации.

Известно, что создаваемое современными ПК электромагнитное поле вносит пренебрежимо малый вклад в загрязнение атмосферы. В свою очередь, неправильная утилизация вычислительной техники может привести к заражению почвы тяжелыми металлами: ртутью, кадмием, мышьяком, свинцом, цинком, никелем и прочими. После попадания на почву, соединения тяжелых металлов также могут просочиться в грунтовые воды.

Таким образом, для полноценной защиты окружающей среды от негативных факторов, возникающих при проектировании САУ, необходимо организовать грамотную утилизацию ПК и оргтехники, используемых в работе. Ввиду того, что утилизация электроники – сложный процесс, требующий специальной лицензии, логично будет воспользоваться услугами сторонней компании. Так, например, по ценам ООО «Апгрейд-сервис», работающего в Томске и Северске, утилизация одного компьютера обойдется в 1000 рублей.

7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация на проектируемом рабочем месте – пожар (взрыв). Рассмотрим подробнее меры противопожарной защиты.

Системы пожарной безопасности представляют собой совокупность технических средств и организационных мероприятий, направленных на решение следующих задач:

- исключение возникновения пожара;
- обеспечение пожарной безопасности людей;
- обеспечение пожарной безопасности материальных ценностей.

Технические средства можно разделить на две группы: средства сигнализации о пожаре, средства пожаротушения. Для сигнализации о пожаре обычно применяют автоматические системы оповещения. В качестве средств пожаротушения применяются устанавливаемые в коридорах и на лестничных площадках пожарные краны. В качестве средства первичного средства пожаротушения следует использовать огнетушители, подходящие для тушения электроустановок, в частности, порошковые огнетушители. Углекислотные огнетушители также подходят для тушения электроустановок, однако, из-за опасности испарений огнетушащего вещества не подходят для использования в замкнутом помещении.

7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

7.4.1 Правовые вопросы охраны труда

Порядок взаимоотношений работника и работодателя, в том числе и вопросах охраны труда, регулируется Трудовым кодексом РФ.

Максимальная продолжительность трудовой недели составляет 40 часов. Для работников, условия труда которых соответствуют 3 или 4 степени, установлена максимальная продолжительность рабочей недели в 36 часов. Для работников в возрасте до 16 лет максимальная продолжительность рабочей

недели составляет 24 часа, для работников в возрасте от 16 до 18 лет – 35 часов, как и для инвалидов I и II групп.

Существуют также ограничения на работы в ночное время. Продолжительность ночных смен меньше продолжительности дневной рабочей смены на один час, за исключением тех случаев, когда работник нанят специально для работы в ночное время. К работе в ночное время не допускаются беременные женщины, несовершеннолетние работники.

Работодатель обязан предоставить ежегодный отпуск длительностью в 28 календарных дней. Работникам, занятым на местах с вредными или опасными условиями труда, ежегодно предоставляются дополнительные отпуска длительностью не меньше 7 календарных дней. Кроме отпусков, все работникам предоставляются выходные дни, причем работа в выходные дни осуществляется только с письменного согласия работника.

Для отдыха и питания работодатель предоставляет ежедневно перерыв длительностью от половины до двух часов, которые не входят в рабочее время.

Работники, занятые на работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, связанных с движением транспорта, обязаны проходить предварительные и периодические медицинские осмотры для оценки пригодности работника к выполнению служебных обязанностей. Все медицинские осмотры и психиатрические освидетельствования должны выполняться за счет работодателя.

7.4.2 Организационные вопросы обеспечения безопасности

Рассмотрим основные требования по эргономике рабочего места при выполнении работ сидя.

ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» регламентирует высоту сидения, ширину пространства для ног, а также высоту рабочей поверхности для человека, выполняющего работы сидя. Все перечисленные параметры выбираются в зависимости от роста работник по номограмме, представленной на рисунке 7.3.

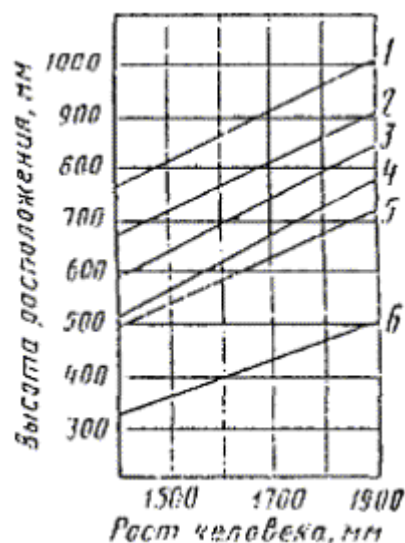


Рисунок 7.3 – Номограмма зависимости высоты рабочей поверхности (1-4), пространства для ног (5), высоты рабочего сиденья (6) от роста человека

Номограммы 1-4 на рисунке 7.3 используются для определения высоты рабочей поверхности в зависимости от вида выполняемых работ. При этом, чем меньше объекты, с которыми приходится взаимодействовать при выполнении работ, тем выше располагается рабочая поверхность. Выполняемая работа классифицируется по таблице 7.8

Таблица 7.8 – Соответствие точности работ и высоты рабочей поверхности

Наименование работ	Высота рабочей поверхности, мм			Номер номограммы
	для женщин	для мужчин	для женщин и мужчин	
Очень тонкие зрительные работы (сборка часов, гравировка, картография, сборка очень мелких деталей и др.)	930	1020	975	1
Тонкие работы (монтаж мелких деталей, станочные работы, требующие высокой точности, и др.)	835	905	870	2
Легкие работы (монтаж более крупных деталей, конторская работа, станочные работы, не требующие высокой точности, и др.)	700	750	725	3
Печатание на машинке, типографских станках, перфораторах, легкая сборочная работа более крупных деталей и др.	630	680	655	4

Исходя из рисунка 7.3 и таблицы 7.8, можно сделать вывод, что для инженера, выполняющего данную ВКР, параметры рабочего места должны

иметь следующие значения: высота рабочей поверхности – 730 мм, высота пространства для ног – 690 мм, высота рабочего сиденья – 480 мм. Ширина пространства для ног должна составлять не менее 500 мм.

Определившись с габаритами рабочего места, рассмотрим его компоновку. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» устанавливает требования к помещениям для работы с ПК, к микроклимату, уровню шума, освещению и прочим параметрам помещений для работы с ПК, а также к самим ПК.

Требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 в части высоты рабочей поверхности, ширины и высоты пространства для ног, а также высоты сидения полностью согласуются с описанными ранее требованиями к эргономике рабочего места. Также регламентируется минимальное расстояние от глаз человека до монитора ПК – 500 мм. При этом расстояние между двумя мониторами соседних рабочих мест с ПК не должно быть меньше 1,2 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы был освоен процесс проектирования систем автоматического управления движением НПА. Поставленная цель, а именно – выполнить параметрический синтез регуляторов СУ движением ТНПА, достигнута. Для достижения цели был решен ряд задач: разработана структура математической модели процесса движения НПА; на основании имитационного моделирования обтекания корпуса НПА рассчитаны значения гидродинамических параметров; разработаны методики синтеза регуляторов для систем с интервальными параметрами; в качестве примера применения разработанных математической модели и методик была решена задача параметрического синтеза регуляторов СУ движением ТНПА.

Синтезированная система обладает хорошим качеством регулирования: переходные процессы – апериодические, перерегулирование не превышает 5%, время регулирования не превышает 5 с.

В процессе решения задачи параметрического синтеза было выяснено, что обеспечение желаемого качества регулирования параметров движения НПА не всегда может быть выполнено с помощью робастных регуляторов. Планируется улучшить качество работы системы, применив разработанную методику синтеза адаптивно-робастных регуляторов.

В дальнейшем также требуется исследовать взаимовлияние каналов регулирования системы и учесть его в математической модели процесса движения НПА.

CONCLUSION

During implementation of considered paper, a process of a UUV motion control system development was examined. The main aim of the research was reached: a motion control system of ROV was synthesized. To do that, several problems were solved: a mathematical model structure was developed; after that, with the help of imitational modeling hydrodynamic parameters of considered ROV were calculated; four methods of synthesizing a controller for control system with interval parameters were developed; as an example of developed mathematical model and synthesis methods a control system for considered ROV was synthesized.

Considered motion control system has high control quality: all transient processes are aperiodic; overshoot is less than 5%; setting time is less than 5 seconds.

While performing a parametric synthesis, it was discovered that it is not always possible to provide necessary control quality with the help of robust controllers only. Considering this, a methods of adaptively-robust controllers are supposed to be applied to synthesize a ROV motion control system in future.

In future a process of motion control system control loops interconnection must be examined examined and considered in mathematical model of UUV motion process.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Хожаев И.В., Гайворонский С.А. Размещение полюсов линейной стационарной САУ методом деления полиномов // «Интеллект и наука»: Труды XIII Международной молодежной научной конференции. – Железногорск, 2013. – с. 132-134.
2. Хожаев И.В., Гайворонский С.А. Размещение полюсов линейной стационарной САУ методом деления полиномов // Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2013». – Томск, 2013. – том 4, с. 80-83.
3. Khozhaev I.V., Gaivoronsky S.A. Linear time-invariant system pole placing by polynomial division method // XX International Conference for Students and Young Scientists "Modern Technique and Technologies MTT'2014". – Tomsk, 2014. – vol. 2, p. 313-314.
4. Gayvoronskiy S. A. , Ezangina T. A. , Khozhaev I. V. The interval-parametric synthesis of a linear controller of speed control system of a descent submersible vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015 – Vol. 93, Article number 012055. – p. 1-6.
5. И.В. Хожаев, С.А. Гайворонский Синтез регулятора системы управления дифферентом автономного необитаемого подводного аппарата в условиях интервальной неопределенности параметров // Шестая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6). Материалы конференции. 2015. – с. 470-474.
6. Gayvoronskiy S. A., Ezangina T. A. , Khozhaev I. V. The interval-parametric synthesis of a linear controller of control system with ensured robust degree of stability// Conference Digest, Taiwan , November 18-20, 2015. - New York: IEEE, 2015 - p. 290-294.
7. Gayvoronskiy S. A. , Ezangina T. A. , Khozhaev I. V., Efimov S.V. The stabilization interval system of a tethered descent underwater vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016 – Vol. 124, Article number 012008. – p. 1-5

7. I.V. Khozhaev and S.A. Gayvoronsky Synthesis of a PID-controller of a trim robust control system of an autonomous underwater vehicle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016 – Vol. 124, Article number 012019. – p. 1-7.

8. Gayvoronskiy S. A. , Ezangina T. A. , Khozhaev I. V. Analysis and synthesis of dual mode control systems of a tethered descent undersea vehicle // Conference OCEANS' 16, Shanghai, April 10-16 2016 - New York: IEEE, 2016 - p. 110-115.

9. Gayvoronskiy S. A. , Ezangina T. A. , Khozhaev I. V. Mathematical model of the control system of a tethered descent underwater vehicle // The 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2016) ,Guilin, China, June 12-15, 2016.

10. Хожаев И.В. Размещение вещественного интервального доминирующего полюса САУ с интервальными параметрами методом деления полиномов // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под редакцией Т.Е. Мамоновой. 2016. – с. 229-230.

11. Хожаев И.В. Синтез регулятора системы приведения дифферента необитаемого подводного аппарата к нулю в режиме зависания в условиях интервальной неопределенности параметров // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под редакцией Т.Е. Мамоновой. 2016. – с. 282-283.

12. И.В. Хожаев, С.А. Гайворонский, Т.А. Езангина Стабилизация колебательного переходного процесса интервальной системы на основе адаптивно-робастного размещения полюсов // III Международная научная конференция «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине». 2016. – с 1-2.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. – Л.: Судостроение, 1973. – 216 с.
2. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов / Л. Грейнер. – Л.: Судостроение, 1978. – 383 с.
3. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2006. – 736 с.
4. Устройства и системы управления подводных роботов / В.Ф. Филаретов, А.В. Лебедев, Д.А.Юхимец; [отв. ред. Ю.Н. Кульчин]; Ин-т автоматизации и процессов управления ДВО РАН. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
5. Водолазное снаряжение и оборудование. Средства подводного наблюдения, поиска и обследования. Транспортировщики водолазов // МЧС РФ, Владивосток, – 2005. – 76 с.
6. Подводные инженерные исследования / П. Милн. – Л.: Судостроение, 1984. – 337 с.
7. Применение подводного робота для обследования ГТС / В. Ю. Микерчук, Д. П. Фролов // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края [Электронный ресурс]. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014. — Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html>, свободный.
8. Пути совершенствования океанографических необитаемых подводных аппаратов / Лазарев Евгений Сергеевич // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/puti-sovershenstvovaniya-okeanograficheskikh-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov> (дата обращения: 02.06.2016).
9. Современные задачи подводной робототехники / Ляхов Д.Г. // Подводные исследования и робототехника. – 2012. - № 1(13). - 15-23 с.

10. Современные способы обследования морского дна для обнаружения и устранения взрывоопасных объектов до строительства трубопровода / Барашок П.И., Фирсов Ю.Г. // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. №1 (35). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-sposoby-obsledovaniya-morskogo-dna-dlya-obnaruzheniya-i-ustraneniya-vzryvoopasnyh-obektov-do-stroitelstva-truboprovoda> (дата обращения: 02.06.2016).

11. Гидродинамический расчет самоходных подводных аппаратов / Слижевский Н.Б., Король Ю.М., Соколик М.Г. // Учебное пособие: - Николаев, УГМТУ, 2000. - 93 с.

12. Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата / Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Павин А.М. // Подводные исследования и робототехника. – 2013. - № 2(16). - 4-16 с.

13. Разработка телеуправляемого подводного аппарата «МАКС-300» / Костенко В.В., Михайлов Д.Н. // Подводные исследования и робототехника. – 2012. - № 1(13). - 36-46 с.

14. О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота / Киселев Л.В., Медведев А.В. // Подводные исследования и робототехника. – 2013. - № 1(15). - 17-22 с.

15. Модели динамики и адаптивного управления движением АНПА различных проектов и конфигураций / Киселев Л.В., Медведев А.В. // Перспективные системы и задачи управления. Материалы конференции. – 2012. – 56-62 с.

16. Автономный подводный аппарат «Скат» для решения задач поиска и обнаружения затонувших объектов / Пшихопов Вячеслав Хасанович, Суконкин Сергей Яковлевич, Нагучев Даулет Шабанович, Стракович Владимир Васильевич, Медведев Михаил Юрьевич, Гуренко Борис Викторович, Костюков Владимир Александрович, Волощенко Юрий Петрович // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. №3. URL:

<http://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnyy-podvodnyy-apparat-skat-dlya-resheniya-zadach-poiska-i-obnaruzheniya-zailennyh-obektov> (дата обращения: 02.06.2016).

17. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата / Пшихопов Вячеслав Хасанович, Чернухин Юрий Викторович, Федотов Александр Алексеевич, Гузик Вячеслав Филлипович, Медведев Михаил Юрьевич, Гуренко Борис Викторович, Пьявченко Алексей Олегович, Сапрыкин Роман Владимирович, Переверзев Владимир Андреевич, Приемко Андрей Анатольевич // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №3 (152). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-intellektualnoy-sistemy-upravleniya-avtonomnogo-podvodnogo-apparata> (дата обращения: 02.06.2016).

18. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований / Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. // Фундаментальные проблемы подводной робототехники. – 2006. – № 1. - 6-17 с.

19. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации / Бардачевский Николай Николаевич, Безсуднов Евгений Юрьевич // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. №2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-primeneniya-neobitaemyh-podvodnyh-apparatov-v-oblasti-gidrograficheskikh-issledovaniy-i-podvodnoy-navigatsii> (дата обращения: 02.06.2016).

20. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата / Ивель В. П., Герасимова Ю. В. // Международный научный журнал «Наука и мир» ISSN 2308-4804. Волгоград, 2014. – №2(6), Том 1 – с. 161 – 164.

21. Совершенствование систем управления морскими подвижными объектами на основе идентификации и адаптации: автореферат дисс. канд. техн. наук.: 05.22.19 / Шейхот Андрей Константинович; ФГОУ ВО «Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского». – Владивосток, 2008. – 24 с.

22. Разработка и исследование методов синтеза высокоточных систем управления сложными динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности / В. Ф. Филаретов // *Пробл. управл.*, 2006, № 4, 9–19.

23. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами / Пшихопов Вячеслав Хасанович, Федотов Александр Алексеевич, Медведев Михаил Юрьевич, Медведева Татьяна Николаевна, Гуренко Борис Викторович // ИВД. 2014. №2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/pozitsionno-traektornaya-sistema-pryamogo-adaptivnogo-upravleniya-morskimi-podvizhnymi-obektami> (дата обращения: 02.06.2016).

24. Робастный подход к синтезу нечетких законов управления движением подводного робота / Сиек Ю.Л. // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, 2014.

25. Применение нейрофаззи сетей для управления движителями подводных аппаратов / Ф.Палис, В.Ф.Филаретов, Ю.А.Цепковский, Д.А.Юхимец // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2006. - № 3. - С. 25-33.

26. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

27. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».

28. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение»

29. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».

30. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях».

31. ГОСТ 12.1.038-82 «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».

32. ГОСТ Р 12.1.019-2009 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура средств защиты».

Приложение А

Раздел 1

Theoretical basis of unmanned underwater vehicles control

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Хожаев Иван Валерьевич		

Консультант – лингвист кафедры _____ АйКС _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент каф. АйКС	Ефремов А.А.	—		

Консультант кафедры _____ ИЯ ИК _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель каф. ИЯ ИК	Логинова А.В.	—		

1 Theoretical basis of unmanned underwater vehicles control

1.1 UUV concept

An unmanned underwater vehicle (UUV) is a sophisticated combination of special hardware and software, capable to move easily under the water surface and to solve different problems in extreme conditions.

Modern UUVs, equipped with an appropriate payload, can be used to perform scientific, industrial or rescue missions.

The most widely used variants of payload equipment will be considered hereafter.

1.1.1 Common UUV payload examples

Depending on type of UUV mission, different types of payload can be applied. In general, all payload equipment can be divided into two groups: the first group contains all hardware, which enables UUV to manipulate underwater objects; the second one contains all equipment, capable to get necessary information about underwater objects and water itself.

The first group of payload equipment includes several types of manipulators.



Fig. 1.1 – Remotely operated UUV “Marlin-350” equipped with a manipulator

Manipulator designs varies from simple grippers, driven by electric motors, to powerful multiaxial hydraulic manipulators, capable to transport objects that are heavier than 100 kg.

In order to perform different underwater activities, UUV can be equipped with a more specific type of instrument instead of a simple manipulator, for example: hydraulic shears, circular saws, metal brushes for coarse cleaning of metal surfaces or pumps for delicate cleaning of underwater objects covered in sludge.

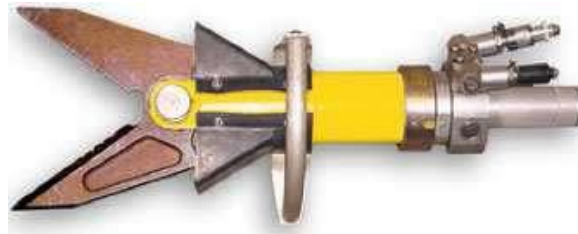


Fig. 1.2 – Hydraulic shears

The hardware, capable to collect information about underwater environment, is represented by different types of sensors, sonars, etc. For example, in order to find drowned metal objects UUV can be equipped with a magnetometer.

In order to perform a bottom mapping or a real-time monitoring, a multibeam echosounder can be used. Some models of multibeam echosounders can be used as side-scan sonars, which help avoid underwater obstacles.

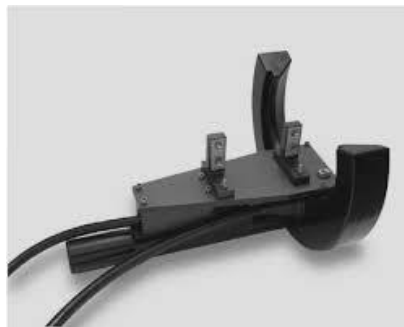


Fig. 1.3 – Compact multibeam echosounder, prepared for setting up on UUV

All previously considered devices are used to examine underwater objects. To examine the water itself, a vast variety of sensors was developed. For example, modern sensors are capable to measure the qualitative composition of water, its temperature, etc.

As a result of previous analysis of the most widely used variants of payload equipment it is obvious, that modern UUVs are capable to perform a great variety of underwater activities: searching for underwater objects, bottom mapping, manipulating underwater objects, examining an underwater environment.

After getting familiar with UUV payload, a structure of UUV should be considered.

1.1.2 UUV structure and classification

Every UUV includes several major units: rigid hull, on-board computer, propulsion and steering system (PSS). Besides these units listed above, UUV can also have some other units, depending on its mission and type. A set of features will be defined in order to classify UUVs; a structure of each type of UUVs will be described in general.

The first feature of UUV is its *autonomy*. In general, two types of UUV can be defined by autonomy feature: autonomous underwater vehicles (AUVs) and remotely-operated vehicles (ROVs). ROVs are connected with a carrier vessel by cable, through which it is controlled and supplied. AUVs are not connected with their carrier, supplied by built-in batteries and controlled by a mission program, developed in advance, which can be corrected through a hydroacoustic link, and do not transmit collected data to their operator in real-time mode.

Due to these features, there are some restraints of AUVs and ROVs. For example, AUV battery is not capable to supply powerful instruments, such as manipulators. However, AUV is capable to operate deeper than ROV and examine larger areas with a complex relief than ROV. In its turn, ROV is not capable to operate far from the carrier vessel, but is capable to transmit collected data in real-time mode. Consequently, AUVs and ROVs are usually used together: AUV is used to explore vast areas and to get large amounts of data (for example, searching a drowned vessel); ROV is used to solve local problems (such as repairing a vessel, previously found by AUV). Then, different unit structure of UUV will be described for AUVs and ROVs separately.

The second feature to classify is a *PSS structure*. PSS is responsible for UUV movement.

AUV PSS must have the minimum energy consumption in order to use AUV battery charge effectively. Also, AUVs usually perform missions, connected with floating by relatively smooth trajectories. These two features resulted into development of two major variants of AUV PSS structure.

In the first case, AUV PSS is equipped with one or several main thrusters and several pairs of control blades (figure 1.4).



Fig. 1.4 – AUV “LDUUV” of US Navy equipped with control blades

AUV shown in the figure 1.4 maneuvers with the help of control blades rotation and a main thruster rotation speed change. Due to this PSS structure and its effective energy consumption, this AUV is capable to operate autonomously during 30 days without recharging its batteries.

AUVs with the second variant of PSS structure are equipped with several main thrusters, several vertical steering thrusters and, if necessary, with several horizontal steering thrusters (figure 1.5).

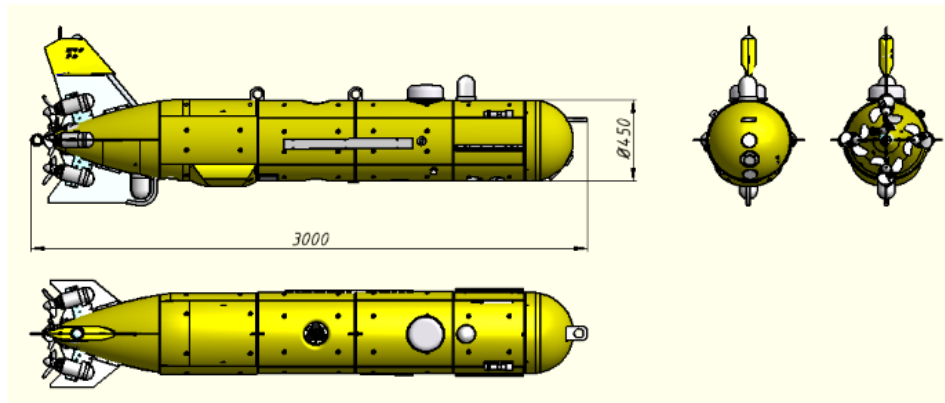


Fig. 1.5 – AUV “MT-2010” of IMPT FEB RAS equipped with steering thruster

AUV, shown in figure 1.5, maneuvers with the help of difference between rotation speed of main thrusters and submerges with the help of a vertical steering thruster. This AUV is capable to operate autonomously during 20 hrs without recharging its batteries. Cruising range is 100 km.

PSS of ROV is supplied through a cable, so its power consumption may not be as optimized as for AUV. This fact allows attaching one or two thrusters to ROV for every degree of freedom. So, with the help of 6-8 thrusters, a ROV can be enabled to move easily in all six degrees of freedom. This approach to ROV PSS structure became conventional (figure 1.6).



a



b



c

Figure 1.6 – ROVs with different variants of PSS construction: a) “Falcon”; b) I-90;
c) “MAKS-300”

Three variants of ROV PSS structure are shown in the figure 1.6. Thrusters, which provide movement in horizontal plane, are set in the same way in all three pictures. These variants of structure differ by the number and way of vertical thrusters placing. ROV in figure 1.6 a is not capable to stabilize the roll and the trim, because of having only one vertical thruster. ROV in figure 1.6 b is equipped with two vertical thrusters, which enable it to create a rotational moment around a longitudinal axis and to manipulate the roll. ROV in figure 1.6 c is equipped with four vertical thrusters, which enable it to rotate around both longitudinal and transversal axes and manipulate roll and trim.

The third feature to classify is a *hull structure*. AUV and ROV hull structures are different, because of their different purposes. Differences between AUV and ROV hulls can be found in figures 1.4, 1.5, 1.6.

Due to AUV PSS features, in order to provide AUV stability its hull must have proper hydrodynamic characteristics. AUV hull usually has a streamlined shape and, if necessary, is equipped with additional stabilizers. In addition, AUV hull is produced with a high pressure resistance.

In its turn, ROV hull is nothing but a simple rack, where ROV systems and the payload can be placed. It may not have a streamlined shape or any other good hydrodynamic characteristics, because ROV motion in every degree of freedom is provided by appropriate thrusters.

So, it is obvious that differences between hulls of AUV and ROV are explained by differences in their purpose: AUV hull participates in a process of a stable motion by its streamlined shape; ROV hull is a rack for placing all necessary hardware.

The forth feature to classify is a *number of hulls*. There is no point in considering AUVs and ROVs separately during exploring a number of hulls, because there are UUVs of both types equipped with several hulls.

Developing UUV with several hulls is, obviously, a more complex process, than developing an ordinary UUV. However, it is more stable and has a higher carrying capacity, than a common UUV of the same size.

Nowadays, there are UUVs with two and three hulls, catamarans and trimarans accordingly.

The fifth feature to classify is a *navigation principle*. Approaches to organizing a navigation system of AUV and ROV are dramatically different. ROV navigation can be performed with the help of compass only – it does not need any other sophisticated navigation hardware, because of ROV capability to transmit video in real-time mode.

In its turn, AUVs are equipped with far more sophisticated navigation devices. For example, AUV “MT-2010” is equipped with an on-board navigation system, including a compass and a Doppler log. The on-board navigation system corrects its errors by exchanging information with a hydroacoustic navigation system. Some AUVs are equipped with side-scan sonars, besides systems mentioned above.

1.1.3 UUV hydrodynamics

1.1.3.1 UUV parameters

A set of quantitative and qualitative parameters is used to evaluate UUV quality. UUV hull shape quality is usually described by quantitative parameters; features of UUV as a vessel are described by qualitative parameters.

Two of a variety of nautical parameters are applicable to UUV examining: a control response and a self-righting.

The UUV control response can be evaluated with the help of several parameters: maneuvering ability, heading stability, self-righting, steering capabilities and active stopping quality.

Maneuvering ability is an ability of a vessel to change its heading angle. It can be evaluated by measuring a turning-circle diameter. A turning-circle diameter is a distance between trajectories of a vessel after a U-turn.

The self-righting of a vessel describes a vessel ability to keep the roll and the trim stable under the influence of disturbances.

An active stopping ability is a vessel ability to use the reverse thrust of main thrusters to stop. It is measured by an active stopping time and a stopping length.

The most widely used quantitative parameters of UUV are its size, a span-chord ration, a midship area, a displacement, a cylindrical coefficient, a displacement center coordinate, a UUV weight, a UUV buoyancy, gravity center coordinates, UUV hull's moments of inertia.

The span-chord ratio can be calculated by dividing the UUV length by its maximum diameter. The most recommended span-chord ratio values lie in an interval between 3 and 6.

The midship area is an area of UUV cross section in its maximal diameter. It is recommended to keep a distance between UUV bow and the midship equal to 42-46% of its length.

UUV displacement is equal to a volume of water, displaced by UUV. The weight of this amount of water is equal to UUV weight.

The cylindrical coefficient is equal to UUV displacement divided by its midship area. The recommended values of cylindrical coefficient lie between 0,6-0,7.

The displacement center coordinate is equal to the distance between a bow of UUV and its displacement center. The displacement center location is a center of the midship area and is a geometric center of UUV. The gravity center relative allocation of gravity center and the displacement center influences UUV self-righting.

The buoyancy reserve is equal to the difference between Archimedes force and the gravity force, influencing UUV. It describes UUV ability to float without PSS.

The gravity center coordinates describe its allocation around the displacement center.

1.1.3.1 UUV motion parameters

UUV motion is a combination of UUV movement along coordinate axes and its rotation around them. Let us consider in detail a process of choosing coordinate system allocation, which is used to describe UUV motion and its parameters.

Three coordinate systems are used to describe UUV motion (figure 1.7).

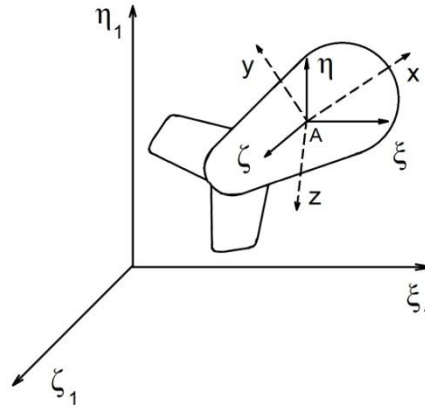


Fig. 1.7 – UUV coordinate systems

$\xi_1\eta_1\zeta_1$ is a global coordinate system. Axis of $\xi\eta\zeta$ are parallel to $\xi_1\eta_1\zeta_1$ corresponding axes. The center of $\xi\eta\zeta$ concurs with UUV pole. Axes of xyz concur with axes of UUV hull, its center – with UUV pole. So, a xy plane coincides with a vertical longitudinal plane of UUV; xz plane is a midship plane; y axis is collinear to a line of intersection of xz and xy planes and is directed upwards.

The xyz coordinate system is used to calculate UUV moments of inertia.

xyz and $\xi\eta\zeta$ coordinate systems are used to define UUV orientation through defining heading, roll and trim angles. The heading angle is an angle between ξ axis and a projection of x axis on a horizontal plane. The roll angle is an angle between a vertical longitudinal plane of UUV and a vertical plane, containing x axis. The trim angle is an angle between x axis and its projection on a horizontal plane.

$\xi_1\eta_1\zeta_1$ coordinate system is used to calculate UUV coordinates and its velocity.

So, UUV coordinates are defined by its location in a global coordinate system. Its orientation is defined by the heading angle, the roll angle and the trim angle.

1.1.3.3 UUV hydrodynamic parameters

Several parameters are used to describe UUV hydrodynamics. These are additional mass coefficients, coefficients of hydrodynamic forces and their moments. Let us consider their physical meaning and methods of their calculation.

Additional mass coefficients characterize an inertness of water, moving with UUV. There are 36 coefficients of additional masses and, traditionally, they are used in a form of square matrix determiner, having 6 rows and 6 columns:

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & . & . & . & . & \lambda_{16} \\ . & . & & & & . \\ . & & . & & & . \\ . & & & . & & . \\ . & & & & . & . \\ \lambda_{61} & . & . & . & . & \lambda_{66} \end{vmatrix}.$$

λ_{ij} coefficients have different measurement units and not all of them are masses. For example, masses of the fluid, being moved along each of three coordinate axis by UUV during its motion, are equal to $\lambda_{ij}; i, j \in [1;3]$. Moments of inertia of these amounts of fluid are equal to $\lambda_{ij}; i, j \in [4;6]$. Other additional mass coefficients describe an interconnection of different types of motion.

Values of additional masses are determined by UUV hull shape. Depending on complexity of the hull shape and its symmetry several methods can be applied to calculate coefficients of additional masses. For example, to calculate additional masses of UUV with streamlined a hull a method, based on a plane-section hypothesis, is usually applied. Additional masses of UUV with a more complex hull can be calculated by approximation of the hull with a set of typical figures, for which all necessary formulas are derived.

UUV, moving in a viscous fluid, is affected by three hydrodynamic forces: drag force R_x , lift force R_y , athwartship force R_z . These forces can be calculated with the help of following formulas:

$$R_{x1} = c_{x1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}; R_{y1} = c_{y1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}; R_{z1} = c_{z1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V^{2/3}, \quad (1.1)$$

c_{x1}, c_{y1}, c_{z1} – hydrodynamic force coefficients, ρ – fluid density, V – UUV displacement, v – UUV motion velocity. There is no variable in these formulas, which could consider angles between the underwater fluid threads and UUV heading,

but it is obvious, that all hydrodynamic forces must be affected by UUV heading. Consequently, coefficients of hydrodynamic forces are not constant; they depend on the angle of attack and drift.

The coefficients of hydrodynamic forces are usually calculated by processing an experimental data. Due to inability to perform an experiment naturally, let us perform it virtually. With the help of computational fluid dynamics software, a pressure field around UUV hull will be built. Analyzing the pressure field, it is possible to develop the functional connection between coefficients of hydrodynamic forces and the aforementioned parameters. The use of these function will make a mathematical model more accurate.

UUV, moving in a viscous fluid, is also affected by three hydrodynamic moments of forces: roll moment M_x , heading moment M_y , trim moment M_z . The following formulas allow calculating the values of these moments:

$$M_{x_1} = m_{x_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V; M_{y_1} = m_{y_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V; M_{z_1} = m_{z_1} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot V, \quad (1.2)$$

$m_{x_1}, m_{y_1}, m_{z_1}$ – coefficients of hydrodynamic moments.

These coefficients, as coefficients of hydrodynamic forces, can be calculated only by analyzing experimental data and also depend on angles of attack and drift.

In order to examine UUV motion process, expressions (1.1) and (1.2) must be transformed from xyz coordinate system to $\xi\eta\zeta$. To do that, the following formulas are used:

$$\begin{aligned} c_x &= c_{x_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) - c_{y_1} \cdot \sin(\alpha) + c_{z_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ c_y &= c_{y_1} \cdot \cos(\alpha) + c_{z_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) + c_{x_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ c_z &= c_{z_1} \cdot \cos(\beta) - c_{x_1} \cdot \sin(\beta); \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} m_x &= m_{x_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) + m_{y_1} \cdot \sin(\alpha) - m_{z_1} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta); \\ m_y &= m_{y_1} \cdot \cos(\alpha) + m_{z_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - m_{x_1} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta); \\ m_z &= m_{z_1} \cdot \cos(\beta) + m_{x_1} \cdot \sin(\beta), \end{aligned} \quad (1.4)$$

α, β – angles of attack and drift accordingly.

After considering all disturbances, which are caused by viscous fluid and affect UUV as a control object, let us consider a UUV motion control system's structure.

1.1.4 Motion control system of UUV

Motion control system (MCS) of UUV manipulates all parameters of UUV motion process. A set of manipulated parameters depends on a type of UUV. The structure of AUV and ROV MCS will be considered in detail.

The common MCS structure consists of three levels: strategy control level, tactics control level, implementation level.

The strategy control level provides an execution of a whole mission program. The tactics control level includes some important procedures (such as an obstacle avoiding procedure) and an automatic scheduler, which manages an execution of these procedures. An implementation level controls PSS directly and executes commands of a tactics control level scheduler.

MCS implementation level is a complex system and includes a cascade control system. The subsystems of the implementation level control PSS thrust and, consequently, provide necessary acceleration, velocity and coordinates of AUV.

MCS of this structure allows AUV to move along the desired trajectory rapidly and accurately and, if necessary, to reprogram itself to avoid underwater obstacles.

Due to the fact, that ROVs are usually controlled by operators, its MCS structure is simpler than that of AUV and is almost as complex as the implementation level of AUV MCS.

The purpose of a ROV MCS is, generally, to control ROV orientation. The main thrusters control, heading and depth control are usually performed manually by an operator. MCS manipulates the roll and the trim and compensates hydrodynamic forces and their moments, which affect ROV during its movement.

It is necessary to consider, that every thruster may be used to perform several tasks simultaneously. For example, the vertical thruster can be used to manipulate

ROV buoyancy and to stabilize the trim. The horizontal thruster can be used to manipulate velocity and to stabilize heading. So, the control system must in some cases use the same actuator to manipulate several parameters simultaneously. To provide such opportunity, a number of virtual thrusters must be used instead of one real thruster. To do that, the maximal thrust of every thruster must be divided into several parts, and each of them should be considered as a virtual thruster, which can be used in one control loop. For example, the maximal thrust of a vertical thruster can be divided into three equal parts: the first of them will be used in the buoyancy control loop, the second one – in the trim control loop, the last one – in the roll control loop.

Such approach to the use of thrusters creates another problem. It is necessary to give an opportunity to an operator to control each virtual thruster manually.