



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

Инженерная школа

Кафедра автоматизации и управления

Косач Леонид Владимирович

**Разработка и исследование программно-аппаратного
комплекса определения ходовых характеристик
подводных аппаратов в условиях мелководного полигона**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
по направлению подготовки магистров
11.04.03 – «Конструирование и технология электронных средств»

г. Владивосток
2018

Студент Косенко
« 27 » 06 (подпись) 2018 г.

Руководитель выпускной
работы (проекта) Заблаб ЧПМБ
(подпись, ученое звание) К. Г. Н.
Косенко В.В.
(подпись) (ФИО)
« 03 » июль 2018 г.

«Допустить к защите»

Руководитель ОП профессор
(ученое звание)
Мираев
(подпись) (ФИО)
« 05 » 07 2018 г.

Консультант по _____
(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20 _____ г.

Зав. кафедрой д.т.н.
(ученое звание)
Филаретов В.Ф.
(подпись) (ФИО)
« 04 » 07 2018 г.

Консультант по _____
(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20 _____ г.

Защищена в ГАК с оценкой отлично

Нормоконтроль доцент
(подпись, ученое звание)
Летичева О.Н.
(подпись) (ФИО)
« 04 » июль 2018 г.

Секретарь ГАК
Бобин Е.Ю Бобин
(подпись) (ФИО)
« 5 » июль 2018 г.

Рецензент В.Н.С. ЧПМБ, к.т.н.
(ученое звание)
Львов О.Ю.
(подпись) (ФИО)
« 03 » июль 2018 г.

Сведения, содержащих
гостайну, нет.

Эксперт А.Н. Мираев

УТВЕРЖДАЮ
Директор Инженерной школы

Подпись (ФИО)
« _____ » _____ 201 г.

В материалах данной выпускной квалификационной работы не
содержатся сведения, составляющие государственную тайну,
и сведения, подлежащие экспортному контролю.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

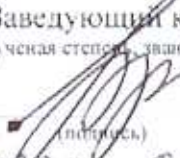
Инженерная школа
Кафедра автоматизации и управления

УТВЕРЖДЕНО

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

 Жирабок А.Н.
(подпись) (ФИО)
«25» 03 2018 г.

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор
(ученая степень, звание)

 Филаретов В.Ф.
(подпись) (ФИО)
«20» 03 2018 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Студенту

Косачу Леониду Владимировичу
(Фамилия, Имя, Отчество)

Группа

М-3213

(номер группы)

1. Наименование темы: Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса определения ходовых характеристик подводных аппаратов в условиях мелководного полигона.

2. Основания для разработки: Приказ о дипломном проектировании № Сд. 40 от 18.03.2018 г.

3. Источники разработки: Справочные материалы и стандарты, научно-техническая литература.

4. Технические требования (параметры): Обеспечить требуемое качество измерения и регистрации натяжения буксировочного проводника и скорости изменения его длины, напряжения и тока приводного электродвигателя буксировочной лебедки.

5. Дополнительные требования: Сохранение файла данных с измеренными параметрами; отображение графиков изменения измеренных параметров во времени.

6. Перечень разработанных вопросов: Обзор существующих методов измерения гидродинамических характеристик подводных аппаратов; разработка модели использования стенда; разработка функциональной схемы оборудования стенда по заданным требованиям к измеряемым параметрам; моделирование режима буксировки подводных аппаратов; определение требований к электродвигателю буксировочной лебедки; нагрузочные испытания электродвигателя буксировочной лебедки; обоснование выбора оборудования стенда; моделирование стенда в режиме измерения лобового сопротивления.

7. Перечень графического материала: Графический материал отсутствует.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

№ п/п	Наименование этапов дипломного проекта (работы)	Срок выполнения этапов дипломного проекта (работы)	Примечание
1	Написание введения и постановки задачи	До 15.02.18	
2	Написание первой главы диссертации	До 25.03.18	
3	Написание второй главы диссертации	До 05.05.18	
4	Написание третьей главы диссертации	До 25.05.18	
5	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями руководителя	До 15.06.18	
6	Проверка диссертационной работы на Антиплагиат	До 20.06.18	
7	Подписи диссертации у рецензента, руководителя ВКР, руководителя ОП, заведующего кафедрой	До 25.06.18	
8	Подготовка к защите (подготовка доклада и презентация в PowerPoint)	До 01.07.18	
9	Защита ВКР в ГЭК	02.07.2018-07.07.2018	

Дата выдачи задания 15.01.2018 г.

Срок представления к защите 05.07.2018 г.

Руководитель ВКР _____

Костенко В.В.

(ФИО)

Студент _____

Косач Л.В.

(ФИО)



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

Инженерная школа

Кафедра автоматизации и управления

Косач Леонид Владимирович

**Разработка и исследование программно-аппаратного
комплекса определения ходовых характеристик подвод-
ных аппаратов в условиях мелководного полигона**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
по направлению подготовки магистров
11.04.03 – «Конструирование и технология электронных средств»

г. Владивосток
2018

Студент _____
(подпись)
« _____ » _____ 20__ г.

Руководитель выпускной
работы (проекта) _____
(должность, ученое звание)

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

«Допустить к защите»

Руководитель ОП _____
(ученое звание)

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Консультант по _____

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Зав. кафедрой _____
(ученое звание)

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Консультант по _____

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Защищена в ГАК с оценкой _____

Секретарь ГАК

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Нормоконтроль _____
(должность, ученое звание)

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.

Рецензент _____
(ученое звание)

(подпись) (ФИО)
« _____ » _____ 20__ г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа
Кафедра автоматизации и управления

УТВЕРЖДЕНО

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

_____ Жирабок А.Н.

(подпись) (ФИО)

« ____ » _____ 20__ г.

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор
(ученая степень, звание)

_____ Филаретов В.Ф.

(подпись) (ФИО)

« ____ » _____ 20__ г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу

Студенту

Косачу Леониду Владимировичу

(Фамилия, Имя, Отчество)

Группа

М-3213

(номер группы)

1. Наименование темы: Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса определения ходовых характеристик подводных аппаратов в условиях мелководного полигона.
2. Основания для разработки: Приказ о дипломном проектировании № Сд. 40 от 18.03.18 г.
3. Источники разработки: Справочные материалы и стандарты, научно-техническая литература.
4. Технические требования (параметры): Обеспечить требуемое качество измерения и регистрации натяжения буксировочного проводника и скорости изменения его длины, напряжения и тока приводного электродвигателя буксировочной лебедки.
5. Дополнительные требования: Сохранение файла данных с измеренными параметрами; отображение графиков изменения измеренных параметров во времени.
6. Перечень разработанных вопросов: Обзор существующих методов измерения гидродинамических характеристик подводных аппаратов; разработка модели использования стенда; разработка функциональной схемы оборудования стенда по заданным требованиям к измеряемым параметрам; моделирование режима буксировки подводных аппаратов; определение требований к электродвигателю буксировочной лебедки; нагрузочные испытания электродвигателя буксировочной лебедки; обоснование выбора оборудования стенда; моделирование стенда в режиме измерения лобового сопротивления.
7. Перечень графического материала: Графический материал отсутствует.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

№ п/п	Наименование этапов дипломного проекта (работы)	Срок выполнения этапов дипломного проекта (работы)	Примечание
1	Написание введения и постановки задачи	До 15.02.18	
2	Написание первой главы диссертации	До 25.03.18	
3	Написание второй главы диссертации	До 05.05.18	
4	Написание третьей главы диссертации	До 25.05.18	
5	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями руководителя	До 15.06.18	
6	Проверка диссертационной работы на Антиплагиат	До 20.06.18	
7	Подписи диссертации у рецензента, руководителя ВКР, руководителя ОП, заведующего кафедрой	До 25.06.18	
8	Подготовка к защите (подготовка доклада и презентация в PowerPoint)	До 01.07.18	
9	Защита ВКР в ГЭК	02.07.2018-07.07.2018	

Дата выдачи задания 15.01.2018 г.

Срок представления к защите 05.07.2018 г.

Руководитель ВКР _____

(подпись)

Костенко В.В.

(ФИО)

Студент _____

(подпись)

Косач Л.В.

(ФИО)

АННОТАЦИЯ

В настоящее время в мировой науке и промышленности особо остро стоит вопрос исследования Мирового океана.

Ключевым фактором в этих исследованиях является роботизированные подводные аппараты, разработкой которых занимается ИПМТ ДВО РАН г. Владивосток. Однако отсутствие необходимых измерительных комплексов в ИПМТ существенно осложняет разработку подводных аппаратов.

В ходе данной работы был произведен обзор существующих методов измерения гидродинамических характеристик подводных аппаратов, разработана модель измерительного тензометрического стенда, определен состав необходимого оборудования, проведены нагрузочные испытания данного оборудования, реализована модель стенда в программном комплексе Matlab.

Исследование реализованной модели показало, что разработанный стенд позволяет проводить испытания подводных аппаратов, разработанных в ИПМТ ДВО РАН г. Владивосток.

ABSTRACT

The article deals with development of strain gauge setting for determining hydrodynamic characteristics of underwater vehicles.

It is analyzed methods of determining hydrodynamic characteristics of underwater vehicles, described their advantages and disadvantages. Much attention is given to development of strain gauge setting which includes: design of setting's mathematical and functional models, selection of appropriate equipment, equipment load testing, modeling of setting's work in software Matlab. Also it gives a results of researching strain gauge setting's model, which show the dependence of underwater vehicle's speed on electric motor's voltage.

The article is intended for students and researchers.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат

ГЭП – гребной электрический привод

ДРК – движительно-рулевой комплекс

ИПМТ – Институт проблем морских технологий

КПД – коэффициент полезного действия

НПА – необитаемый подводный аппарат

ПА – подводный аппарат

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий

ПК – персональный компьютер

ТНПА – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Мирового океана – одна из важнейших и приоритетных задач Российской Федерации. Об этом говорится в концепции федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016-2031 годы, утверждённой распоряжением от 22 июня 2015 года №1143-р правительства Российской Федерации. Цель Программы – активизация использования ресурсного и пространственного потенциала морей России и обеспечение присутствия России в ключевых районах Мирового океана и Антарктике, а также реализация стратегических задач по научному и информационному обеспечению развития морской деятельности.

Программа включает следующие подпрограммы:

- комплексные исследования Антарктики;
- экспедиционные исследования в Мировом океане;
- прикладные исследования природы Мирового океана;
- совершенствование информационного обеспечения морской деятельности [21].

Большую роль в развитии данной программы играют автономные измерительные платформы, основу которых составляют робототехнические системы, способные функционировать в сложной подводной среде. Основные виды задач, которые способны выполнять автономные необитаемые подводные аппараты:

- обзорно-поисковые работы, включая поиск и обследование затонувших объектов, инспекцию подводных сооружений и коммуникаций;
- развертывание широкомасштабных долговременных систем наблюдения и мониторинга морских акваторий, рельефа дна, геологических образований, биологических объектов и гидрофизических полей;

– геологическую разведку, включая топографическую, фототелевизионную съемку морского дна, акустическое профилирование и картографирование рельефа;

– патрулирование морских акваторий, освещение подводной обстановки и другие задачи по охране подводных территорий [23].

Разработкой и конструированием подводных робототехнических комплексов занимается Институт проблем морских технологий ДВО РАН. С момента основания в 1988 году в Институте разработаны десятки образцов необитаемых подводных аппаратов как автономного, так и привязного типа. [11, 12, 24, 25]. Решающее значение при разработке системы управления движением подводного аппарата имеет математическая модель динамики, параметры которой имеют нелинейный характер и широкий диапазон изменения в зависимости от параметров движения и не поддаются однозначному аналитическому описанию.

Целью данной работы является разработка и исследование программно-аппаратного комплекса определения гидродинамических и тяговых характеристик подводных аппаратов в условиях мелководного полигона.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Современный ПА представляет собой сложный программно-технический комплекс, предназначенный для автоматического и полуавтоматического выполнения широкого круга технологических операций, реализация которых требует точного маневрирования по заданным траекториям, а также динамического позиционирования над объектом работ. ПА является сложным объектом управления вследствие большого количества влияющих параметров и сложной связи между ними. Поэтому уже на самых ранних этапах его разработки необходим анализ позиционных гидродинамических и массо-инерционных характеристик, зависимости параметров движительно-рулевого комплекса от скорости набегающего потока, анализ факторов плавучести и остойчивости, которые в немалой степени влияют на качество выполнения задачи управления движением подводного аппарата [3].

Теоретическая гидромеханика и теория корабля получили за последнее столетие значительное развитие. Однако, расширение возможностей расчета гидромеханических характеристик корпуса аппарата, его движителей и органов управления не приводит к ограничению задач гидромеханического эксперимента. Более того, область использования гидродинамических лабораторий даже расширяется. Это объясняется, в частности, тем, что в теоретических методах исследования рассматриваются не реальные явления, а некоторые упрощённые их модели, хотя и сохраняющие главные физические особенности явлений, но не содержащие всех его деталей, которые при решении некоторых технических задач могут оказаться существенными. Поэтому выбор основных элементов корпуса, рулей и движителей, определение поля скоростей вблизи корпуса, выявление основных гидродинамических закономерностей, определяющих ходо-

вые качества ПА, производится на основе эксперимента, позволяющего получить более достоверные результаты.

Основы научной методики гидродинамического эксперимента были заложены В. Фрудом, который в 1872 г. построил первый опытовый бассейн для определения сопротивления воды движению судна (г. Транхейм, Англия). Создание в Англии опытового бассейна явилось толчком для строительства аналогичных бассейнов в других странах с развитым судостроением. Первоначально опытовые бассейны использовались только для определения сопротивления судна при его движении, в дальнейшем к модельному эксперименту стали прибегать для оценки работы движителей, изучения маневренных и мореходных качеств судов.

Известно, что в лабораторных условиях полное гидродинамическое подобие никогда не достигается, поэтому модельные испытания не в полной мере воспроизводят исследуемое явление, хотя и со значительно большей степенью приближения, чем теоретические методы расчета. Как следствие этого, для окончательной проверки результатов расчетов и модельных испытаний продолжают развиваться и методы натурального эксперимента.

Существующие проблемы теории корабля можно разбить на четыре основные группы, а именно: гидродинамическое сопротивление, движители, управляемость, мореходность. Степень специализации основных лабораторий применительно к этим группам проблем иллюстрируется схемами, приведенными на рисунках 1.1 и 1.2.

Согласно этой схеме лаборатории могут быть подразделены на две основные группы, в одну из которых входят те из них, в которых нельзя моделировать кавитацию, а в другую — лаборатории, где это явление моделируется. Из схемы также следует, что не существует лабораторий, которые позволили бы решать все задачи теории корабля, поэтому исследовательские центры, работающие в области судостроения, должны располагать комплексом специализированных лабораторий. Первый такой комплекс был создан в Германии на базе Гамбургского опытового бассейна в период 1908—1932 гг.



Рисунок 1.1 – Схема спецификации гидроаэродинамических лабораторий с не моделируемой кавитацией

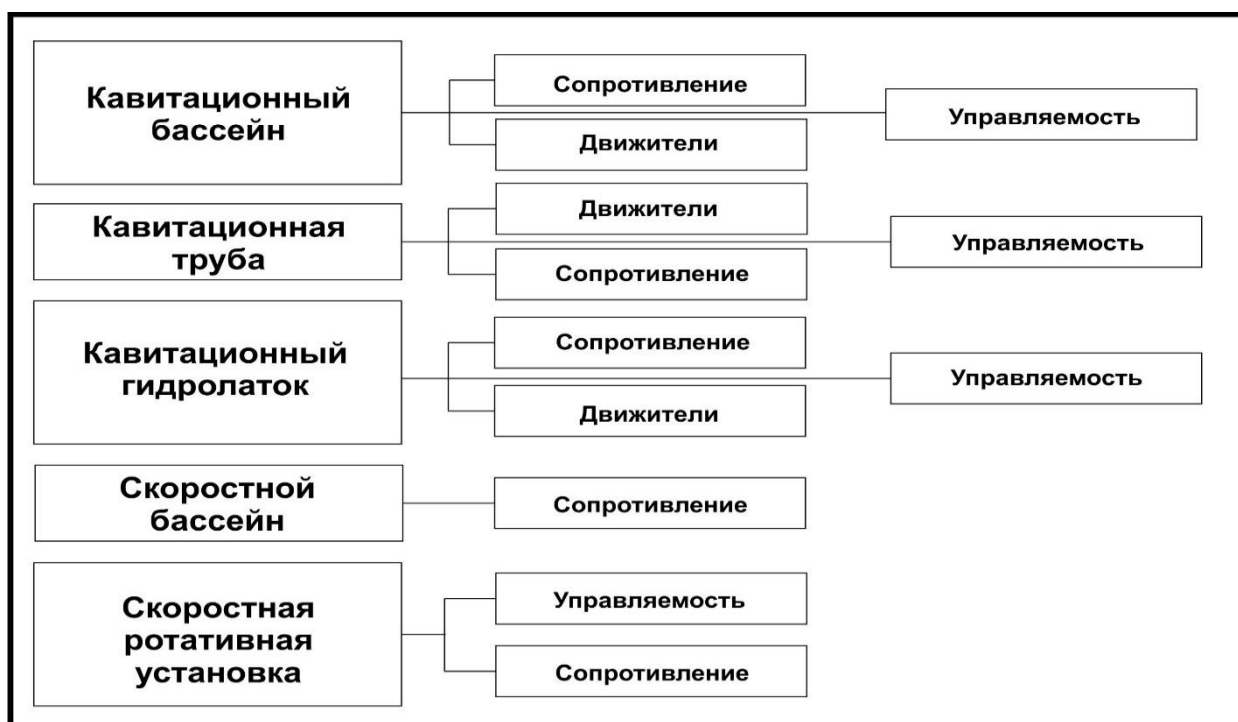


Рисунок 1.2 – Схема спецификации гидроаэродинамических лабораторий с моделируемой кавитацией

Успешный опыт работы Гамбургского научно-исследовательского центра послужил основанием для создания аналогичных комплексов в Англии, США, а

затем и в других странах. В настоящее время все страны с развитым судостроением располагают такими многоцелевыми комплексами. Наиболее крупный и современный комплекс такого рода создан при Национальном научно-исследовательском и опытно-конструкторском центре кораблестроения США.

Поскольку необходимый состав лабораторного комплекса в значительной степени зависит от экспериментальных возможностей лабораторий, которые могут быть включены в этот комплекс, их основные типы рассмотрены более детально. Для удобства рассмотрения особенностей лабораторий остановимся на их классификации по некоторым дополнительным признакам. К числу этих признаков следует прежде всего отнести принцип действия, а именно наличие движения модели в неподвижной жидкости или обращение движения, когда поток обтекает неподвижную модель. Установками с необращенным движением являются опытовые бассейны. К числу установок с обращенным движением относятся аэродинамические и кавитационные трубы и гидролотки. Если обратиться к первой группе лабораторий, в которой моделирование кавитации не осуществляется, то в нее входят опытовые бассейны различных типов, которые могут быть классифицированы по характеру движения модели (прямолинейное, параллельно одной из сторон бассейна или под углом к ней, криволинейное), а также гидролотки и аэродинамические трубы. В бассейнах для исследования ходкости модель всегда движется параллельно длинной стороне бассейна, в мореходных бассейнах может быть обеспечен заданный угол между курсом модели и стороной бассейна. Криволинейное движение модели реализуется в бассейнах для исследования управляемости (циркуляционные бассейны). Некоторые частные задачи проблемы мореходности могут решаться в бассейнах с движением модели, параллельным его длинной стороне. В этих же бассейнах могут проводиться исследования отдельных вопросов управляемости. Аналогично этому на входящих в группу кавитационных лабораторий скоростных ротативных установках, для которых характерно криволинейное движение модели, проводятся исследования и в области сопротивления.

Так как имеется определенная нечеткость в специализации лабораторий, классификационным признаком при описании опытовых бассейнов первой группы принято считать их основное назначение, определяющее выбор параметров лаборатории. Классификационными признаками при описании лабораторий второй группы служат методы моделирования кавитации, а также возможность проведения испытаний вблизи свободной поверхности [10].

На данный момент наиболее распространены следующие виды определения ходовых характеристик подводных аппаратов при проектировании:

- виртуальная продувка с использованием пакетов прикладных программ систем САЕ (ComputerAidedEngineering);
- математическое моделирование, в том числе с использованием программного обеспечения (MathCAD, MathLAB);
- испытание аппарата на водном полигоне;
- продувка в аэродинамической трубе.

1.1 Виртуальная продувка

Обычно на стадии проектирования автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) ставится задача оценить динамические свойства аппарата и его системы управления с учетом основных факторов: конструктивных форм, скорости движения, угловой ориентации аппарата относительно потока, устройства движительного комплекса. Конкретная цель состоит в определении гидродинамических сил сопротивления, действующих на аппарат, и оценке путем моделирования основных динамических и энергетических свойств аппарата. Для исследования динамических свойств АНПА необходимо знание сил вязкого сопротивления в различных режимах движения (обтекания корпуса аппарата потоком жидкости). Обычно для приближенной оценки гидродинамических характеристик при проектировании аппарата прибегают к известным рас-

четно-теоретическим моделям и эмпирическим зависимостям, полученным на основе апробированных методов экспериментальной гидромеханики [8].

В настоящее время для анализа гидродинамики АНПА широко используется метод виртуальной продувки на основе пакетов прикладных программ (SolidWorks 2008, COSMOSFloWorks, FlowSimulation) [8]. Виртуальная продувка трехмерных моделей аппаратов позволяет определять численные значения позиционных гидродинамических сил и моментов, в наглядном виде строить диаграммы поля скоростей (давлений) для различных режимов обтекания и графические зависимости сил сопротивления от скорости и углов атаки (дрейфа). Исследования по ряду проектов АНПА позволяют оценить характеристики гидродинамического сопротивления аппаратов различных конфигураций, выявить элементы внешней формы, влияющие на динамику и энергетику аппаратов. В дальнейшем для сравнения и корректировки используются данные прямых измерений и результаты идентификации параметров теоретической модели по реальным данным, полученным в ходе натурных испытаний аппарата [9].

Аналитические и вычислительные операции при исследовании динамики АНПА включают следующие основные элементы [7]:

- построение трехмерной визуализированной модели аппарата на основе конструктивной схемы проекта (SolidWork),
- гидродинамический расчет модели методом «виртуальной продувки» (FlowWork),
- определение параметров математической модели движения (SymbolToolboxMatlab),
- анализ критериев устойчивости «в большом» и «в малом»,
- построение областей устойчивости в пространстве состояний параметров управления (SymbolToolboxMatlab),
- оптимизация динамических процессов с учетом требований по устойчивости и точности управления.

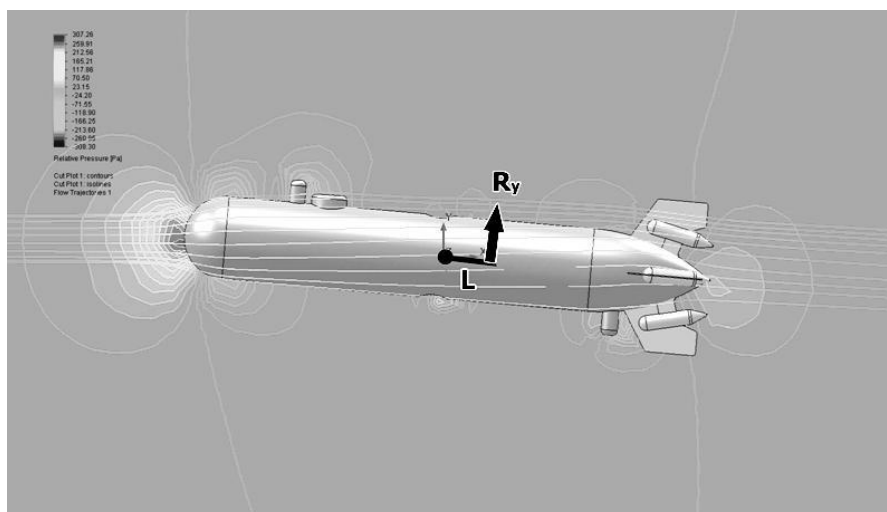


Рисунок 1.3 – Модель виртуальной продувки

1.2 Математическая модель движения АНПА

Математическая модель пространственного движения АНПА имеет вид нелинейной многомерной системы уравнений, параметры которой могут меняться в широком диапазоне. Поэтому для исследования динамических свойств аппарата принято разделение полной системы уравнений на подсистемы, описывающие движение в плоскостях симметрии с использованием «естественных» переменных состояния. Принятые при этом системы координат и схемы действия сил приведены на рисунках 1.4, 1.5.

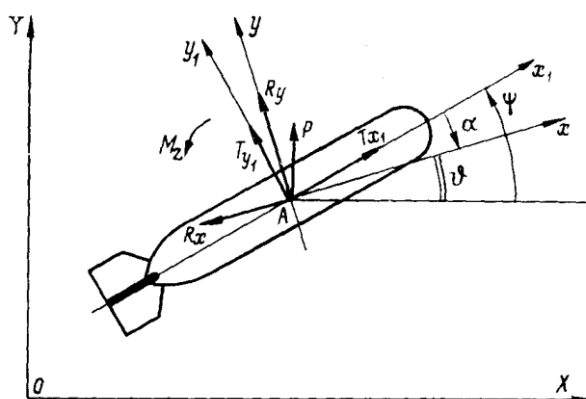


Рисунок 1.4 – Системы координат и схема действия сил в вертикальной плоскости

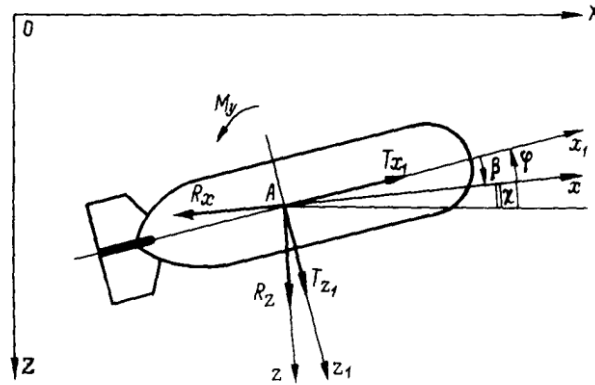


Рисунок 1.5 - Системы координат и схема действия сил в горизонтальной плоскости

При этом уравнения движения АНПА можно представить в виде двух взаимосвязанных подсистем:

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + \lambda_{11}) \cdot \dot{\vartheta} = -R_x(\nu, \alpha) + P \cdot \sin \vartheta + T_{x1} \cdot \cos \alpha - T_{y1} \sin \alpha, \\ (M + \lambda_{22}) \cdot \nu \cdot \dot{\varphi} = R_y(\nu, \alpha, \varphi) + P \cdot \cos \vartheta + T_{y1} \cdot \cos \alpha + T_{x1} \sin \alpha, \\ (J_{zz} + \lambda_{66}) \cdot \dot{\psi} = M_0 \cdot \sin \psi + M_z(\nu, \alpha, \varphi) + M_{зупр}, \\ \dot{X} = \nu \cdot \cos \vartheta, \dot{Y} = -\nu \cdot \sin \vartheta, \psi = \vartheta - \alpha. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (M + \lambda_{11}) \cdot \dot{\vartheta} = -R_x(\nu, \beta) + T_{x1} \cdot \cos \beta - T_{z1} \sin \beta, \\ (M + \lambda_{22}) \cdot \nu \cdot \dot{\chi} = R_y(\nu, \beta, \chi) + T_{z1} \cdot \cos \beta + T_{x1} \sin \beta, \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \cdot \dot{\varphi} = M_y(\nu, \beta, \chi) + M_{зупр}, \\ \dot{X} = \nu \cdot \cos \chi, \dot{Z} = \nu \cdot \sin \chi, \varphi = \chi + \beta. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

где $OXYZ$ – инерциальная (полигонная система координат);

$Ax_1y_1z_1$ – система координат, связанная с аппаратом;

$Axuz$ – скоростная (поточная) система координат;

$T_{x1}, T_{y1}, T_{z1}, M_{уупр}, M_{зупр}$ – проекции управляющих сил и моментов ДРК в системе координат, связанной с корпусом аппарата;

ϑ, χ – углы подъема и поворота траектории;

φ, ψ – углы курса и дифферента аппарата;

α, β – углы атаки и дрейфа;

R_x, R_y, R_z, M_y, M_z – гидродинамические силы и моменты;

M_0 – момент остойчивости;

$P = \rho \cdot U_a - m \cdot g$ – остаточная плавучесть аппарата.

В уравнениях 1.1 и 1.2, описывающих движение в вертикальной (по глубине) и горизонтальной (по курсу) плоскостях скоростной системы координат, используются обозначения, принятые в [1, 2, 9, 8].

Гидродинамические силы и моменты, обусловленные вязкостью жидкости, принято представлять в виде суммы позиционных и демпфирующих составляющих [1, 2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x(v, \alpha) = C_x(\alpha) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot U_a^{2/3} = R_x(1, \alpha) \cdot v^2, \\ R_y(v, \alpha, \psi) = C_y(\alpha) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot U_a^{2/3} + C_y^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a \cdot \psi = R_y(1, \alpha) \cdot v^2 + C_y^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a \cdot \psi \\ R_z(v, \beta, \phi) = C_z(\beta) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot U_a^{2/3} + C_z^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a \cdot \phi = R_z(1, \alpha) \cdot v^2 + C_z^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a \cdot \phi \\ M_y(v, \beta, \phi) = m_z(\beta) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot U_a + m_y^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a^{4/3} \cdot \phi = M_y(1, \beta) \cdot v^2 + m_y^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a^{4/3} \cdot \phi \\ M_z(v, \alpha, \psi) = m_z(\alpha) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot U_a + m_z^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a^{4/3} \cdot \psi = M_z(1, \alpha) \cdot v^2 + m_z^\omega \cdot \frac{\rho \cdot v}{2} \cdot U_a^{4/3} \cdot \psi \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где $R_x(1, \alpha)$, $R_x(1, \beta)$, $R_y(1, \alpha)$, $R_z(1, \beta)$, $M_y(1, \beta)$, $M_z(1, \alpha)$ – зависимости позиционной составляющей гидродинамических сил и моментов от углов атаки и дрейфа, выявленные в ходе виртуальной продувки модели со скоростью набегающего потока $v = 1$ м/с (рисунки 1.4 и 1.5).

Процедура гидродинамического расчета с использованием приложения Flow Simulation пакета прикладных программ Solid Works имеет вид:

- создание расчетной области;
- импортирование созданной геометрической модели в пакет NUMECA International;
- задание граничных условий на поверхностях полученной области;
- генерация сетки;
- выбор основных параметров среды;

- выбор математической модели, описывающей кинематику и динамику сплошной среды;
- задание начального приближения к решению;
- задание вычислительных параметров (т.е. величин, которые определяют используемые алгоритмы вычислительных процессов);
- задание выходных параметров и типов их представлений после вывода;
- запуск модели на расчет в вычислительном модуле и контроль сходимости процесса расчета;
- просмотр полученных результатов расчета с помощью блока CFView.

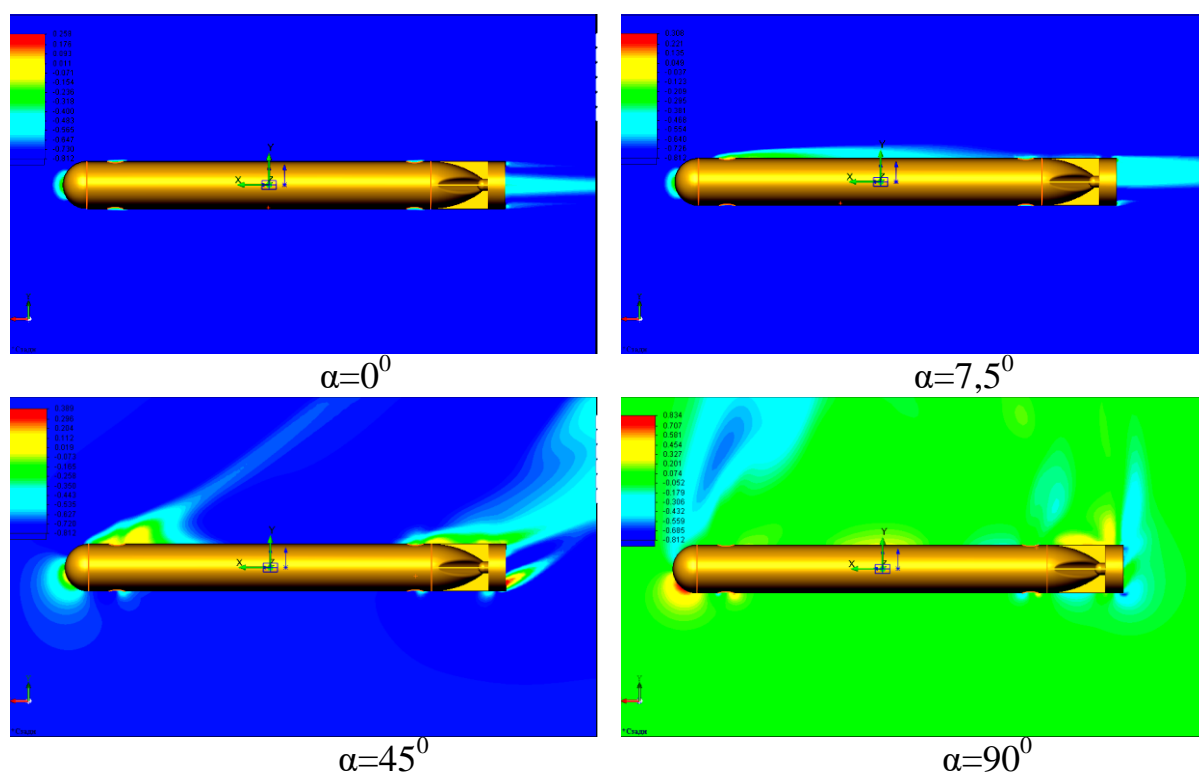


Рисунок 1.6 – Диаграммы скоростей потока на корпусе аппарата при $V=1$ v/c

В результате расчетов получены двумерные массивы значений компонентов гидродинамических сил и моментов, действующих на АНПА. Для дальнейшего использования расчетных данных в модели динамики предлагается их аппроксимировать полиномами. Такой способ позволяет интегрировать учет гидродинамики в модель в компактной форме без использования таблиц. Точность аппроксимации оценивается двумя величинами: суммой квадратов от-

клонений аппроксимирующей функции от базисных значений и корнем из среднего квадрата отклонения. На рисунке 1.7 приведен пример двумерной аппроксимации коэффициента лобового сопротивления e_x по углам атаки и скольжения при скорости заданной скорости. На рисунке 1.8 приведен пример двумерной аппроксимации коэффициента лобового сопротивления m_x по углам атаки и скольжения при заданной скорости.

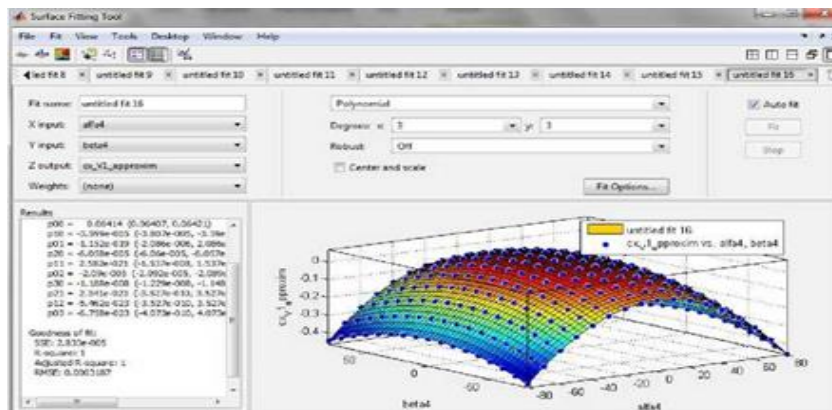


Рисунок 1.7 – Двумерная аппроксимация e_x по углам атаки и скольжения при заданной скорости

На основании полученных полиномов можно получить аппроксимационные выражения для составляющих гидродинамических сил и моментов, действующих на аппарат в движении, которые зависят от скорости движения АН-ПА, углов атаки и дрейфа [18].

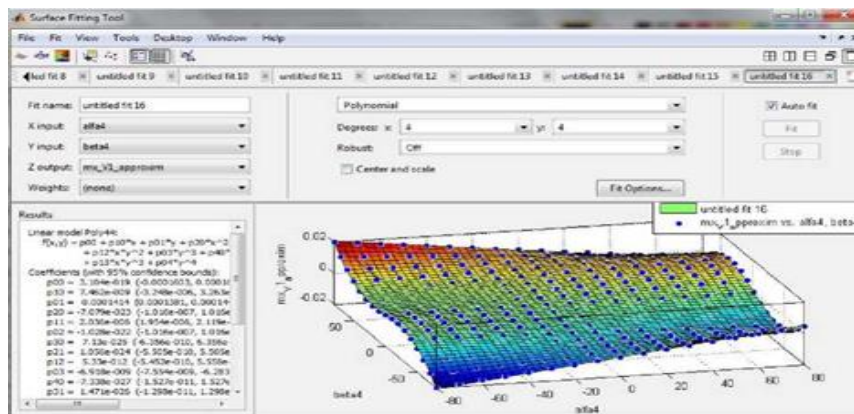


Рисунок 1.8 – Двумерная аппроксимация m_x по углам атаки и скольжения при заданной скорости

1.3 Опытный бассейн

Опытный бассейн — экспериментальная установка, предназначенная для исследования гидромеханических качеств тел.

Опытный бассейн представляет собой чашу, заполненную водой. Бассейны, длина которых значительно превосходит ширину, также называют гидроканалами. Различают малые (до 60 метров длиной), средние (от 60 до 200 метров длиной) и большие (более 200 метров длиной) гидроканалы.

Бассейны, предназначенные для решения специальных задач (например, исследование маневренных качеств судов), могут иметь круглую либо близкую к квадратной форму в плане.

Для буксировки и сопровождения исследуемых тел, опытные бассейны, как правило, оборудуются буксировочными тележками. Буксировочные тележки подразделяют на обитаемые (предназначенные для размещения экспериментаторов) и необитаемые.

Рельсовый путь, по которому перемещается тележка должен не иметь стыков (для уменьшения вибрации) и быть выставлен на постоянном уровне над поверхностью воды (в противном случае в показания динамометра, измеряющего силу сопротивления воды движению объекта, вносится помеха, не зависящая от свойств изучаемого объекта).

Силовой привод, обеспечивающий движение тележки, должен обеспечивать высокое качество стабилизации скорости. В противном случае на динамометр, измеряющий силу сопротивления воды движению объекта, будет действовать сила инерции.

Для обеспечения испытаний на волнении, опытные бассейны оборудуются волнопродукторами.

1.3.1 Глубоководный опытовый бассейн Крыловского государственного научного центра

Предназначен для проведения буксировочных и самоходных испытаний надводных и подводных моделей судов в условиях глубокой воды и вблизи свободной поверхности, а также для испытаний гребных винтов и изолированных движительных комплексов. Характеристики:

- бассейн состоит из двух частей длиной 600 и 670 м;
- ширина - 15 м;
- глубина - 7 м;
- каждая часть бассейна оснащена двумя буксировочными тележками, позволяющими испытывать модели судов длиной до 10 м;
- максимальная скорость буксировки 20 м/с;
- предельная глубина погружения подводной модели составляет 2 м.

Оборудование бассейна позволяет:

- осуществлять измерения сил на моделях судового корпуса и движителя.
- проводить исследования характеристик неоднородного пространственного потока в месте расположения движителей.
- моделировать натурные условия обтекания корпуса путем использования полимерных добавок.
- проводить буксировочные и самоходные испытания [16].

Один из самых передовых российских опытовых бассейнов расположен в государственном научном центре г. Крылова. Схема бассейна представлена на рисунке 1.9. Фотографии данного бассейна представлены на рисунках 1.10, 1.11.

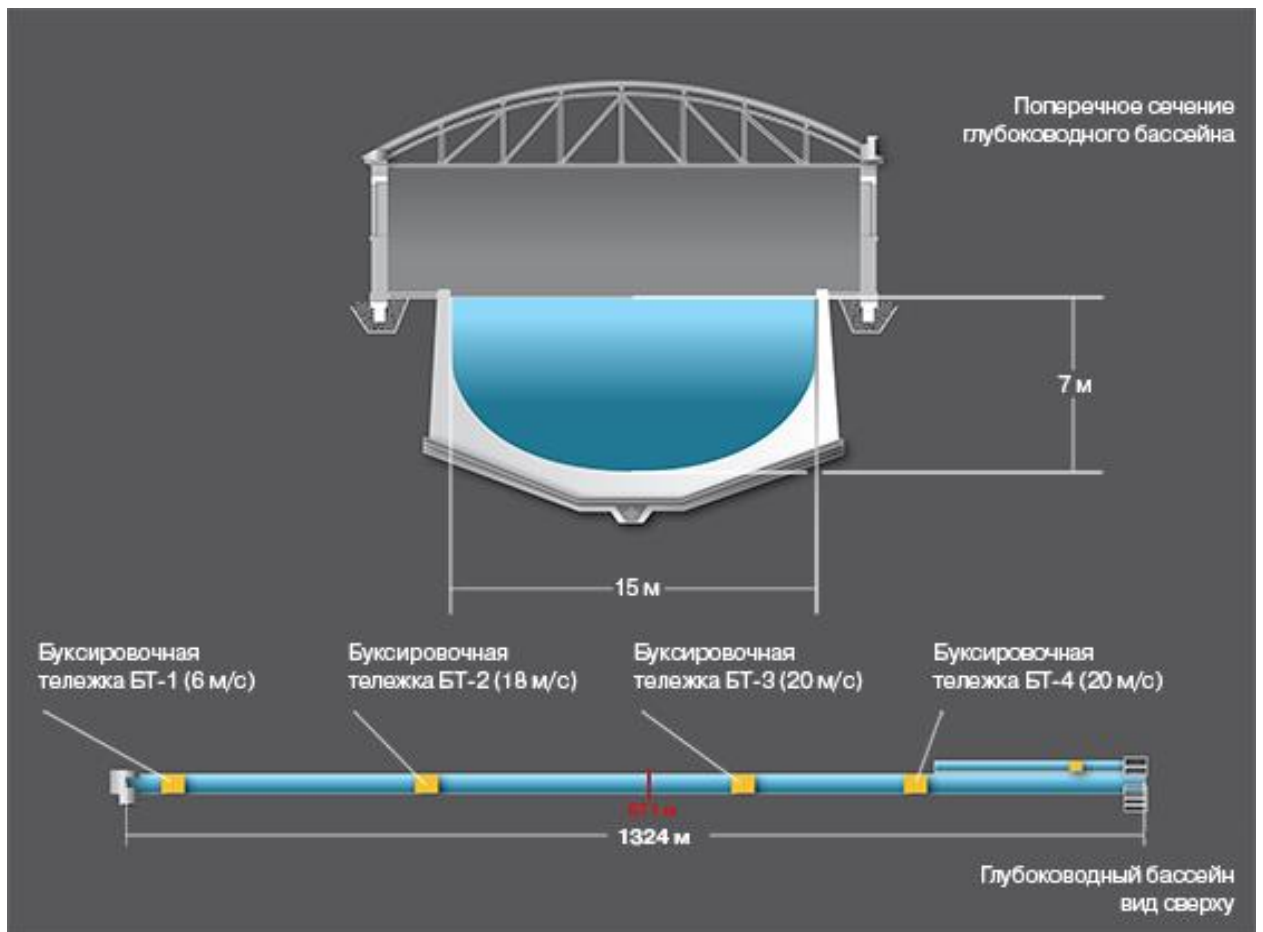


Рисунок 1.9 – Схема глубоководного бассейна

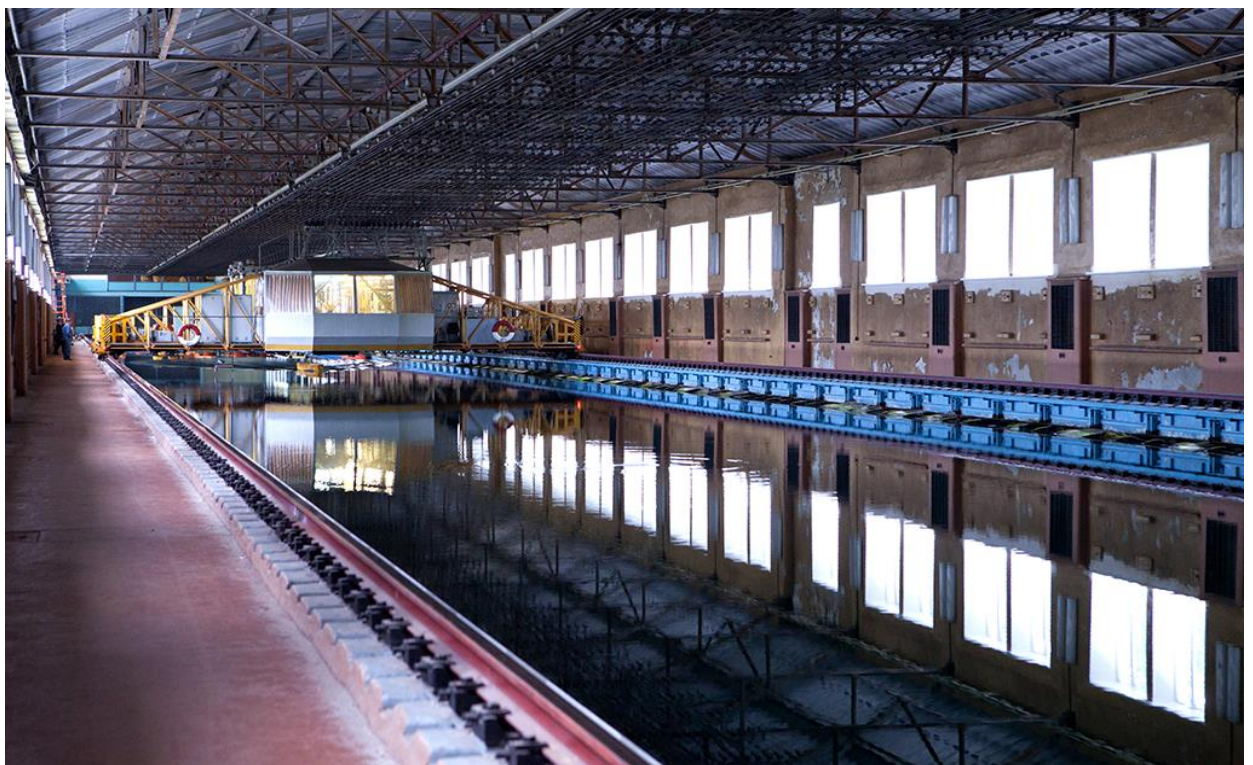


Рисунок 1.10 – Фотография глубоководного бассейна

1.3.2 Маневренно-мореходный бассейн Крыловского государственного научного центра

Предназначен для определения гидродинамических характеристик моделей судов длиной до 3 м, а также для физического моделирования движения и динамического позиционирования судов на тихой воде и в условиях волнения с помощью автономных самоходных радиоуправляемых моделей.

Размеры бассейна:

- длина - 35 м;
- ширина - 22 м;
- глубина - 3 м.

Бассейн оснащен малой ротативной установкой (радиус буксировки 0–8 м, скорость до 5 м/с) и волнопродуктором щитового типа, обеспечивающим создание нерегулярного волнения с заданным энергетическим спектром (высота волны до 0,15 м), а также специальными стендами для определения статических характеристик судов на воздушной подушке и испытаний моделей спасательных шлюпок свободного падения [20].

Схема и фотография маневренно-мореходного бассейна приведены на рисунках 1.11, 1.12.

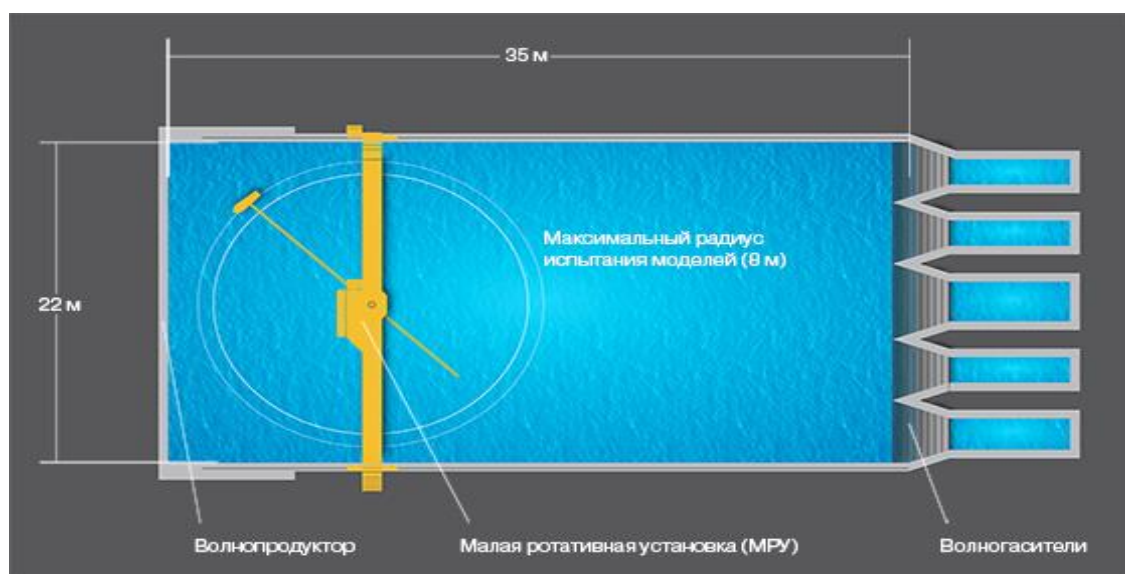


Рисунок 1.11 – Схема маневренно-мореходного бассейна

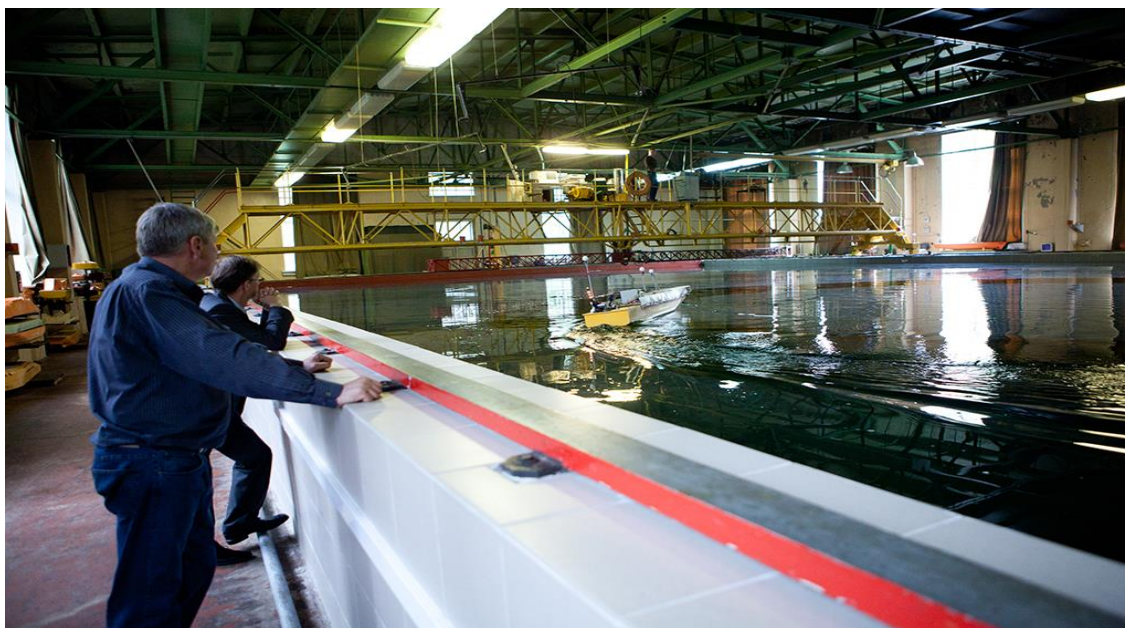


Рисунок 1.12 – Фотография маневренно-мореходного бассейна

1.3.3 Опытный бассейн Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского

Опытный бассейн ЦАГИ был пущен в эксплуатацию в 1930 г. и модернизирован в 1967 и 1978 гг. Он используется для определения гидродинамических характеристик моделей при их движении над водой, по поверхности воды и под водой. В опытном бассейне отработывались обводы отечественных амфибийных самолетов, проводились испытания моделей экранопланов и скоростных судов, уникальных объектов морских вооружений и объектов авиационно-космической техники.

Лоток канала представляет собой монолитную железобетонную конструкцию. Рельсовый путь уложен с высокой точностью. Волнопродуктор выполнен по типу качающейся стенки. Буксировочная тележка представляет собой легкую металлическую конструкцию. Она оборудована четырьмя электродвигателями с ходовыми колесами, обеспечивающими ее движение по рельсам со скоростью до 16 м/с.

В опытном бассейне моделируется прямое, необращенное движение объекта в жидкости. Наряду с исследованием сопротивления движению

надводных судов, подводных лодок и глиссеров в условиях тихой воды и на волнении опытовый бассейн позволяет изучать работу гребных винтов в свободной воде и в присутствии корпуса, характеристики других типов двигателей, качку и мореходные качества судов, а также заниматься решением ряда специальных задач гидромеханики.

В опытовом бассейне могут проводиться следующие эксперименты:

- буксировочные испытания моделей водоизмещающих и глиссирующих судов на спокойной воде и при регулярном волнении;
- определение гидродинамических характеристик гидросамолетов, экранопланов и аппаратов на воздушной подушке путем испытания их моделей;
- отработка на моделях режимов аварийной посадки на воду сухопутных самолетов и вертолетов;
- исследование различных характеристик моделей подводных аппаратов и натуральных объектов относительно небольших размеров [22].

Схема опытового бассейна приведена на рисунке 1.13, фотография бассейна представлена на рисунке 1.14.

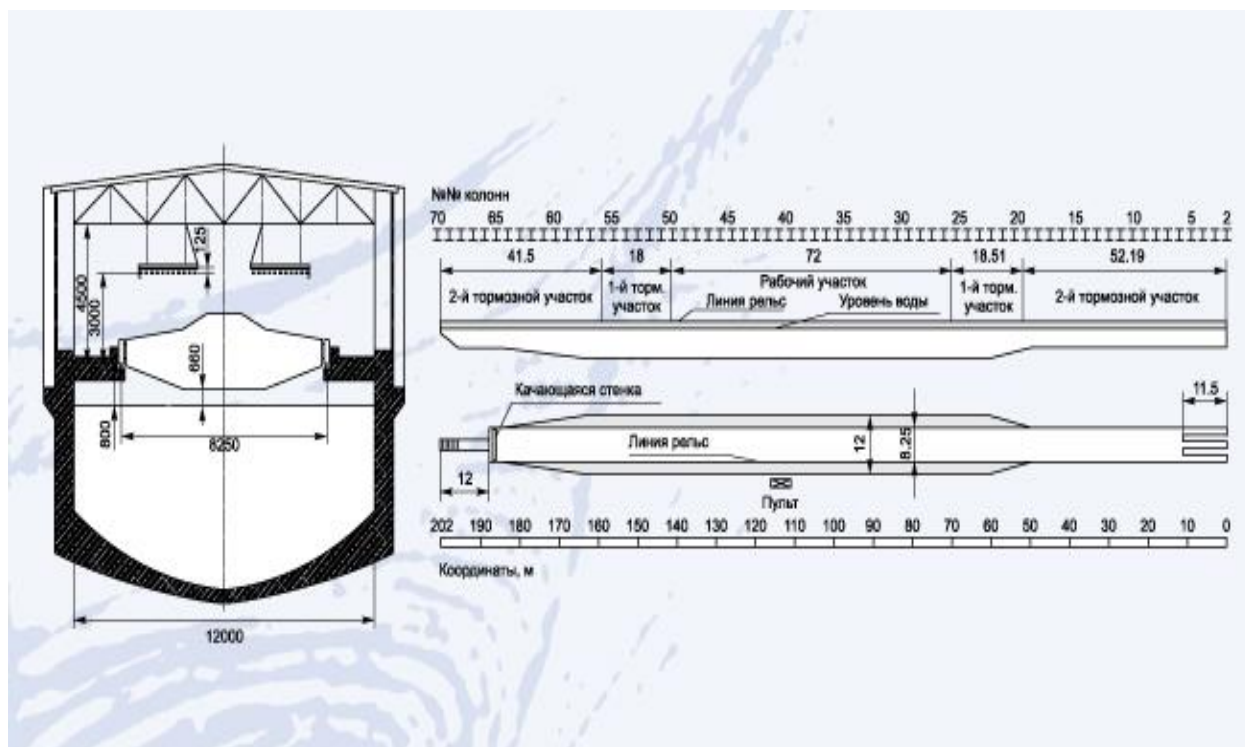


Рисунок 1.13 – Схема опытового бассейна ЦАГИ



Рисунок 1.14 – Фотография опытового бассейна ЦАГИ

1.3.4 Центр по проектированию, изготовлению и испытаниям необитаемых подводных аппаратов г. Владивосток

Центр по проектированию, изготовлению и испытаниям необитаемых подводных аппаратов (Центр НПА) размещается в научно-производственной зоне ДВО РАН в районе станции Чайка, по улице Пальчевского, рядом с береговой линией Амурского залива в непосредственной близости от существующего института «Биологии моря». Центр НПА входит в состав Института проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН, как опытно-экспериментальное подразделение. Основная задача - разработка, испытания и внедрение в промышленное производство современных моделей глубоководных аппаратов.

Центр предназначен для проведения всего комплекса работ по проектированию, изготовлению и предварительным испытаниям новых подводных робототехнических комплексов и гидроакустического оборудования для них.

На данный момент опытовый бассейн непригоден для испытаний, и дата планируемого ввода в эксплуатацию неизвестна

Фотографии центра представлены на рисунках 1.15, 1.16.



Рисунок 1.15 - Центр НПА



1.16 – Опытный бассейн Центра НПА

1.3.5 Гравитационная буксировочная система Дальневосточного опытового бассейна КнАГТУ

Буксировочные испытания моделей судов являются наиболее достоверным способом прогнозирования сопротивления воды движению судна при его проектировании. Главной проблемой при использовании результатов буксировочных испытаний является только частичное воспроизведение характера обтекания судна на его модели (частичное подобие моделируемых потоков).

Одной из проблем, относящихся к малым опытовым бассейнам, является малый участок равномерного движения модели после ее разгона, а то и полное его отсутствие. Для возможности использования малых по длине бассейнов как гидродинамической установки требуется разработать метод предсказания характеристик движения модели на участке равномерного движения по результатам замера характеристик на участке разгона.

Наиболее простой для отработки условий эксперимента в опытовых бассейнах является буксировочная система гравитационного типа - движение модели под действием груза постоянной массы (ГБС). Применение ГБС исключает погрешность измерения скорости движения модели с помощью сложных датчиков, вертикальные колебания модели, связанные с движением буксировочной тележки, и ряд других факторов.

Кинематическая схема основных узлов буксировочной системы показана на рисунке 1.17. Модель прикрепляется (запрягается) к бесконечному тросу, охватывающему передний и задний шкивы, находящиеся на концах бассейна. В качестве троса используется шнур плетеный «Мультитекс» шестнадцатипрядный с разрывным усилием 4500 Н и погонным весом 16 г/м. Масса всего троса составляет 1 кг, что предусматривает сравнительно небольшое его натяжение от провисания, а значит, уменьшит нагрузку (и соответственно силы) в подшипниковых узлах переднего и заднего шкивов. Для натяжения троса используется талреп, включенный в бесконечную нить за моделью.

Для изменения положения шкивов по высоте бассейна при использовании различных моделей и изменения уровня воды оба шкива перемещаются и закрепляются по высоте над уровнем воды в специальных каретках. Бесконечный буксировочный трос обеспечивает перемещение (ход) модели с помощью закрепления («запряжки») на ней и передачи буксировочного усилия. Такая запряжка за счет увеличения длины (рисунок 1.18) обеспечивает повышение стабилизирующего момента модели:

$$M = R \cdot L \cdot \sin\varphi, \quad (1.4)$$

где R – буксировочное усилие,

L – длина закрепления троса,

$\sin\varphi$ – угол к оси направления движения.

Непосредственное закрепление троса к носу и корме модели обеспечивает меньший момент за счет уменьшения длины закрепления. Момент можно увеличивать и натяжением троса талрепом, включенным в бесконечную его ветвь. Но чрезмерное натяжение увеличивает нагрузку на подшипниковые узлы шкивов и, соответственно, повышает механические потери в системе, являющейся измерительным устройством.

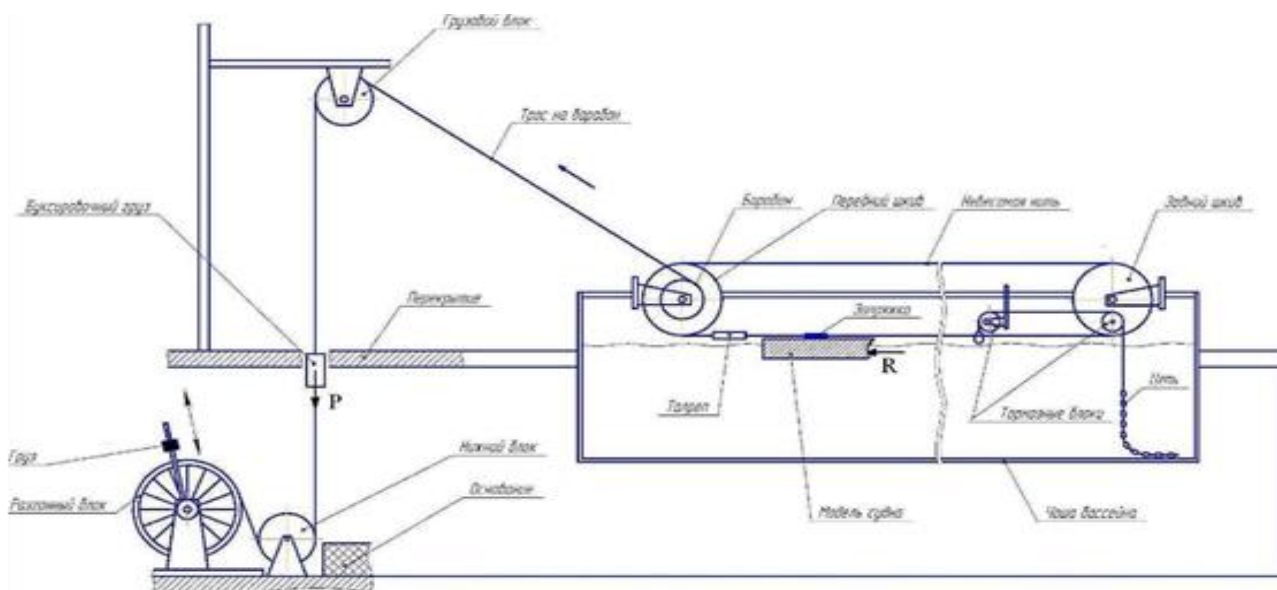


Рисунок 1.17 - Схема гравитационной буксировочной системы

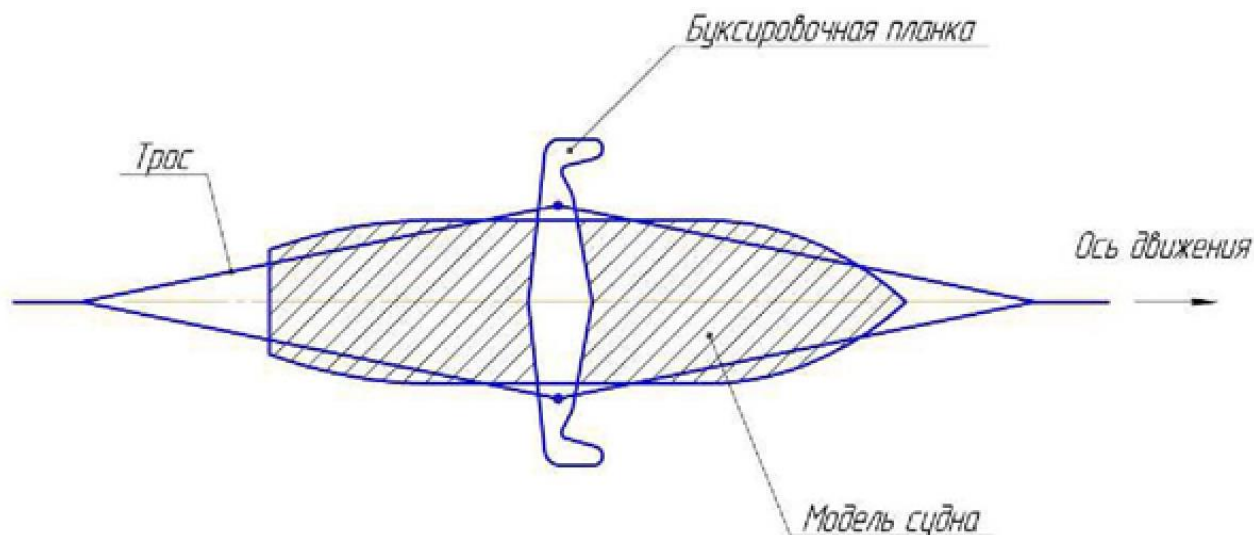


Рисунок 1.18 – Ромбовидная тросовая запряжка модели

На рисунке 1.18 представлена схема крепления каната (троса) в виде ромба. Крепление четырех концов осуществляется на концах буксировочной планки (рисунок 1.19) с обоих бортов. Металлическая планка монтируется к подкрепленному участку палубы модели. По длине модели место закрепления планки определяется центром тяжести действующей ватерлинии. Это обеспечивает свободный ходовой дифферент модели на корму, полностью идентичный соответствующему дифференту судна, а значит, не искажает его посадку в условиях модельного эксперимента. Концы буксировочной планки сделаны в виде крючков для захвата петель тормозного устройства в конце пробега модели [4].

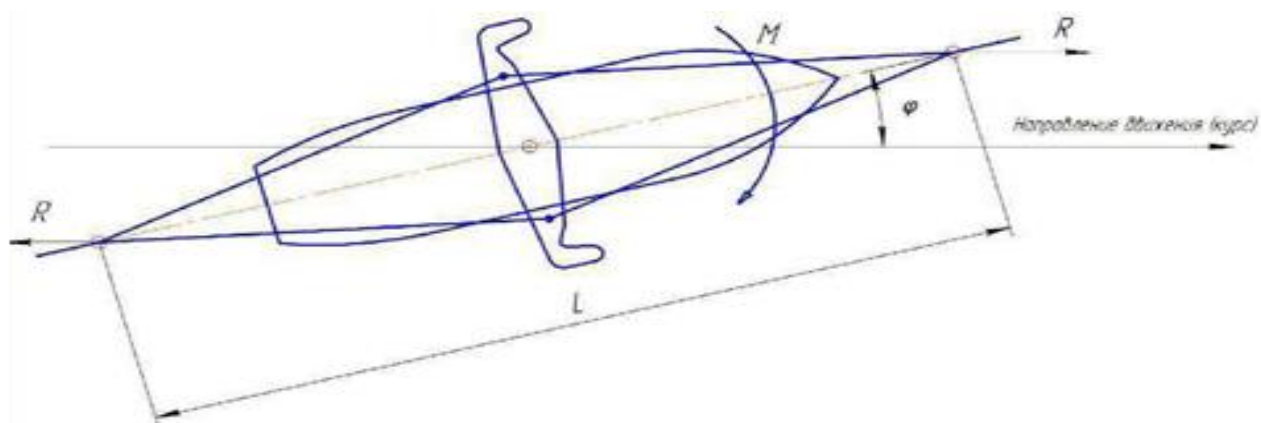


Рисунок 1.19 - Схема сил, возникающих в запряжке модели при ее рыскании

Фотография Дальневосточного опытового бассейна КНАГТУ предоставлена на рисунке 1.20.



Рисунок 1.20 – Опытный бассейн

1.4 Аэродинамическая труба

Аэродинамическая труба — это техническое устройство, предназначенное для моделирования воздействия среды на движущиеся в ней тела. Применение труб в аэродинамике базируется на принципе обратимости движений и теории подобия физических явлений. Объектами испытаний в аэродинамических трубах являются модели натуральных аппаратов или их элементов (геометрически подобные, упруго подобные, термически подобные и т. д.), натурные объекты или их элементы, образцы материалов (унос материалов, каталитичность поверхности и т. д.).

Аэродинамическая труба состоит из одного или нескольких вентиляторов (или других устройств нагнетания воздуха), которые нагнетают воздух в трубу, где находится модель исследуемого тела, тем самым создаётся эффект движения тела в воздухе с большой скоростью (принцип обращения движения).

Аэродинамические трубы были созданы для проведения экспериментальных исследований в области аэродинамики летательных аппаратов. Однако преимущества, обусловленные возможностью проведения экспериментов в воздухе, привели к тому, что аэродинамические трубы стали применяться и для решения задач, связанных с судостроением. Действительно, при изучении процессов в жидкости, когда можно не учитывать влияние свободной поверхности и кавитации, эксперимент в аэродинамической трубе позволяет получить результаты с высокой степенью точности и без экспериментальных трудностей, вызываемых испытанием полностью погруженных тел в опытовом бассейне. Первоначально аэродинамические трубы играли в комплексах лабораторий, предназначенных для исследований в области теории корабля, вспомогательную роль и использовались для решения сравнительно узкого круга задач, связанных главным образом с проблемами управляемости. В частности, аэродинамические трубы применялись для определения гидродинамических характеристик полностью погруженных тел и органов управления. В связи с повышением требований к управляемости судов, движущихся малыми ходами при ветре, значительное внимание стало уделяться исследованию аэродинамических характеристик надводной части судна при обдуве его ветром произвольного направления. В последние годы благодаря развитию судов с динамическими принципами поддержания, у которых аэродинамические силы соизмеримы с гидродинамическими силами, а иногда играют и определяющую роль, круг задач, возлагаемых на аэродинамические трубы, возрос столь значительно, что аэродинамические лаборатории могут быть с полным основанием отнесены к числу основных лабораторий, работающих на нужды судостроения [10].

1.4.1 Ландшафтная аэродинамическая труба Крыловского государственного научного центра

Ландшафтная аэродинамическая труба — специализированная экспериментальная установка для определения ветровых нагрузок на высотные здания,

стадионы, большепролетные мосты, речные и морские порты, буровые платформы и другие уникальные сооружения.

Главными особенностями Ландшафтной аэродинамической трубы являются размеры рабочей части и оснащение самым современным оборудованием. За счет длинной рабочей части происходит моделирование приземного слоя атмосферы характерного для ветрового района строительства объекта, что значительно повышает точность определения ветровых нагрузок.

Благодаря рабочей части шириной 11 метров все испытания проходят на моделях в крупном масштабе и с хорошей детализацией. Это особенно важно для получения корректных данных для высотных зданий и мостов, где требуется воспроизводить окружающий ландшафт местности и прилегающую застройку [19].

Помимо прочего, ландшафтная аэродинамическая труба применяется для определения гидродинамических характеристик подводных лодок и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов [13].

Фотография аэродинамической трубы приведена на рисунке 1.21, схемы аэродинамической трубы – на рисунках 1.22 и 1.23.



Рисунок 1.21 – Фотография аэродинамической трубы



Рисунок 1.22 – Схема рабочего участка аэродинамической трубы

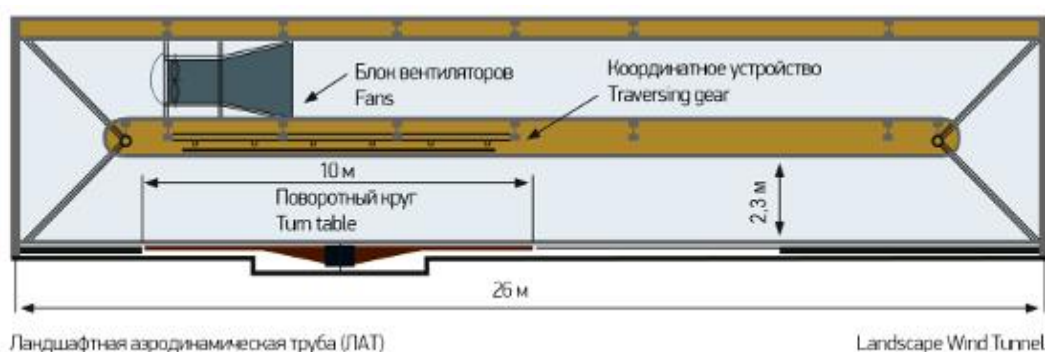


Рисунок 1.23 – Схема ландшафтной аэродинамической трубы

1.4.2 Большая аэродинамическая труба Крыловского государственного научного центра

Предназначена для определения гидродинамических и аэродинамических характеристик кораблей и судов, полей скоростей, распределения давлений по поверхности тел, исследований структуры потока, задымленности, исследований условий посадки вертолетов и использования для продувки архитектурных сооружений. Представляет собой замкнутый канал с открытой рабочей частью, имеющей эллиптическое сечение размерами $4 \times 2,5$ м. Длина рабочей части трубы составляет 5 м. Максимальная скорость потока достигает 75 м/с [15].

Схемы и фотография аэродинамической трубы приведены на рисунках 1.24, 1.25.

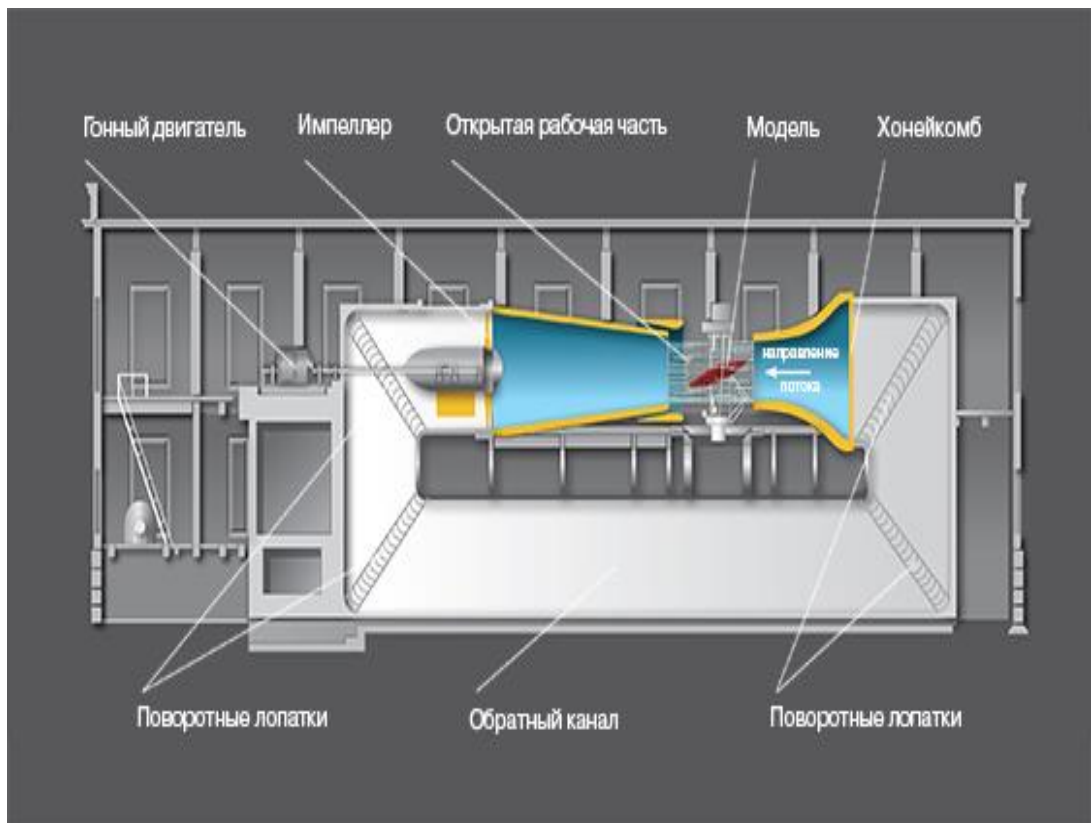


Рисунок 1.24 – Схема аэродинамической трубы



Рисунок 1.25 – Фотография аэродинамической трубы

1.4.3 Аэродинамическая труба Т-5 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского

Т-5 - аэродинамическая труба непрерывного действия, замкнутого типа, с одним обратным каналом, с открытой рабочей частью, предназначена для исследования аэродинамических характеристик моделей. Проводятся исследования параметров потока, обтекающего модели, определяются особенности обтекания моделей с помощью визуализационных методов.

Поток в трубе создается вентилятором, приводимым в действие электродвигателем постоянного тока мощностью 315 кВт. Основные испытания проводятся с помощью шестикомпонентных электромеханических весов. Допустимая площадь крыла модели $0,5 \text{ м}^2$, размах 1,5 м, длина 2,5 м.

Возможности аэродинамической трубы используются для исследований и отработки различных летательных аппаратов на режимах взлета и посадки, летательных аппаратов, движущихся с малыми скоростями, типа дирижаблей и микро-БПЛА, кораблей, морских нефтегазодобывающих платформ, промышленных сооружений и другие [14]. Схемы и фотография аэродинамической трубы приведены на рисунках 1.26, 1.27.

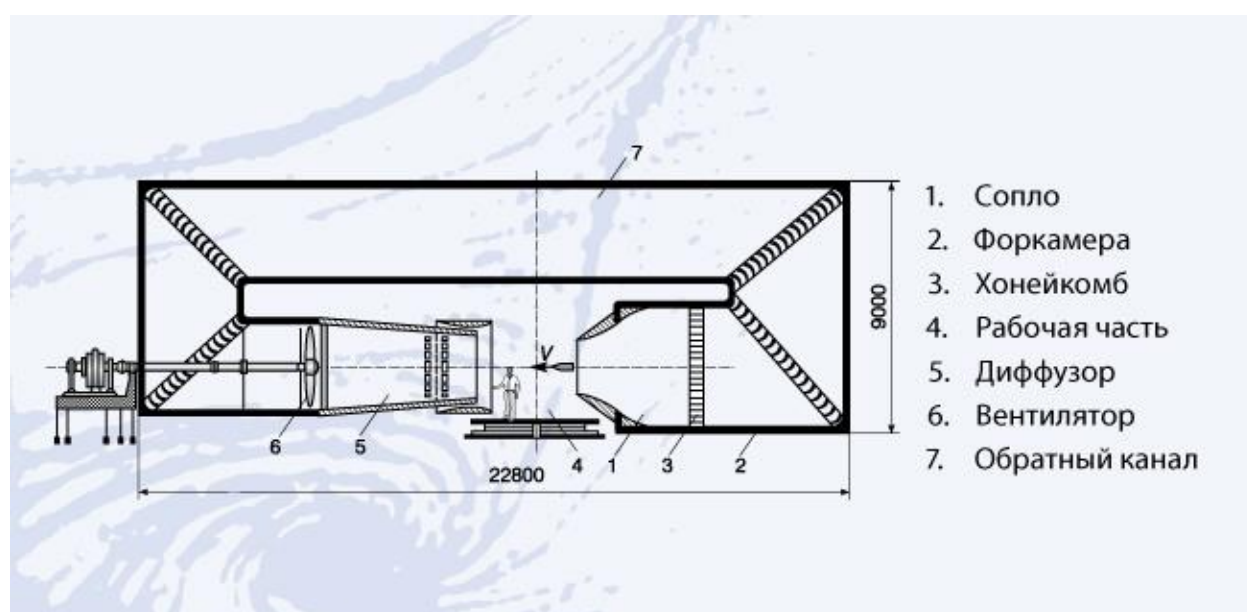


Рисунок 1.26 – Схема аэродинамической трубы Т-5



Рисунок 1.27 – Фотография аэродинамической трубы Т-5

Вывод

Описанные в данной главе методы определения ходовых характеристик подводных аппаратов достаточно эффективны, но имеют также и недостатки. Например, при виртуальной продувке и математическом моделировании характеристики получаются приблизительными, это может значительно отразиться на конечном результате. Также эти методы не дают возможности определить зависимость тяговых характеристик движительно-рулевого комплекса от скорости движения аппарата

Испытания в опытовых бассейнах и аэродинамических трубах позволяют получить реальные характеристики аппарата. Такого рода установки не многочисленны в России и сконцентрированы в центральной ее части. Отправка подводных аппаратов для испытаний в научные центры с данными установками занимает большое количество времени. Так же логистика аппаратов, которые могут достигать массы 6 тонн, является весьма дорогостоящей услугой.

2 РАЗРАБОТКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО СТЕНДА

Исходя из тезисов, изложенных в выводе предыдущей главы, в ИПМТ ДВО РАН г. Владивостока начата разработка бюджетного тензометрического стенда, функционал которого позволяет провести измерительные испытания и получить достоверные гидродинамические характеристики подводных аппаратов после их сборки. Разработка стенда требует последовательного решения следующих задач:

- определение требований по назначению и функциональной схеме стенда;
- разработка модели использования стенда;
- выбор измерительных приборов;
- выбор электропривода буксировочной лебедки;
- моделирование работы стенда с учетом выбранной элементной базы.

2.1 Требования по назначению и функциональная схема стенда

В соответствии с целевым назначением стенда были определены требования к его характеристикам. Стенд должен обеспечить:

- движение испытуемого НПА с заданной скоростью $0,1 \div 2$ м/с за счет равномерного изменения длины буксировочного тросика;
- автоматическую и равномерную укладку буксировочного тросика по ширине барабана электрической лебедки ($50 \div 200$ м);
- измерение скорости изменения длины буксировочного троса в диапазоне $0,1 \div 2$ м/с с погрешностью не более $\pm 0,01$ м/с (для калибровки доплеровских измерителей скорости погрешность должна быть не более $\pm 0,002$ м/с);

- измерение натяжения буксировочного троса в диапазоне $0 \div 200$ Н с погрешностью не более $\pm 0,1$ Н;
- измерение напряжения управления электродвигателем буксировочной лебедки в диапазоне ± 30 В с погрешностью не более $\pm 0,1$ В;
- измерение тока, потребляемого электродвигателем буксировочной лебедки, в диапазоне ± 10 А с погрешностью не более $\pm 0,1$ А;
- регистрацию измеренных параметров в виде файла данных с возможностью дальнейшей графоаналитической обработки;
- защиту аппаратуры стенда от воздействия атмосферных осадков и брызг.

В результате анализа требований по назначению был определен состав необходимого оборудования стенда и разработана его функциональная схема, приведенная на рисунке 2.1.

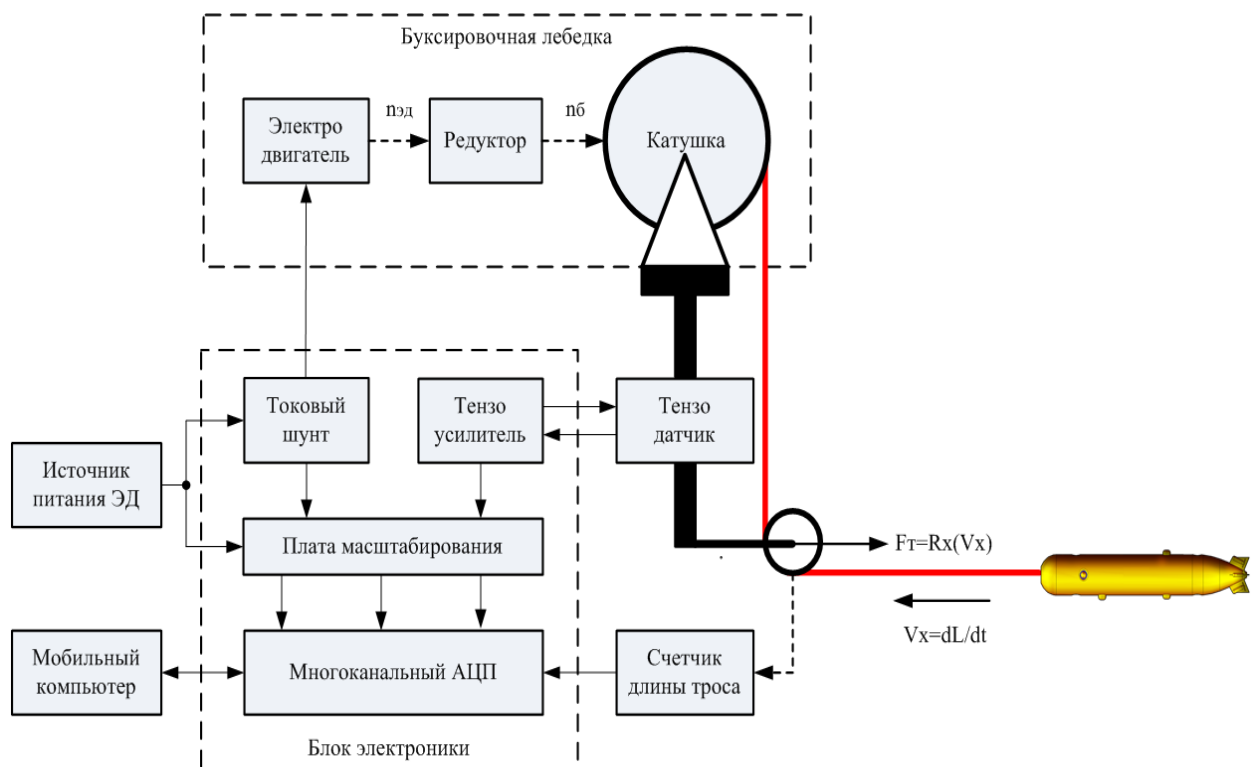


Рисунок 2.1 - Функциональная схема стенда определения гидродинамических и тяговых характеристик НПА

2.2 Модель использования стенда

Состав оборудования стенда позволяет использовать его в трех основных режимах.

Режим 1 – определение зависимости лобового сопротивления НПА от скорости его хода. Режим реализуется в следующей последовательности:

– НПА по поверхности отводится от пирса на необходимую дистанцию, соответствующую таблице 1 (буксировочный тросик свободно выматывается с лебедки);

– после отведения аппарата на требуемую дистанцию оператор устанавливает желаемую скорость изменения длины буксировочного тросика;

– после натяжения тросика НПА освобождается и начинает его буксировка;

– оператор стенда отслеживает по данным счетчика длину троса и выключает источник питания электродвигателя при длине тросика равной тормозному пути аппарата (рисунок 2.2).

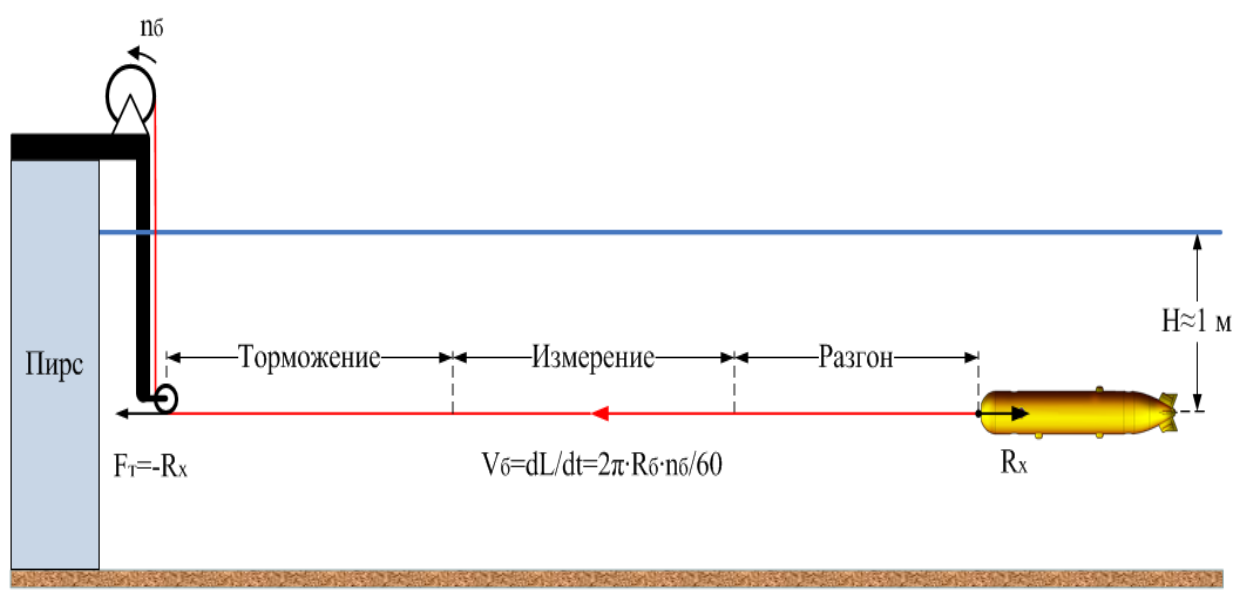


Рисунок 2.2 - Схема проведения эксперимента по определению зависимости лобового сопротивления НПА от скорости его хода

Режим 2 – измерение зависимости тяги маршевых движителей НПА от скорости его движения. Реализацию этого режима иллюстрирует рисунок 2.3.

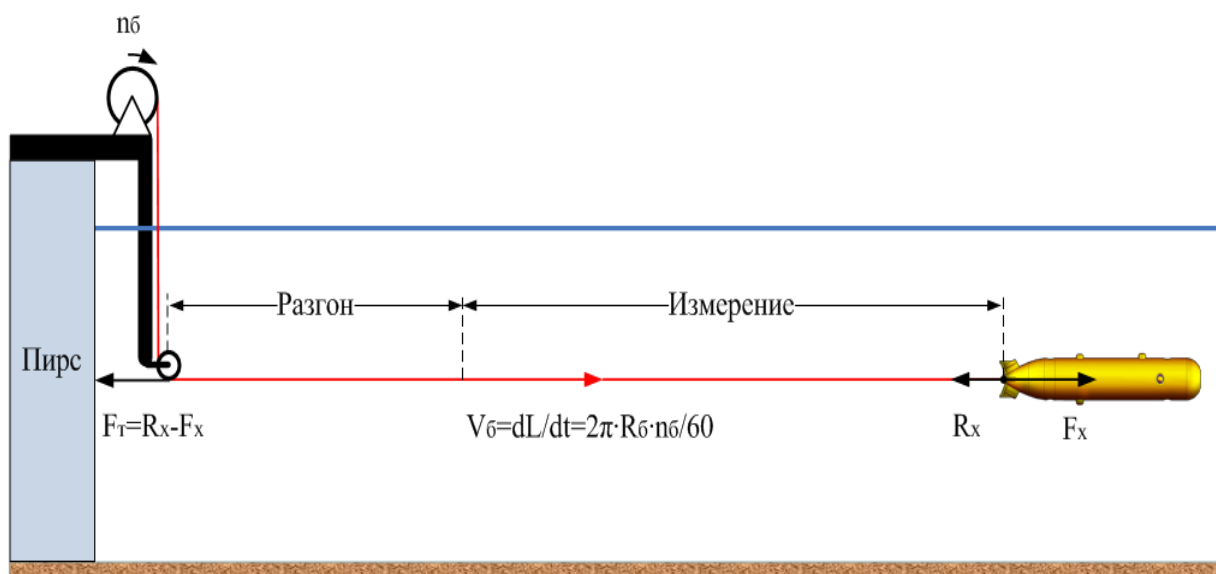


Рисунок 2.3 - Схема проведения эксперимента по измерению тяги маршевых движителей на заданных скоростях хода

Данный режим реализуется следующей последовательностью действий:

- НПА по поверхности отводится от пирса на дистанцию 5÷10 м (буксировочный трос свободно выматывается с барабана лебедки), далее лебедка затормаживается;
- после отведения аппарата оператор через вспомогательный канал связи задает требуемый код управления маршевыми движителями;
- после выхода маршевых движителей на режим буксировочный тросик выматывается с измеряемой скоростью в течение 20-30 сек.

Дальнейшая обработка результатов этого эксперимента позволяет определить значение тяги маршевых движителей при заданной скорости набегающего потока по очевидному соотношению:

$$F_x(V_x) = F_T - R_x(V_x) \quad (2.1)$$

где F_x – суммарная тяга маршевых движителей;

$V_x=dL/dt$ – скорость движения НПА, определяемая увеличением длины буксировочного троса;

F_T – натяжение буксировочного троса;

R_x – лобовое сопротивление НПА, измеренное в режиме 1.

Режим 3 – измерение зависимости тяги вертикальных подруливающих двигателей НПА от скорости хода. Реализацию этого режима иллюстрирует рисунок 2.4.

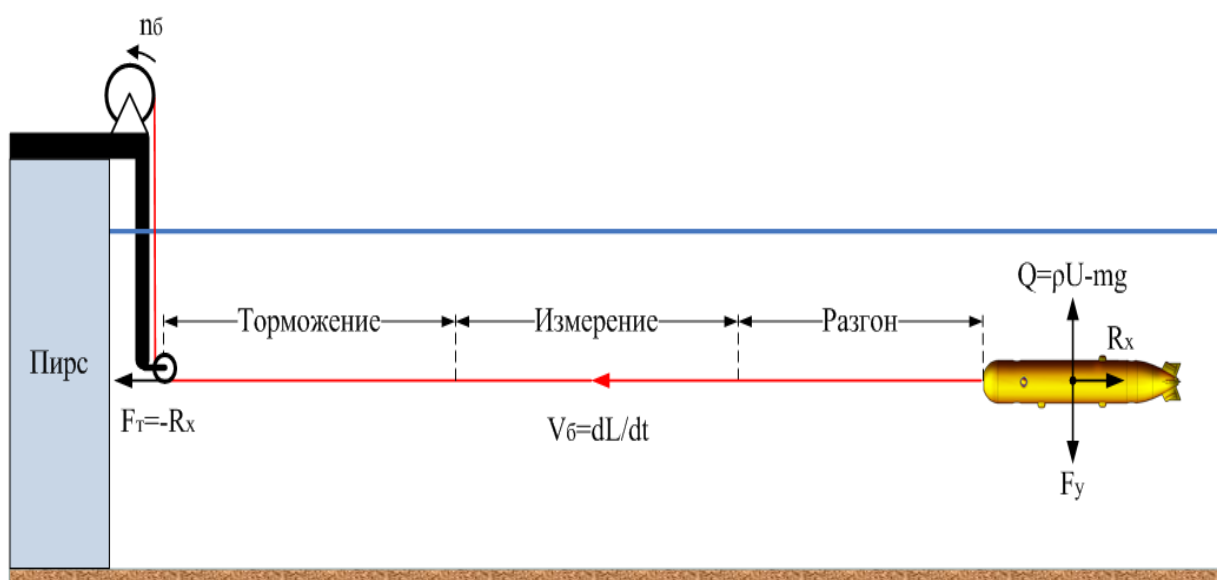


Рисунок 2.4 - Схема проведения эксперимента по измерению тяги вертикальных подруливающих двигателей на заданных скоростях хода

Измеряя коды управления вертикальной тягой при автоматической стабилизации заданной глубины погружения для известных значений остаточной плавучести аппарата и скорости его буксировки можно установить зависимости вертикальной тяги ДРК F_y от скорости хода V_x . Кроме того, сопоставляя измеренное в режимах 1 и 3 натяжение буксировочного троса, можно выявить влияние вертикальной тяги на лобовое сопротивление аппарата $R_x(F_y)$.

2.3 Обоснование выбора измерительного оборудования стенда

2.3.1 Силоизмерительные датчики

Тензодатчик – это силоизмерительный элемент в оборудовании, принцип действия которого основывается на измерении деформации. Тензодатчики используются в бункерных и крановых весах, весовых дозаторах и др. Тензодатчики используются практически во всех современных электронных весоизмерительных системах и системах дозирования.

Тензодатчики обеспечивают высокую точность измерений, устойчивы к воздействию окружающей среды, а современные технологии позволяют добиться систематизации и автоматизации всего процесса измерения, используя оборудование с электронными тензодатчиками [26].

В таблице 2.1 представлены тензодатчики, удовлетворяющие требованиям к характеристикам оборудования стенда.

Таблица 2.1 – Тензодатчики Тензо-М

Модель	Наибольший предел измерений, кг	Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	Класс точности	Комбинированная погрешность, % от РКП	Диапазон температур, град. С	Степень защиты
T24A	200	$2 \pm 10\%$	C3	$\leq \pm 0,02$	-50... +50	IP67
T40A	250	$2 \pm 10\%$	C3	$\leq \pm 0,02$	-50... +50	IP67
T50	500	$2 \pm 10\%$	C3	$\leq \pm 0,02$	-50... +50	IP68
T2-C3	200	$2 \pm 10\%$	C3	$\leq \pm 0,02$	-40... +50	IP68

Для эксплуатации был выбран тензодатчик T2-C3, так как датчик обладает максимальной степенью защиты от влаги и пыли IP68, работает в широком спектре температур, имеет достаточный предел измерений, а также приемлемую стоимость.

Датчик Т2-С3 изображен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Тензодатчик Т2-С3

2.3.2 Датчики скорости буксировки

Скорость буксировки определяется с помощью датчика угла поворота, установленного на катушку с тросом.

Датчик угла поворота - устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические или аналоговые сигналы, позволяющие определить угол его поворота.

Датчики угла поворота подразделяются по способу выдачи информации на:

- накапливающие (инкрементные);
- абсолютные (позиционные).

По принципу действия на:

- оптические;
- резистивные;
- магнитные;
- индуктивные;

– механические.

Датчик выбирался из модельного ряда магнитных энкодеров, так как данный тип устройств хорошо себя зарекомендовал в разных отраслях промышленности и в тяжелых условиях эксплуатации.

В таблице 2.2 представлен модельный ряд датчиков угла поворота.

Таблица 2.2 – Датчики угла поворота

Модель	Разрешение	Цифровой интерфейс	ШИМ кодирование	Аналоговый выход	Счетчик оборотов	Корпус	Температура
AS5140	10-бит	-	-	-	+	SSOP16	-40°C до 125°C
AS5043	10-бит	-	10-бит	+	+	SSOP16	-40°C до 125°C
AS5045	12-бит	SPI	12-бит	+	+	SSOP16	-40°C до 125°C
AS5048A/B	14-бит	SPI / I ² C	12-бит	+	+	TSSOP14	-40°C до 150°C

Для стенда был выбран магнитный энкодер AS5048, так как обладает среди представленных образцов самым высоким разрешением, цифровым интерфейсом для обработки данных и самым широким диапазоном рабочих температур.

На рисунке 2.6 представлена плата с магнитным энкодером AS5048.



Рисунок 2.6 - Плата с магнитным энкодером AS5048

2.3.3 Датчики электрических параметров стенда

Для измерения электрических параметров на практике используют следующие устройства [17]:

- делитель напряжения;
- трансформатор напряжения;
- электронный изолированный датчик;
- измерительный шунт;
- измерительный трансформатор тока;
- датчики тока на эффекте Холла.

2.3.3.1 Делитель напряжения

Делитель напряжения – один из самых простых способов измерения электрических параметров. Напряжение на измерительном приборе будет определяться как входное напряжение $U_{\text{вх}}$, умноженное на коэффициент делителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – напряжение на измерительном приборе;

$U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение;

R_1, R_2 – сопротивление.

Схема делителя напряжения представлена на рисунке 2.7.

Достоинства:

– широкий диапазон напряжений и частот, определяемый номиналами резисторов;

– высокая точность;

– измеряет постоянное и переменное напряжение.

Недостатки:

- отсутствует гальваническая развязка — при взаимодействии с промышленной сетью необходимо предусмотреть защиту пользователя от электрических цепей, либо использовать гальваническую развязку;
- низкий КПД — весь ток делителя уходит в тепло.

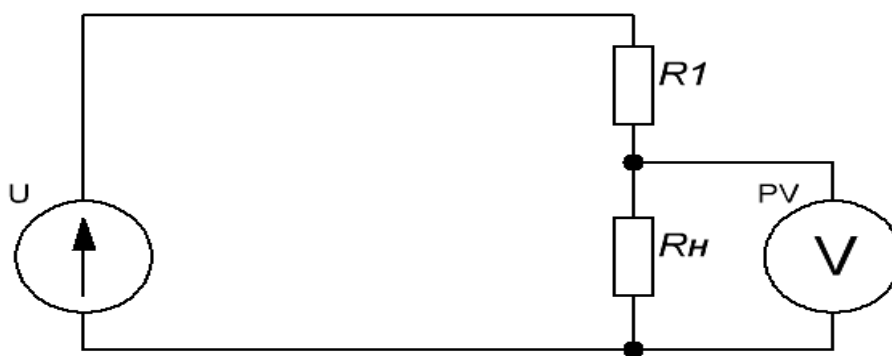


Рисунок 2.7 – Схема делителя напряжения

2.3.3.2 Трансформатор напряжения

Трансформатор напряжения служит для измерения очень высоких напряжений, порядка 6-10 кВт и выше. Данное устройство представляет собой обычным трансформатором, основным режимом работы которого является режим холостого хода. Класс точности трансформатора зависит от рабочего участка характеристики намагничивания.

Схема трансформатора напряжения представлено на рисунке 2.8.

Достоинства:

- огромный диапазон рабочих напряжений — до сотен киловольт и выше;
- столь необходимая гальваническая развязка.

Недостатки:

- работает на определенной полосе частот;
- работает только с переменным напряжением.

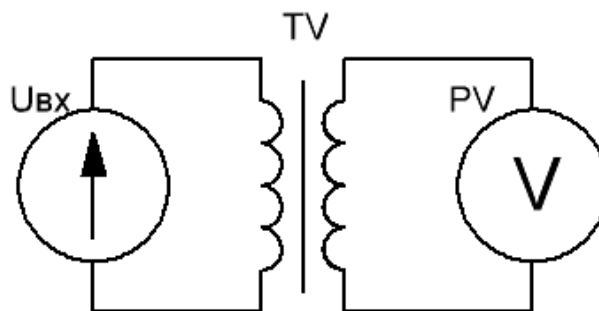


Рисунок 2.8 – Схема трансформатора напряжения

2.3.3.3 Электронный изолированный датчик

Электронный изолированный датчик является завершённым устройством, которое состоит из: делителя напряжения, операционных усилителей, блока гальванической развязки и схемы изолированного питания. Электронный изолированный датчик не имеет недостатков, которые были описаны ранее для делителя напряжения и трансформатора напряжения.

Схема электронного изолированного датчика представлена на рисунке 2.9.

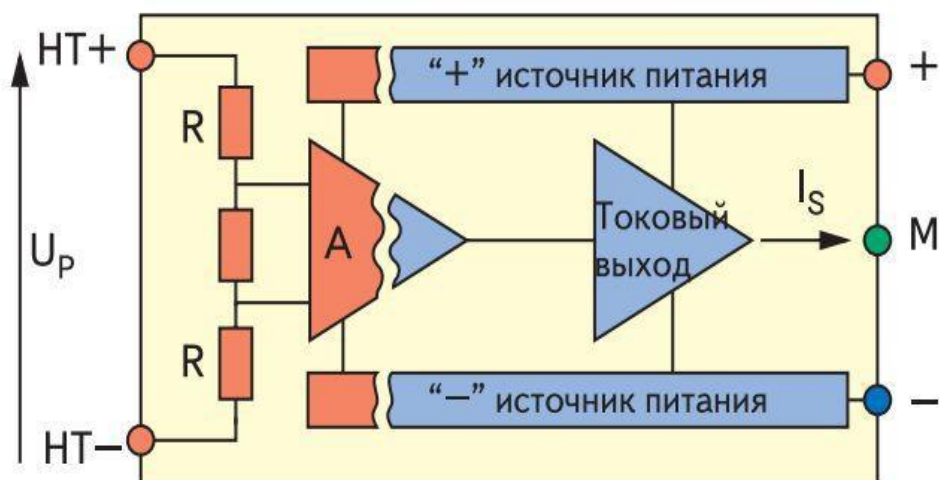


Рисунок 2.9. - Схема электронного изолированного датчика

Достоинства:

- гальваническая развязка;
- высокая точность;
- широкий диапазон напряжений и частот;
- возможность измерять постоянное и переменное напряжение.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- сложная схемотехника.

2.3.3.4 Измерительный шунт

Измерительный шунт один из самых простых и точных способов измерения тока. При протекании тока через активное сопротивление, на нем происходит падение напряжения, пропорциональное измеряемому току:

$$U_{\text{ш}} = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{ш}} \quad (2.3)$$

где $U_{\text{ш}}$ – падение напряжения;

$I_{\text{н}}$ – измеряемый ток;

$R_{\text{ш}}$ – активное сопротивление.

Схема измерительного шунта представлена на рисунке 2.10.

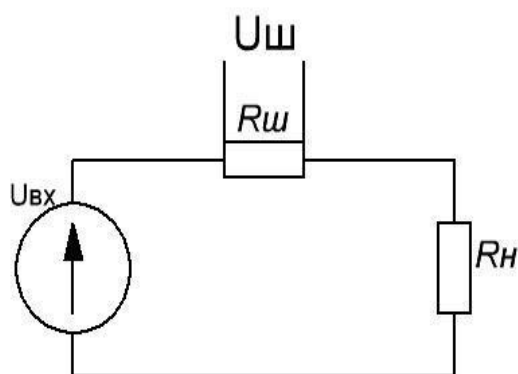


Рисунок 2.10 – Схема измерительного шунта

Достоинства:

- высокая точность;
- широкий диапазон напряжений и частот;
- измеряет постоянный и переменный ток.

Недостатки:

- отсутствует гальваническая развязка;
- низкий КПД.

2.3.3.5 Трансформатор тока

Измерительный трансформатор тока представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого подключается к источнику тока, а вторичная замыкается на измерительные приборы или устройства защитной автоматики. Трансформаторы тока используются для измерения токов в силовых цепях, зачастую с высоким потенциалом.

Схема измерительного трансформатора тока представлена на рисунке 2.11.

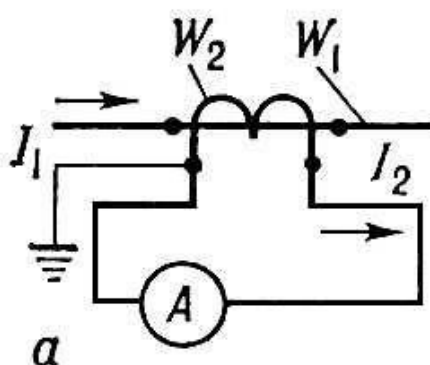


Рисунок 2.11 - Схема измерительного трансформатора тока

Достоинства:

- гальваническая развязка;

– работа с большими токами в тысячи Ампер.

Недостатки:

- измеряет только переменный ток в определенном диапазоне частот;
- изменяет фазу сигнала и требует компенсации.

2.3.3.6 Датчики тока на эффекте Холла

Датчики тока на эффекте Холла служат для измерения электрических параметров цепи, принцип работы которого основан на эффекте возникновения разности потенциалов при помещении проводника с током в магнитном поле.

Схема датчика тока на эффекте Холла представлена на рисунке 2.12.

Достоинства:

- широкий диапазон измеряемых токов с частотой до 50-100кГц и выше;
- измеряет постоянный и переменный ток;
- гальваническая развязка.

Недостатки:

- высокая стоимость.

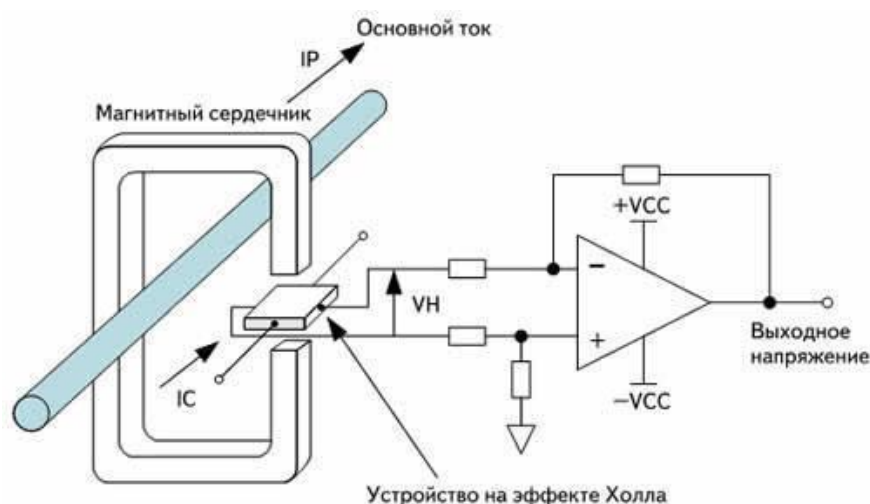


Рисунок 2.12 – Схема датчика тока на эффекте Холла

В качестве датчика измерения электрических параметров стенда был выбран датчик тока на эффекте Холла ACS712ELCTR-30A-T. Данное решение

позволит избежать использования дополнительного оборудования для преобразования сигналов. Технические характеристики датчика приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики ACS712ELCTR-30A-T

Название характеристики	Значение	Единицы измерения
Напряжение питания	8	Вольт
Реверсивное напряжение питания	-0.1	Вольт
Выходное напряжение	8	Вольт
Реверсивное выходное напряжение	-0.1	Вольт
Выходной ток	10	мили Ампер
Предел перегрузки по току	100	Ампер
Номинальная рабочая температура	-40 ... 85	град. С
Максимальная температура	165	град. С
Температура хранения	-65 ... 170	град. С

Датчик тока на эффекте Холла ACS712ELCTR-30A-T представлен на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Датчик тока на эффекте Холла ACS712ELCTR-30A-T

2.4 Выбор программно-аппаратных средств обработки и накопления данных

Обработка и накопление данных осуществляется с помощью платы сбора данных. Плата сбора данных - измерительный модуль, встраиваемые непосред-

ственно в компьютер, который функционирует в совокупности со специализированной измерительной интегрированной программной оболочкой для сбора, обработки и визуального представления измерительной информации.

Модули сбора и обработки данных являются многоканальными приборами с аналоговыми и цифровыми входами и выходами и предназначены для решения задач измерения и управления.

Модули сбора и обработки данных могут подключаться к компьютеру по различным интерфейсам или работать в автономном режиме, что позволяет применять их для решения широкого круга задач от мониторинга параметров технологических процессов до стендовых и полевых испытаний.

В настоящее время на рынке представлены измерительные комплексы следующих компаний:

- National Instruments (LABView, DIAdem);
- Measurement Computing (DASYLab);
- ZETLab.

Для тензометрического стенда была выбрана продукция от компании ZETLab, так как широкий ассортимент позволяет подобрать оборудование и программное обеспечение, удовлетворяющее всем требованиям. Данная компания является отечественной, следовательно, оборудование дешевле и доступнее зарубежных аналогов. Также продукция ZETLab хорошо себя зарекомендовала в науке и многих отраслях производства.

2.4.1 Выбор тензометрического усилителя

Предварительные усилители предназначены для усиления и передачи на измерительный прибор сигналов, поступающих с пассивных и активных датчиков, с возможностью питания подключаемых датчиков постоянным и переменным напряжением и от источника тока.

Предварительные усилители используются в качестве усилителей сигналов в системах обработки и управления различными устройствами и исполни-

тельными механизмами. Применяются в промышленности, лабораторных и мобильных исследованиях. К усилителям можно подключать как пассивные (резистивные) датчики (измеряющие относительные деформации, крутящие и изгибающие моменты, силы и другие параметры), так и датчики на интегральных микросхемах (миниатюрные акселерометры, датчики магнитного и электрического полей и т.д.).

В качестве предварительного усилителя для тензометрического стенда был выбран ZET 411, технические характеристики которого приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики предварительного усилителя ZET 411

Параметр	Значение
Количество входных каналов	2 дифференциальных
Частотный диапазон при КУ = 1, 10, 100, кГц	до 80
Частотный диапазон при КУ = 1000, кГц	до 18
Максимальная скорость нарастания выходного сигнала, В/мкс	1,2
Максимальное входное напряжение, В	±10
Входное сопротивление, кОм	100
Входной ток, нА	3
Входная емкость, пФ	7
Межканальное проникновение, дБ	- 72
Коэффициент усиления	1, 10, 100, 1000
Количество выходных каналов	2
Выходное напряжение, В	± 7
Выходной ток, мА	до 10
Собственная потребляемая мощность, Вт	2
Тип разъема входа/выхода (ответные части входят в комплект)	DB15M (вход) / DB9M (выход)

Уникальность усилителя ZET 411 заключается в том, что к нему можно подключать практически все известные типы первичных преобразователей физических величин в электрические. Питание усилителя осуществляется от шины USB персонального компьютера или от внешнего источника питания +5 В, что делает его универсальным средством при построении компьютерных систем измерений с использованием модулей АЦП и ЦАП.

Изображение предварительного усилителя ZET 411 представлено на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Предварительный усилитель ZET 411

2.4.2 Выбор многоканального аналого-цифрового преобразователя

Модули многоканальных аналого-цифровых преобразователей предназначены главным образом для измерений сигналов с различных первичных преобразователей и их обработки. Модули имеют разную разрядность аналого-цифрового (АЦП) и цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей и диапазоны частот, что позволяет найти оптимальное решение для поставленной задачи. Цифровые и аналоговые выходы модулей могут использоваться в цепях управления различными исполнительными механизмами. Модули АЦП/ЦАП могут функционировать автономно (без подключения к ПК) и вести запись сигналов на энергонезависимый накопитель.

Программное обеспечение ZETLab, поставляемое с данными модулями, позволяет приступить к процессу измерения и управления сразу после подключения модуля к персональному компьютеру. В него уже входят все необходимые программы для проведения испытаний и измерений по нескольким вы-

бренным измерительным каналам, контроль измеряемых величин, вывод текущих измеряемых параметров на монитор ПК.

Для тензометрического стенда был выбран модуль ZET 210, характеристики которого приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – технические характеристики модуля ZET 210

Параметр	Значение
Интерфейс	USB 2.0
Питание, В	220 - 5
Аналоговый вход (АЦП)	
Количество аналоговых входов	16 синфазных, 8 дифференциальных
Количество разрядов АЦП	16
Максимальная неравномерность АЧХ, дБ	± 1 (10 Гц ... 200 кГц)
Диапазон измеряемых напряжений, В	± 7
Динамический диапазон, дБ	84
Входное сопротивление, кОм	2
Аналоговый выход (ЦАП)	
Количество аналоговых входов	2 синфазных, 1 балансный
Количество разрядов АЦП	16
Частота входного напряжения, В	$\pm 2,5$
Цифровой вход/выход	
Количество линий, бит	14
Тип логики, В	TTL 3,3

Модуль ZET 210 представлен на рисунке 2.15



Рисунок 2.15 – Модуль ZET 210

2.5 Обоснование выбора электропривода станда

Электрический привод, сокращенно электропривод - электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними электрическими, механическими, управляющими и информационными системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса [27].

Обобщенная функциональная схема электропривода представлена на рисунке 2.16, где:

- ЭП - электрический преобразователь;
- ИУ - информационное устройство;
- ЭМП - электромеханический преобразователь (электродвигатель);
- МП - механический преобразователь (редуктор);
- ИО - исполнительный орган (барaban).

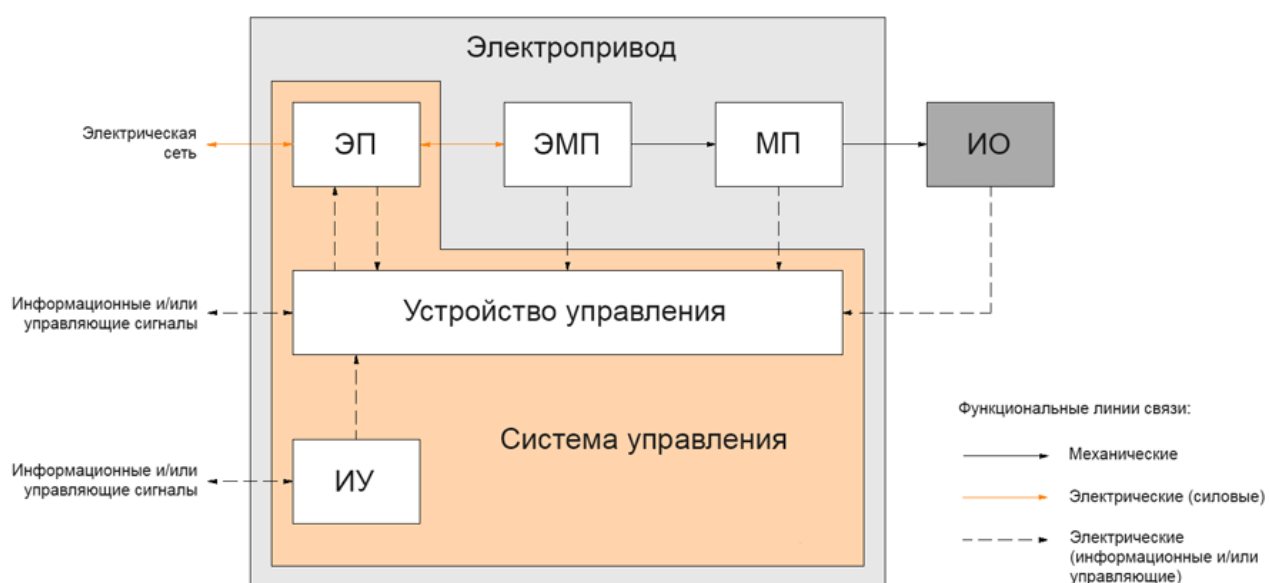


Рисунок 2.16 – Функциональная схема электропривода

2.5.1 Моделирование разгона и торможения ПА

Для расчета требований к электроприводу и оценки необходимого запаса буксировочного троса использовалась модель динамики продольного движения ПА при близкой к нулю плавучести (см. рисунок 2.17), соответствующая уравнению:

$$(m + \lambda_{11}) \cdot \dot{V}_x + 0,5C_x \rho V_x^2 U^{\frac{2}{3}} = F_T \quad (2.4)$$

$$K_{гдс} = 0,5C_x \rho V_x^2 U^{\frac{2}{3}} \quad (2.5)$$

где: $(m + \lambda_{11})$ – масса аппарат с учетом присоединенной;

V_x – скорость хода ПА;

$K_{гдс}$ – обобщенный коэффициент сопротивления;

C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления;

ρ – плотность морской воды;

U – водоизмещение НПА;

F_m – сила натяжения троса.

В данной модели была произведена симуляция разгона и торможения ряда НПА, разработанных в ИМТП. Результаты расчета режимов испытания НПА для скорости хода 1 м/с представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Расчет режимов испытания НПА

Тип НПА	$(m + \lambda_{11})$, кг	U , м ³	C_x	F_T , Н (на 1 м/с)	Путь разгона, м (до 0,99 м/с)	Путь измерения, м ($T_D=10$ с)	Тормозной путь, м (до 0.01 м/с)	Запас троса, м	Время разгона, сек	Время торможения, сек
ТНПА "Чилим"	33,8	0,030	0,10	4,9	13	10	31	54	18	680
АНПА "Монитор"	95,8	0,085	0,10	9,9	20	10	45	75	26	950
АНПА "Платформа"	281,9	0,250	0,10	20,3	30	10	64	104	37	1370
АНПА "К-1Р"	2818,8	2,500	0,10	94,4	59	10	137	206	79	2900
ТНПА "Галтель"	208,6	0,185	1,00	166,4	3	10	6	19	4	122

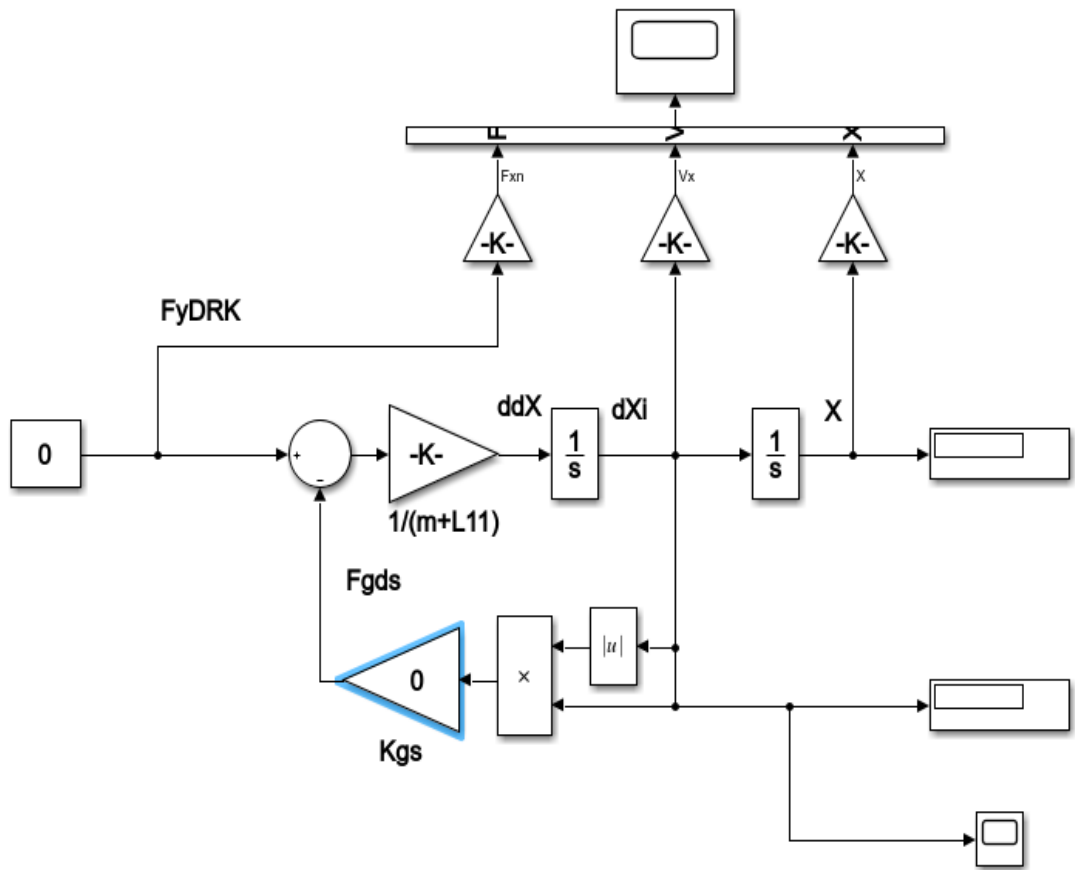


Рисунок 2.17 – Модель динамики продольного движения НПА

Графики, отображающие процессы разгона и торможения ПА представлены на рисунках 2.18 – 2.27

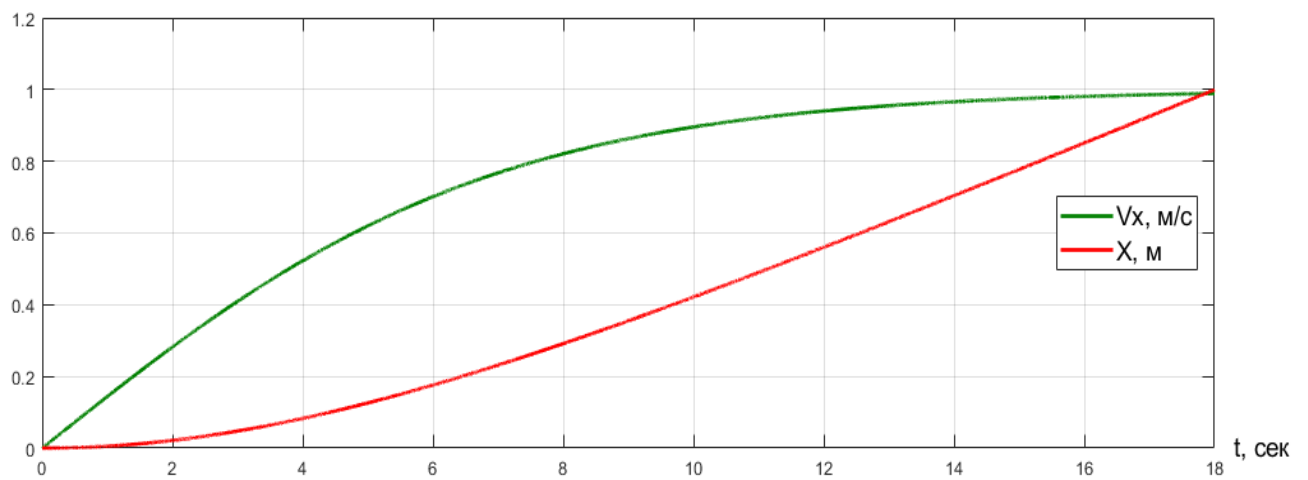


Рисунок 2.18 – График разгона НПА «Чилим»

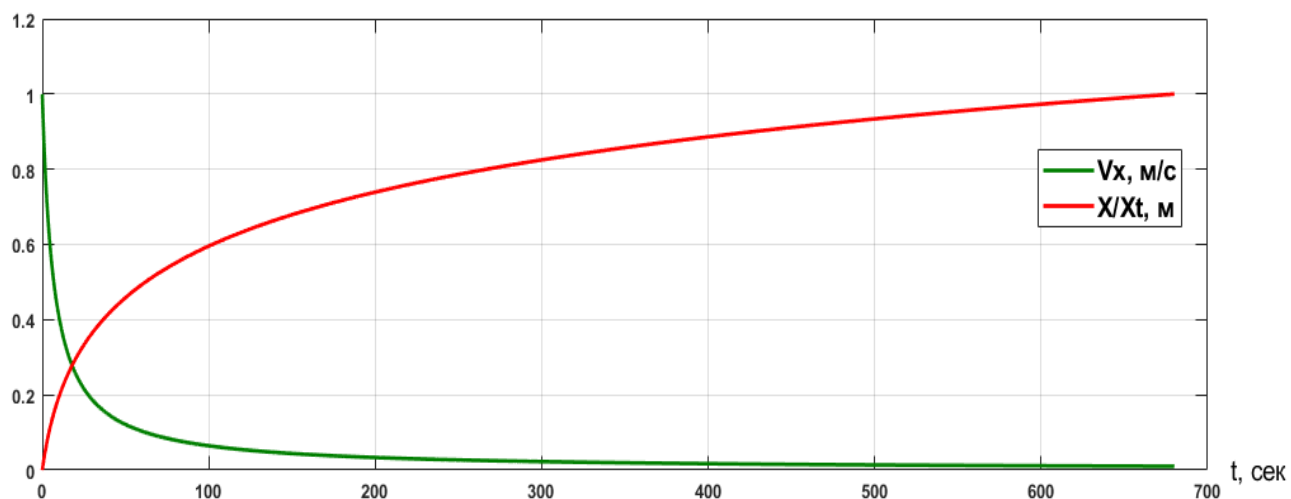


Рисунок 2.19 – График торможения НПА «Чилим»

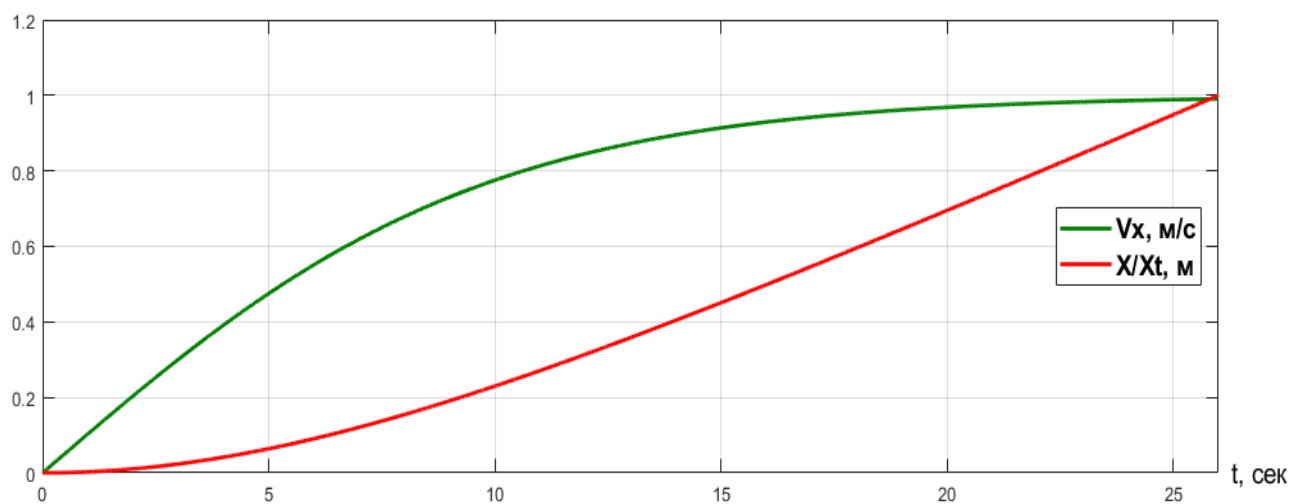


Рисунок 2.20 – График разгона НПА «Монитор»

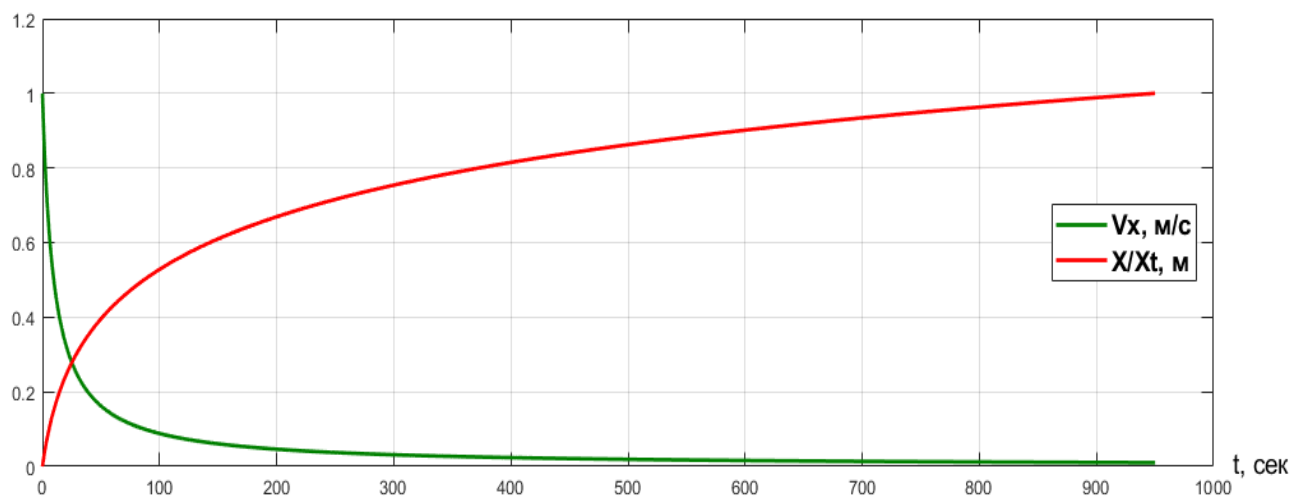


Рисунок 2.21 – График торможения НПА «Монитор»

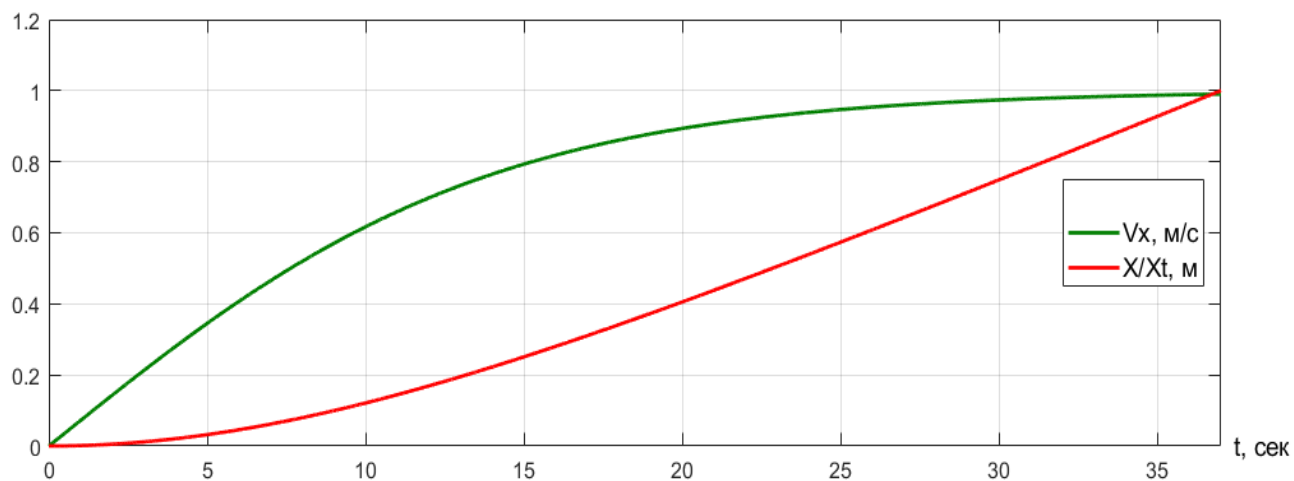


Рисунок 2.22 – График разгона НПА «Платформа»

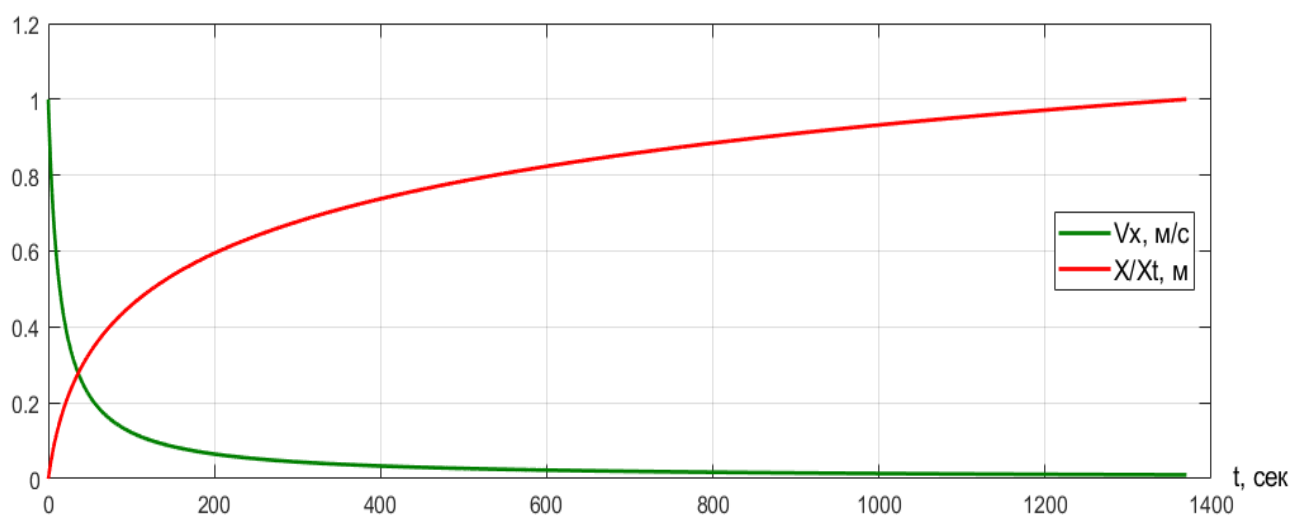


Рисунок 2.23 – График торможения НПА «Платформа»

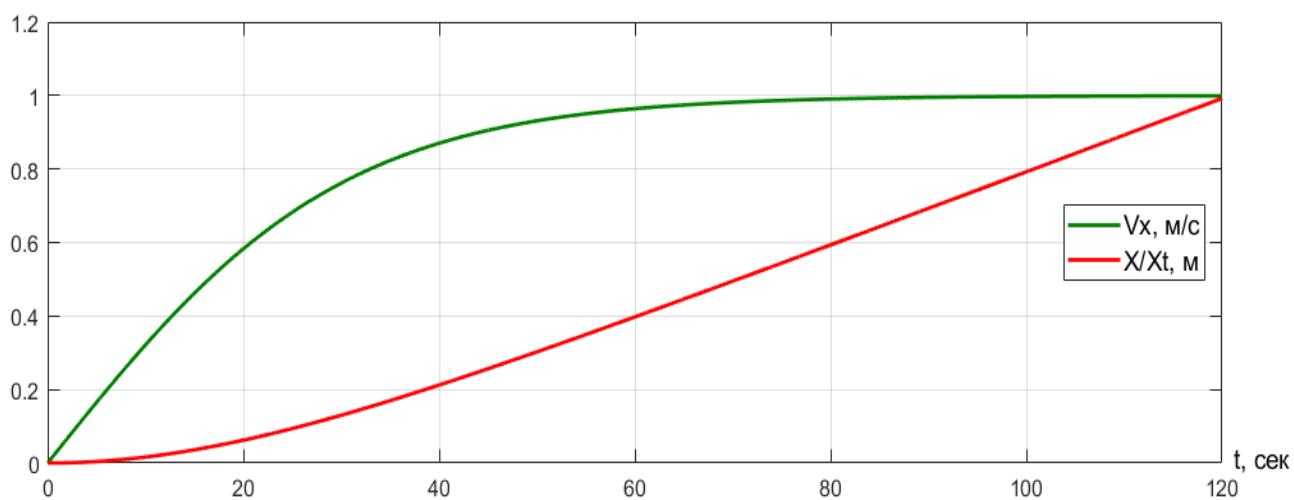


Рисунок 2.24 – График разгона НПА «К-1Р»

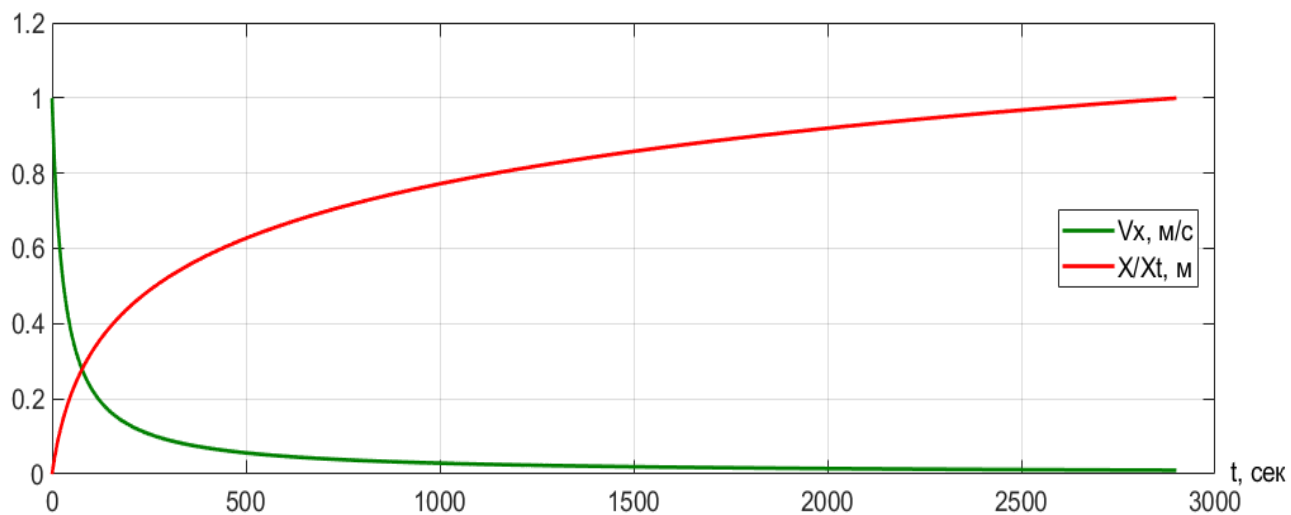


Рисунок 2.25 – График торможения НПА «К-1Р»

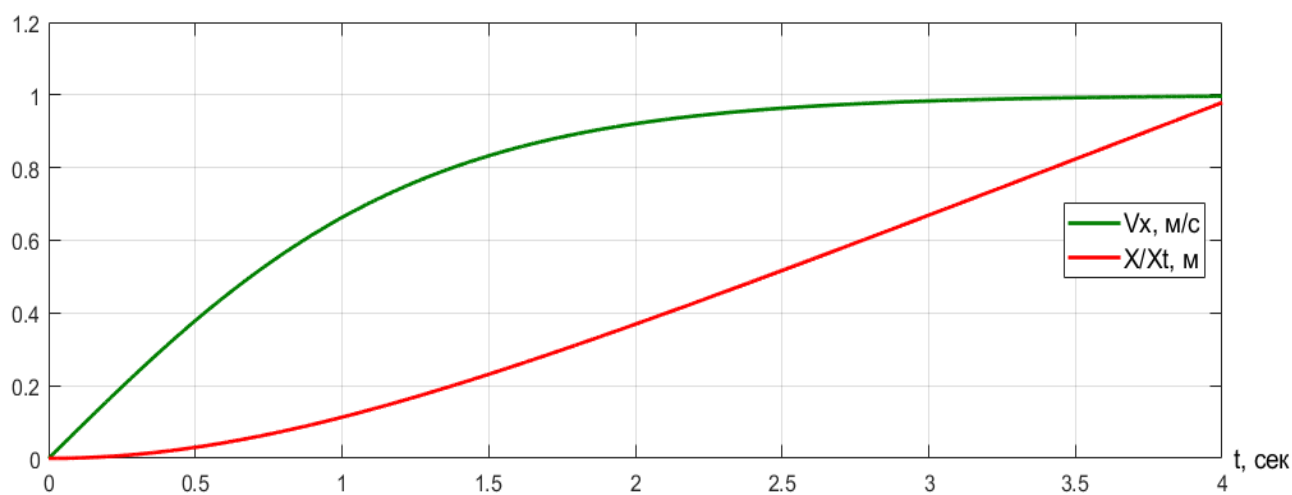


Рисунок 2.26 – График разгона НПА «Галтель»

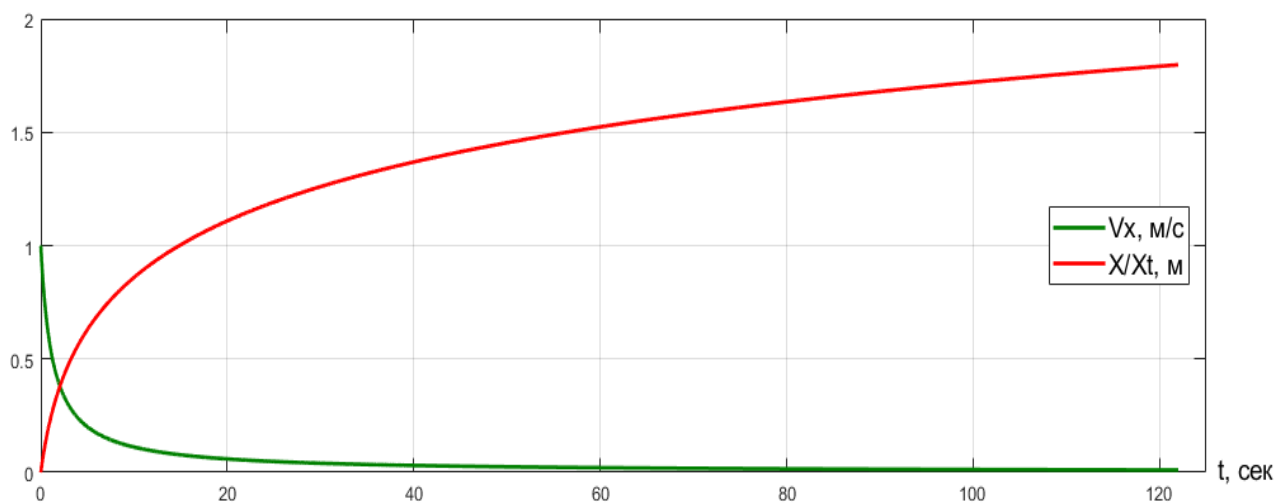


Рисунок 2.27 – График торможения НПА «Галтель»

2.5.2 Расчет параметров буксировочной лебедки

Задача этого расчета состоит в определении значений крутящего момента и частоты вращения приводного электродвигателя, обеспечивающих необходимую скорость движения НПА V_x и натяжение буксировочной линии F_T , в соответствии с функциональной схемой стенда:

$$V_x = \frac{dL}{dt} = \frac{2\pi R_\delta n_{эд}}{60 i_p} \quad (2.6)$$

$$F_m = \frac{M_{эд} i_p \eta_p}{R_\delta} \quad (2.7)$$

где: L – длина буксировочной линии, определяемая счетчиком стенда;

R_δ – радиус барабана буксировочной лебедки, м;

$n_{эд}$ – частота вращения вала приводного электродвигателя, об/мин;

i_p – передаточное отношение редуктора;

$M_{эд}$ – крутящий момент электродвигателя;

η_p – КПД редуктора.

2.5.3 Выбор электродвигателя буксировочной лебедки

На рисунке 2.28 приведены графики, поясняющие достижимые параметры буксировки при использовании коллекторного электродвигателя ДПУ87-75-1-23 ($M_H=0,7$ Н·м, $n_H=1000$ об/мин, $I_H=4,5$ А), редуктора ($i_p=8$, $\eta_p=0,9$) и барабана с $R_\delta=0,075$ м. При этом использовано семейство экспериментальных механических характеристик двигателя для $U_{инп}=12, 15, 18, 21, 24, 27, 30$ В, полученных в ходе нагрузочных испытаний.

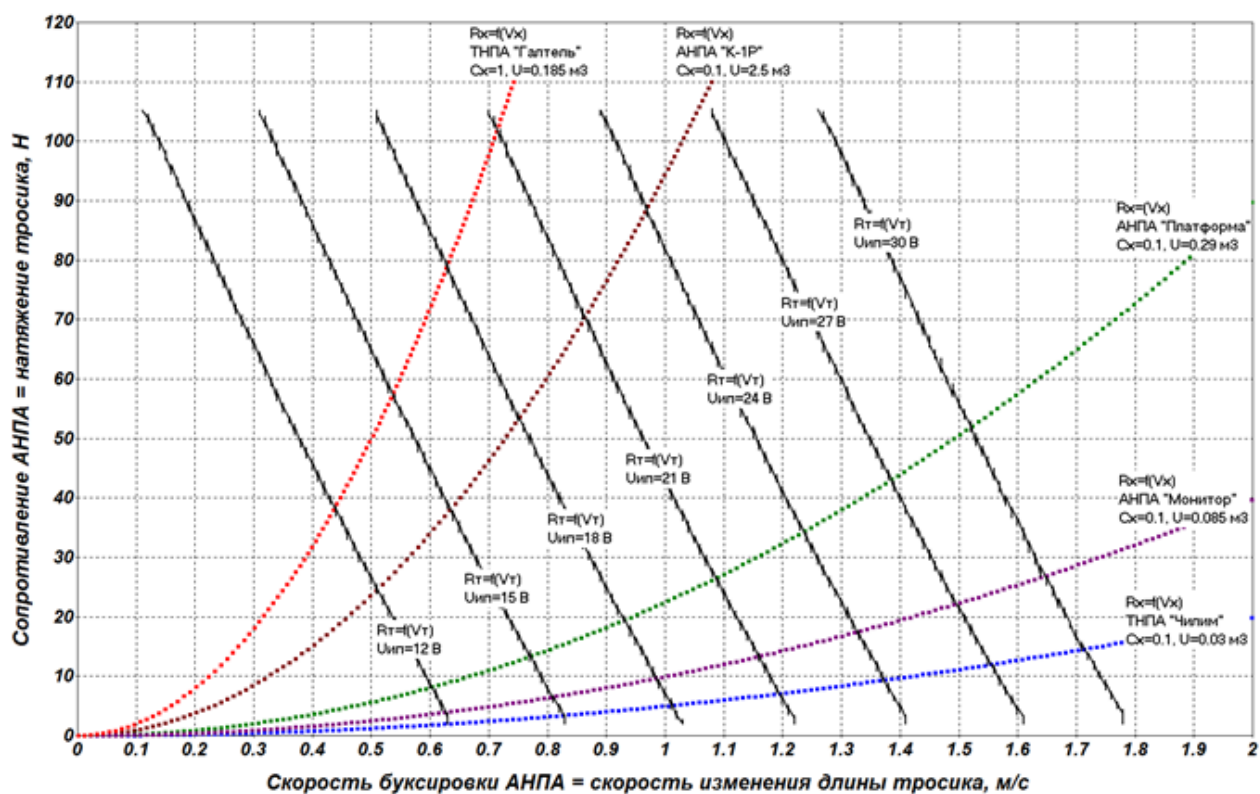


Рисунок 2.28 – Достижимые скорости буксировки НПА с электроприводом от ДПУ87-75-1-

23

Изображение электродвигателя ДПУ87-75-1-23 представлено на рисунке 2.29, технические характеристики электродвигателя приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Технические характеристики электродвигателя ДПУ87-75-1-23

Обозначение	Исполнение	Диаметр корпуса, мм	Мощность, Вт	Напряжение питания, В	Частота вращения, об/мин	Момент, Н·м	Ток, А	Длина (L), мм	Масса, кг
ДПУ87-75-1-23	Д00	87	75±3	23	1000	0,7	5,0	133	2,7
	Д09							166	3,3



Рисунок 2.29 – Электродвигатель ДПУ87-75-1-23

2.6 Разработка конструктивного облика стенда

С учетом характеристик выбранного оборудования для тензометрического стенда и условий его расположения был разработан его конструктивный облик, представленный на рисунках 2.30, 2.31.

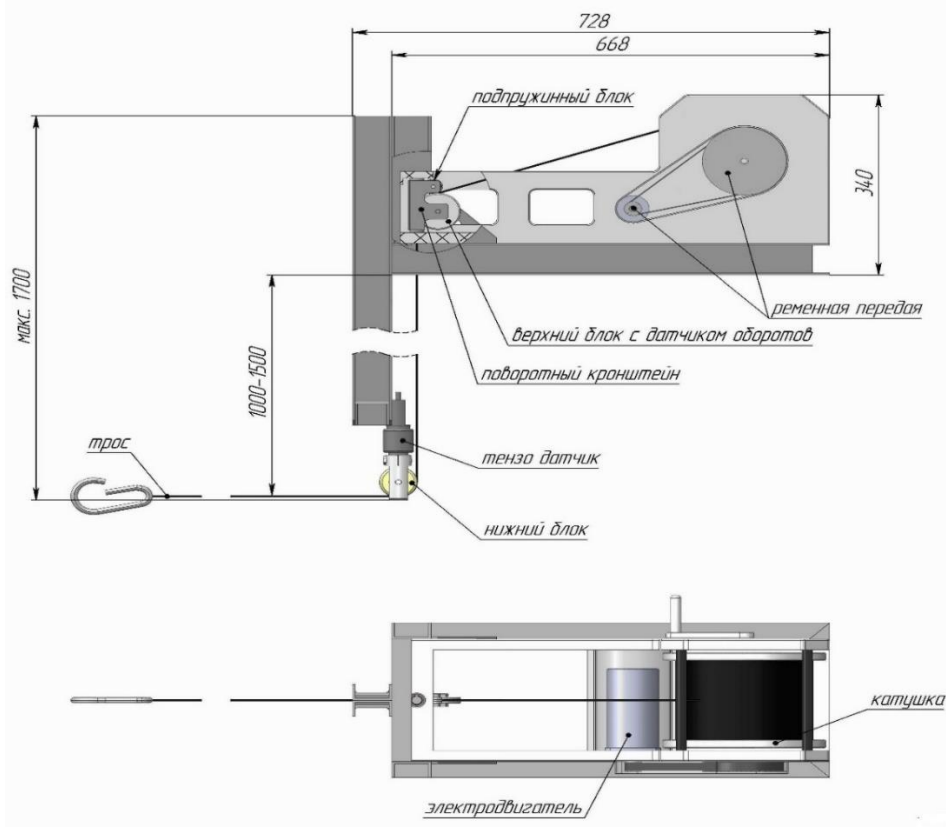


Рисунок 2.30 – Тензометрический стенд (вид сбоку и сверху)

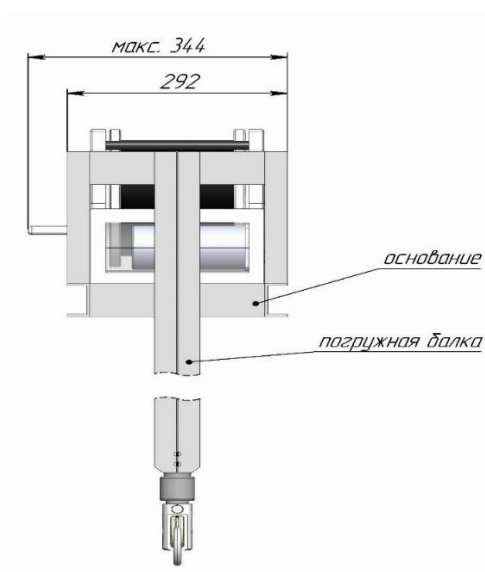


Рисунок 2.31 – Тензометрический стенд (вид сзади)

Вывод

В данной главе определены требования по назначению стенда, на основании которых проведен выбор его элементной базы. В результате анализа динамики разгона и торможения широкого класса НПА разработки ИПМТ определены требования к электроприводу лебедки и необходимая длина буксировочной линии. Проведен выбор оборудования программно-аппаратного обеспечения стенда, разработан его конструктивный облик.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО СТЕНДА

3.1 Испытания электродвигателя на нагрузочном стенде Magtrol

Для уточнения параметров математической модели тензометрического стенда были проведены испытания электродвигателя ДПУ87-75-1-23 на нагрузочном стенде ИПМТ с современным оборудованием «Magtrol», в составе:

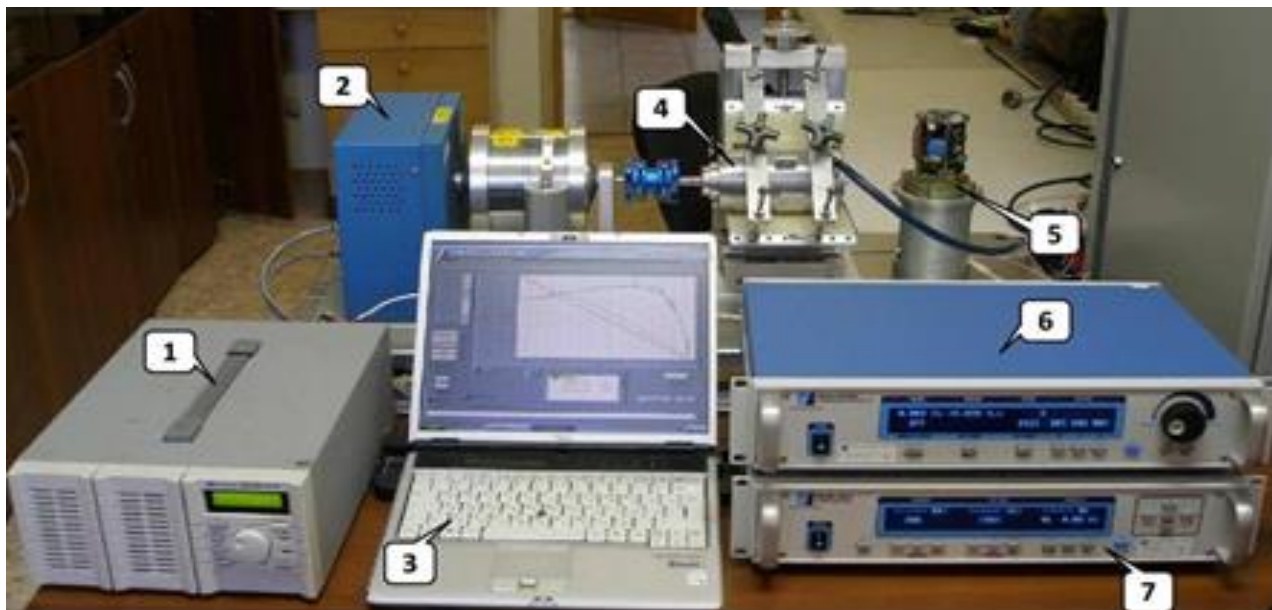
- гистерезисный динамометр-тормоз HD-705-8NA-014 (погрешность $\pm 0,25$ % от полной шкалы, максимальный крутящий момент 6,5 Н•м, максимальная мощность 1,4 кВт, максимальная частота вращения 5000 об/мин.);

- высокоскоростной программируемый контроллер DSP6001 (встроенная аварийная сигнализация, 120 измерений в секунду, управление по скорости и моменту, программируемый цифровой ПИД-регулятор, встроенный цифровой фильтр);

- трехфазный анализатор мощности 6530 (напряжение до 600 В, ток до 20 А, точность до 0,1%, полоса пропускания до 100 кГц, усреднение и фиксирование максимумов измеряемых параметров, возможность подключения внешних измерительных шунтов);

- ПО диагностирования двигателей “M-TEST 5.0” (простое управление, регистрация и сохранение данных, построение графиков, ручное испытание и испытание "годен/не годен", полная совместимость с LabVIEW. Данные, собранные программой, могут быть сохранены, отображены и распечатаны в табличном или графическом формате, и легко перенесены в электронные таблицы).

Функциональная схема нагрузочного стенда и его фотография приведены на рисунках 3.1 и 3.2. Результаты испытаний представлены на рисунках 3.3 - 3.5.



1 – блок питания PSH 6018; 2 – гистерезисный динамометр-тормоз HD-705-8NA-014; 3 – управляющий компьютер с программным обеспечением “M-TEST5.0”; 4 – испытуемый ГЭП в устройстве крепления; 5 – блок управления двигателем; 6 – контроллер динамометра DSP6001; 7 – анализатор мощности 6530.

Рисунок 3.1 - Стенд для нагрузочных испытаний

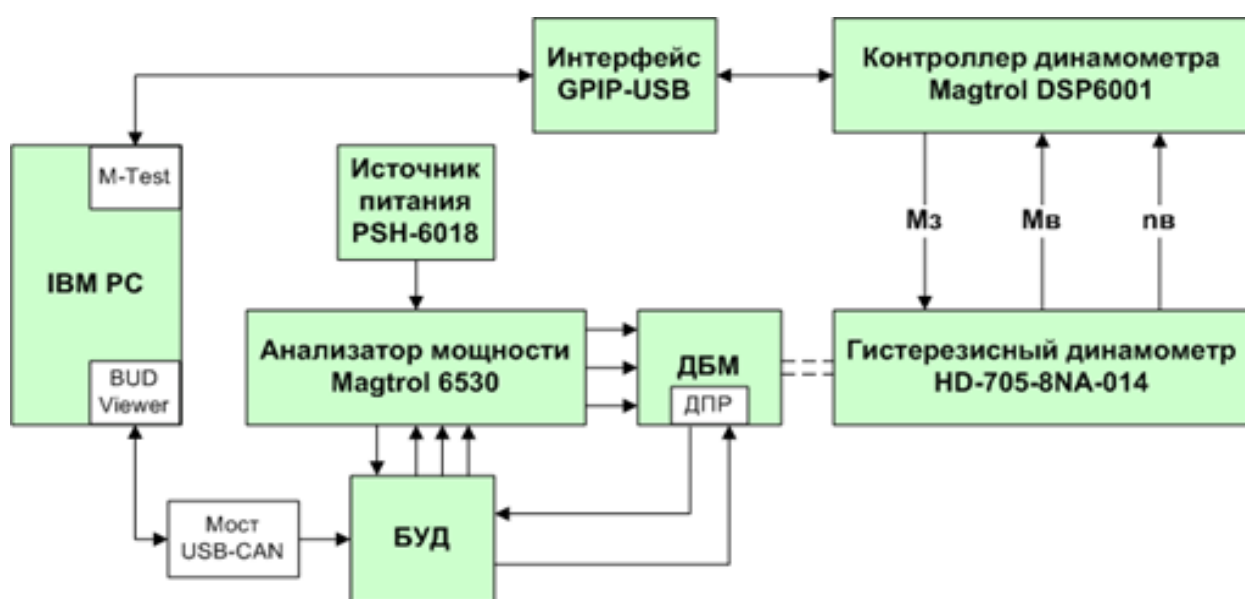


Рисунок 3.2 - Функциональная схема стенда для нагрузочных испытаний на базе оборудования «Magtrol»

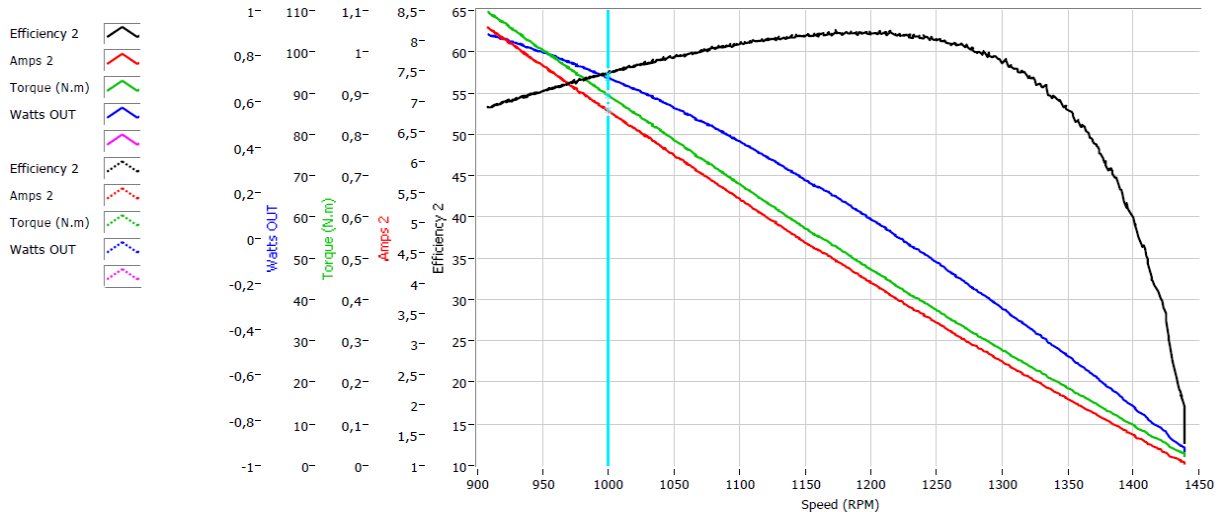


Рисунок 3.3 – График характеристик, полученных при $U_{я}= 24 \text{ В}$

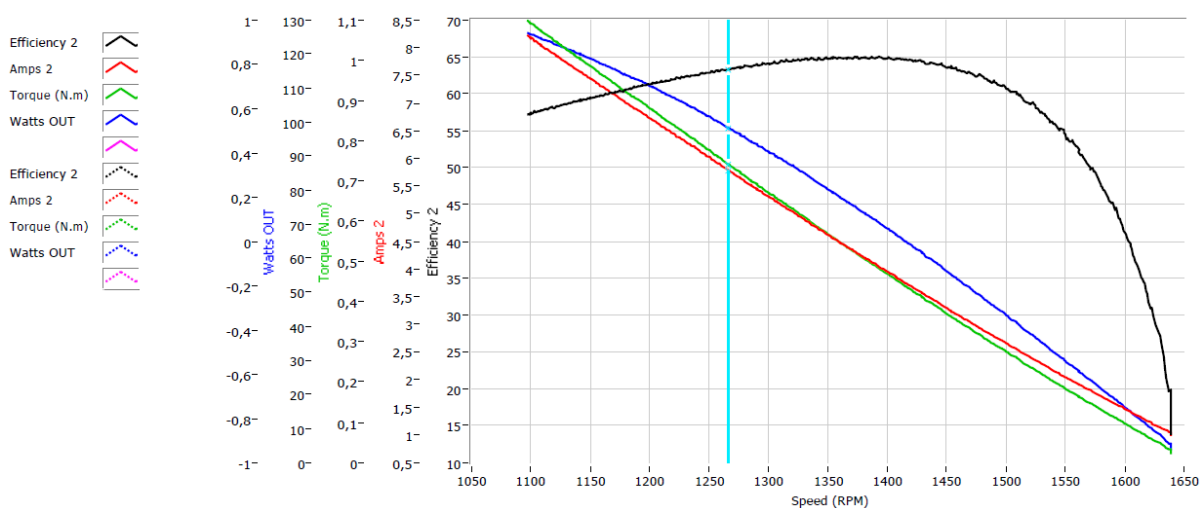


Рисунок 3.4 - График характеристик, полученных при $U_{я}= 24 \text{ В}$

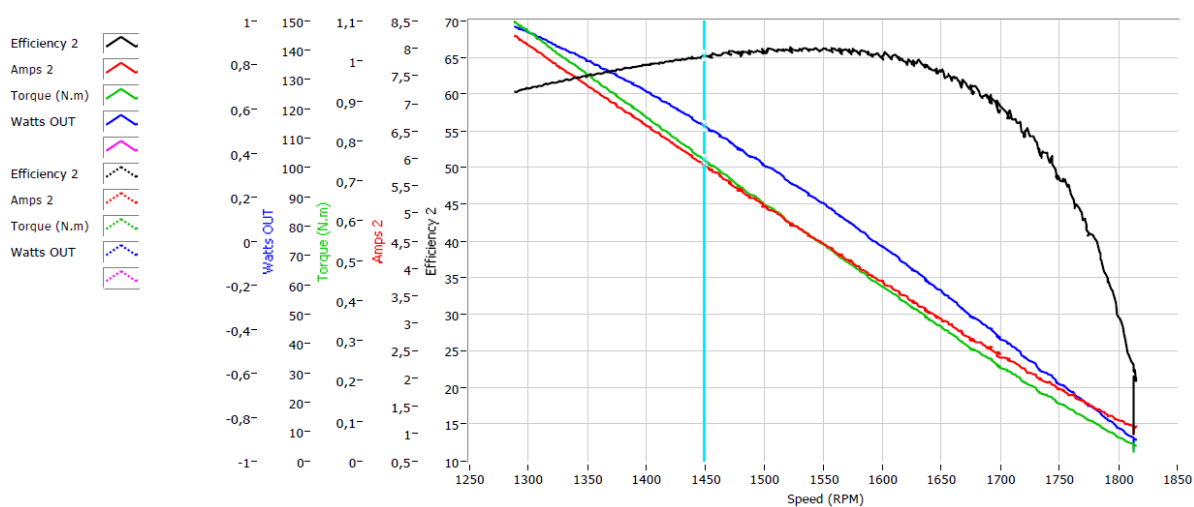


Рисунок 3.5 - График характеристик, полученных при $U_{я}= 24 \text{ В}$

3.2 Разработка математической модели стенда

На основании полученных данных при испытаниях электродвигателя ДПУ87-75-1-23 на нагрузочном стенде, была составлена математическая модель тензометрического стенда:

$$\begin{cases} E_{я} = \omega_p \cdot i_p \cdot C_{\omega} \\ M_p = U_{я} \cdot \frac{1/R_{я}}{T_{эм} \cdot S + 1} \cdot C_M \cdot i_p \cdot \eta_p \cdot (U_{я} - E_{я}) \\ M_T = R_{\delta} \cdot (K_{гдс} \cdot V_x |V_x| + (m_a + \lambda_{11}) \cdot \dot{V}_x) \\ \dot{\omega}_p = \frac{M_p - M_T}{J_{\Sigma}} \end{cases} \quad (2.8)$$

где $E_{я}$ – ЭДС самоиндукции якорной обмотки двигателя, В;

M_p – крутящий момент на валу барабана лебедки, Н·м;

M_T – момент нагрузки на валу барабана лебедки, Н·м;

ω_p – частота вращения барабана лебедки, 1/сек;

$dL/dt = Vx = \omega_p R_{\delta}$ – скорость изменения длины тросика (скорость буксировки ПА), м.с.

Функциональная схема моделирования тензометрического стенда представлена на рисунке 3.6.

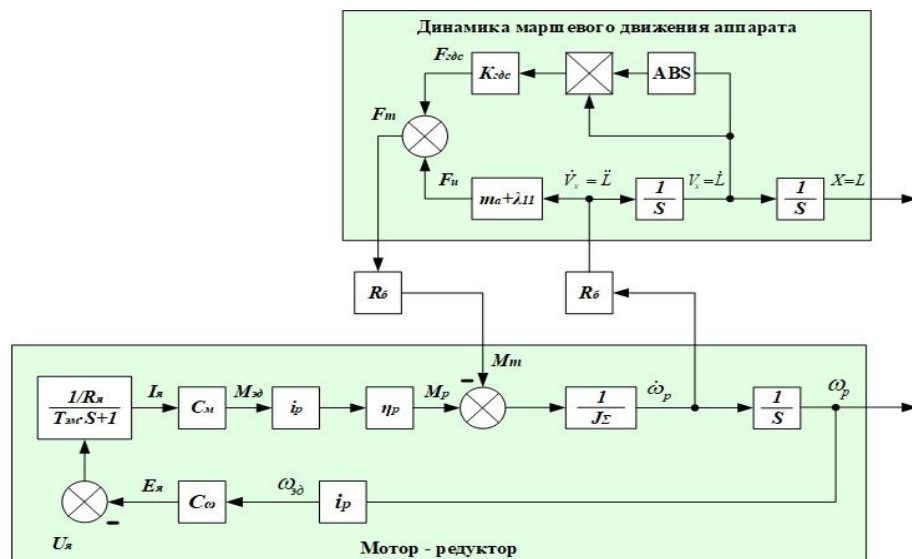


Рисунок 3.6 – Функциональная схема модели тензометрического стенда

3.3 Моделирование работы стенда в режиме определения лобового сопротивления ПА

На основании математической модели и функциональной схемы была реализована аналогичная схема в программном обеспечении Matlab (рисунок 3.7) для определения лобового сопротивления ПА. На данной модели были проанализированы процессы разгона и последующей буксировки следующих НПА: ТНПА «Чилим», ТНПА «Монитор», АНПА «Платформа», АНПА «К-1Р» и ТНПА «Галтель».

В ходе эксперимента было необходимо разогнать каждый НПА до установившейся скорости 1 м/с. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.8 – 3.12.

Так же было проведено моделирование движения всех НПА при различных напряжениях якоря электродвигателя буксировочной лебедки (от 10 до 30 Вольт). Результаты представлены в таблицах 3.1 – 3.5. На основании таблиц 3.1 – 3.5 были построены графики зависимости скорости буксировки НПА от напряжения якоря. Графики представлены на рисунках 3.13 – 3.18.

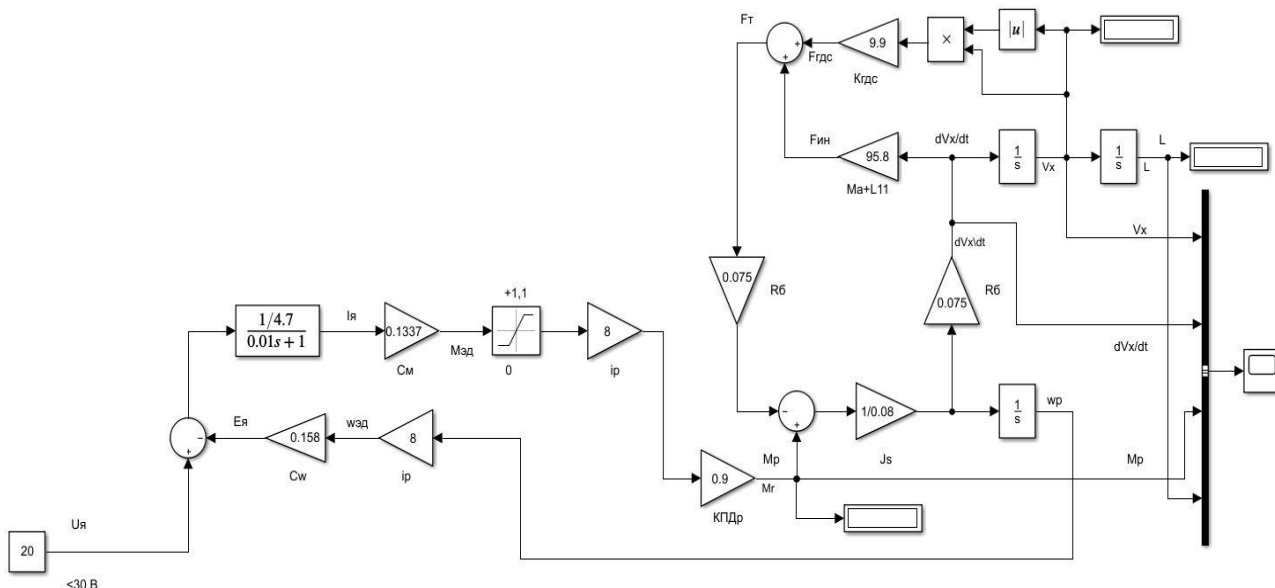


Рисунок 3.7 – Модель тензометрического стенда в программном обеспечении Simulink пакета программ Matlab

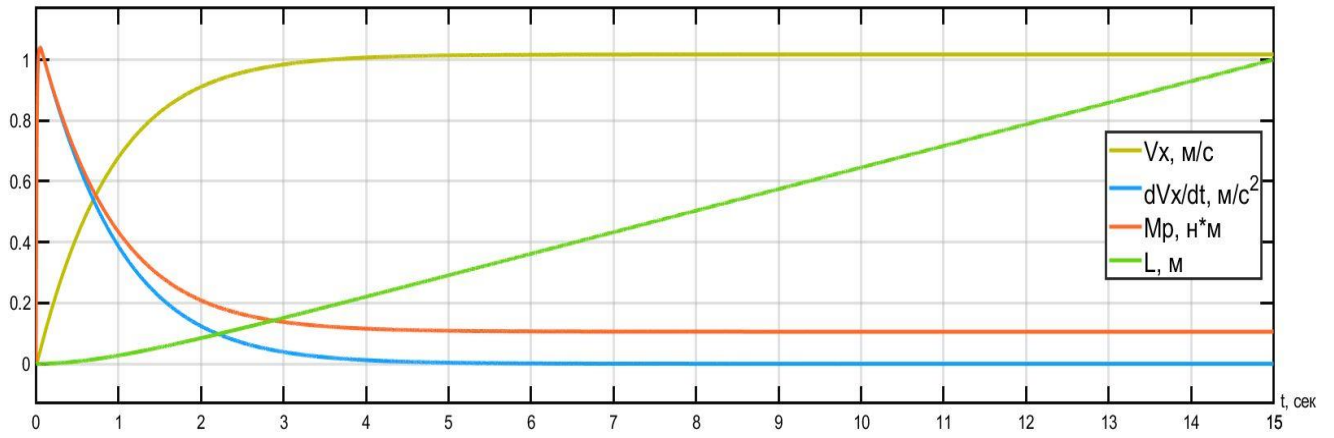


Рисунок 3.8 – График моделирования разгона НПА «Чилим» до скорости 1 м/с

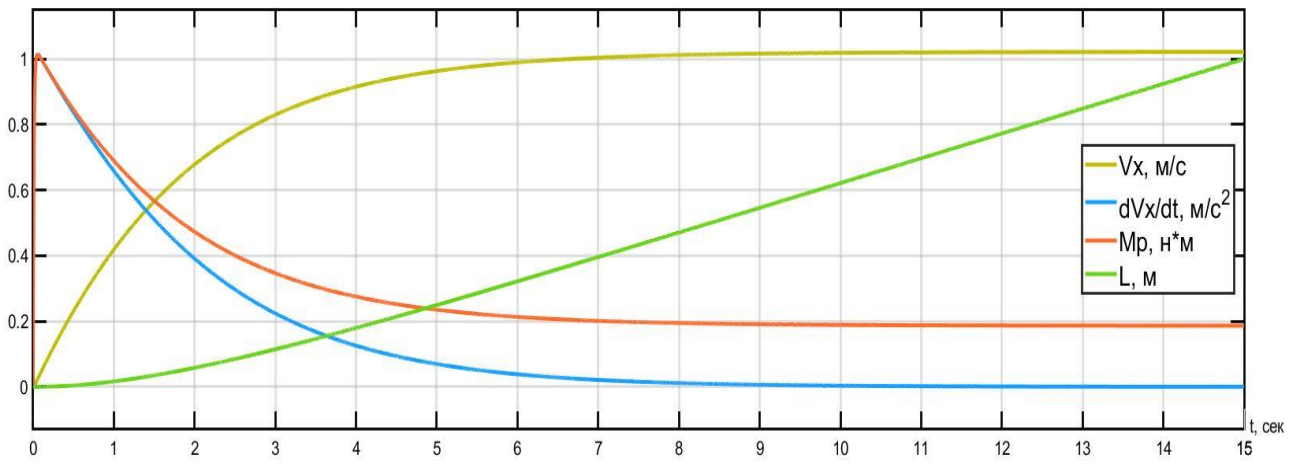


Рисунок 3.9 - График моделирования разгона НПА «Монитор» до скорости 1 м/с

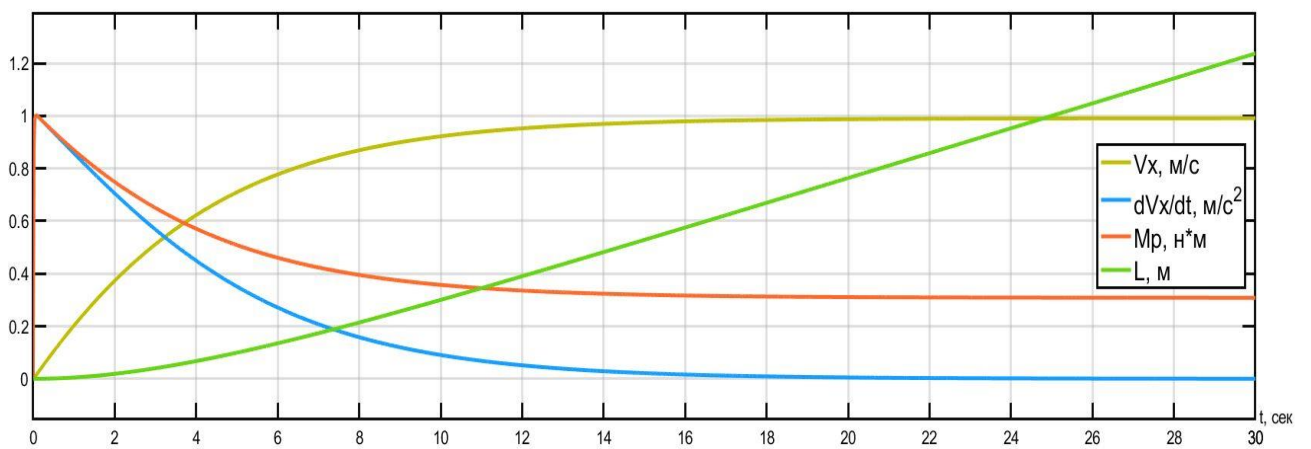


Рисунок 3.10 - График моделирования разгона НПА «Платформа» до скорости 1 м/с

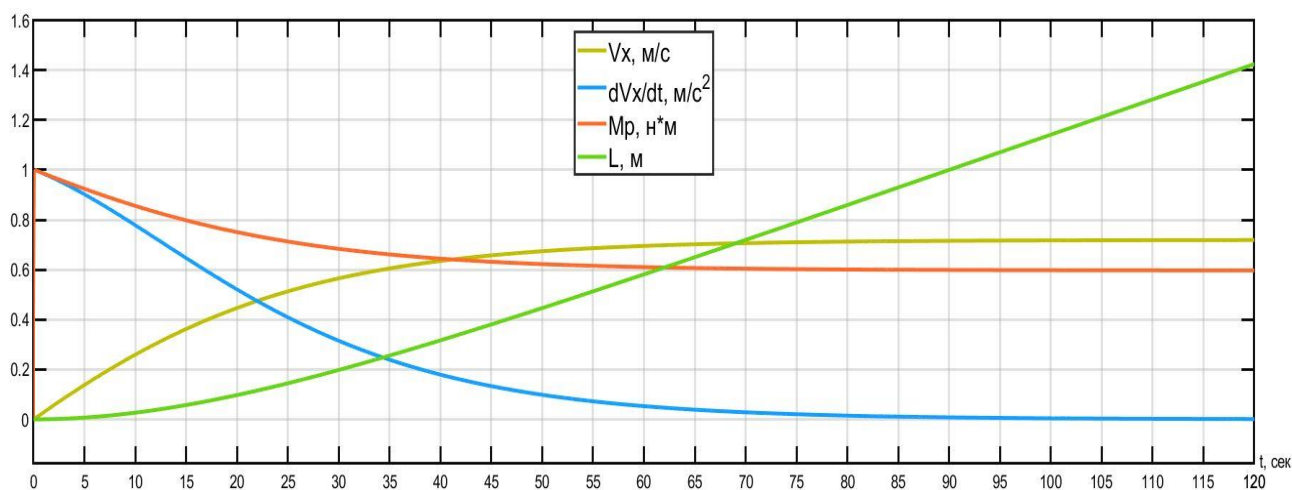


Рисунок 3.11 - График моделирования разгона НПА «К-1Р»
до скорости 1 м/с

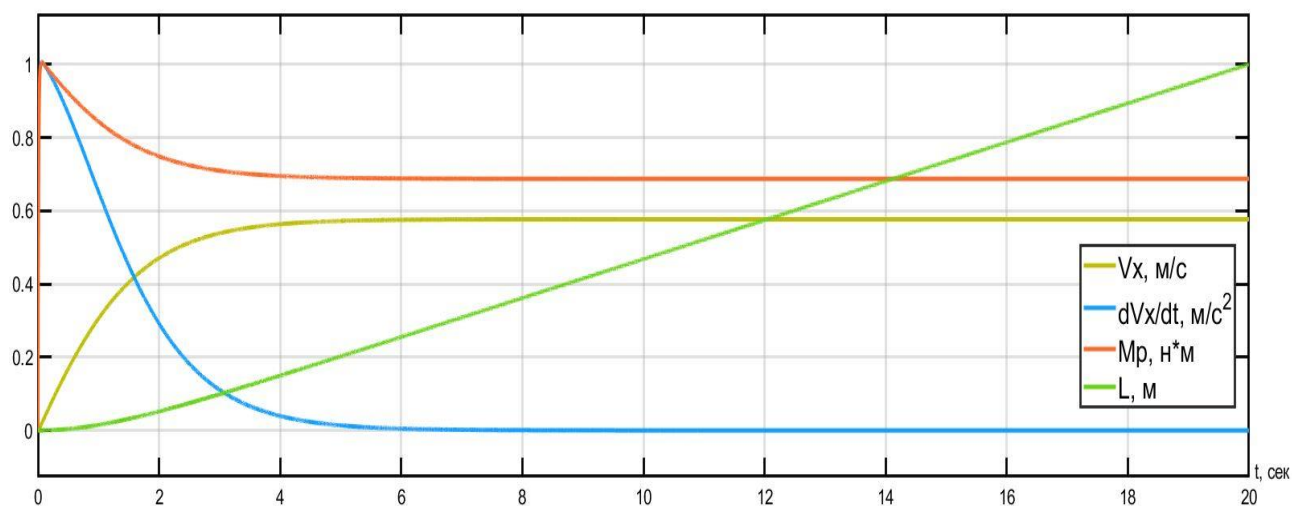


Рисунок 3.12 - График моделирования разгона НПА «Галтель»
до скорости 1 м/с

Таблица 3.1 – Результаты моделирования движения НПА «Чилим»

$U_y, В$	$M_p, н \cdot м$	$V_x, м/с$	$L (10 с), м$
30	0,86	1,53	44,63
25	0,62	1,30	37,95
20	0,42	1,07	31,02
15	0,25	0,82	23,8
10	0,12	0,56	16,26

Таблица 3.2 – Результаты моделирования движения НПА «Монитор»

$U_{я}, В$	$M_p, Н·м$	$V_x, м/с$	$L (10 с), м$
30	1,40	1,37	38,93
25	1,04	1,18	33,42
20	0,71	0,98	27,62
15	0,43	0,76	21,46
10	0,21	0,53	14,88

Таблица 3.3 – Результаты моделирования движения НПА «Платформа»

$U_{я}, В$	$M_p, Н·м$	$V_x, м/с$	$L (10 с), м$
30	2,09	1,17	30,91
25	1,59	1,02	26,72
20	1,13	0,86	22,26
15	0,71	0,68	17,47
10	0,37	0,49	12,27

Таблица 3.4 – Результаты моделирования движения НПА «К-1Р»

$U_{я}, В$	$M_p, Н·м$	$V_x, м/с$	$L (10 с), м$
30	4,19	0,57	10,04
25	3,45	0,49	8,50
20	2,72	0,39	6,91
15	2,01	0,31	5,27
10	1,31	0,21	3,58

Таблица 3.5 – Результаты моделирования движения НПА «Галтель»

$U_{я}, В$	$M_p, Н·м$	$V_x, м/с$	$L (10 с), м$
30	4,15	0,58	16,61

Продолжение таблицы 3.5

25	3,34	0,52	14,83
20	2,54	0,45	12,88
15	1,77	0,38	10,69
10	1,05	0,29	8,14

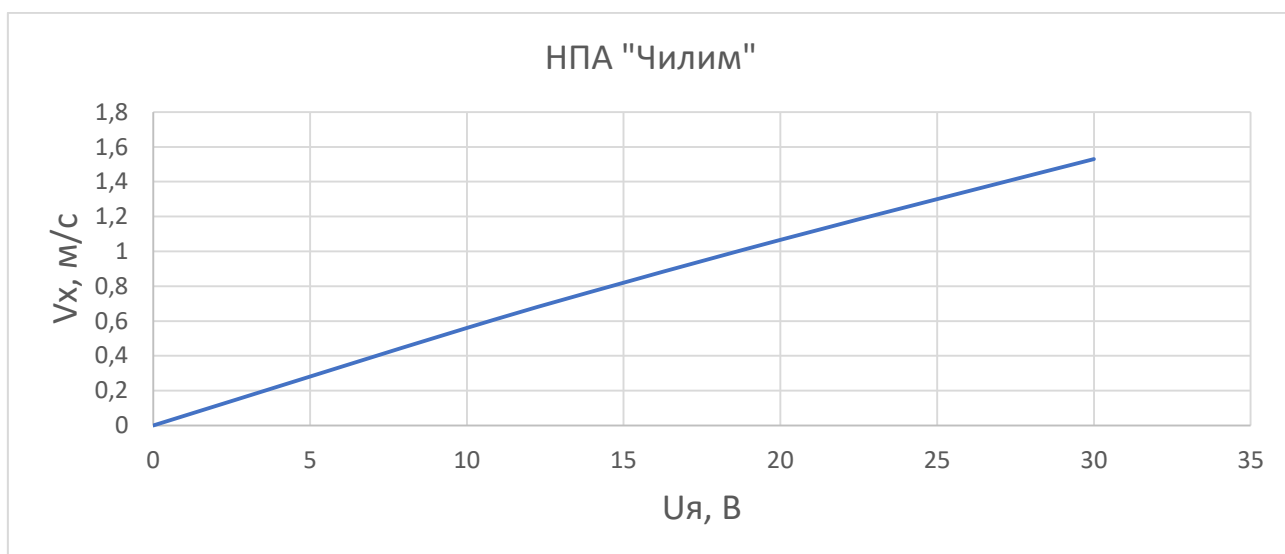


Рисунок 3.13 – График зависимости скорости буксировки ТНПА «Чилим» от напряжения якоря электродвигателя лебедки

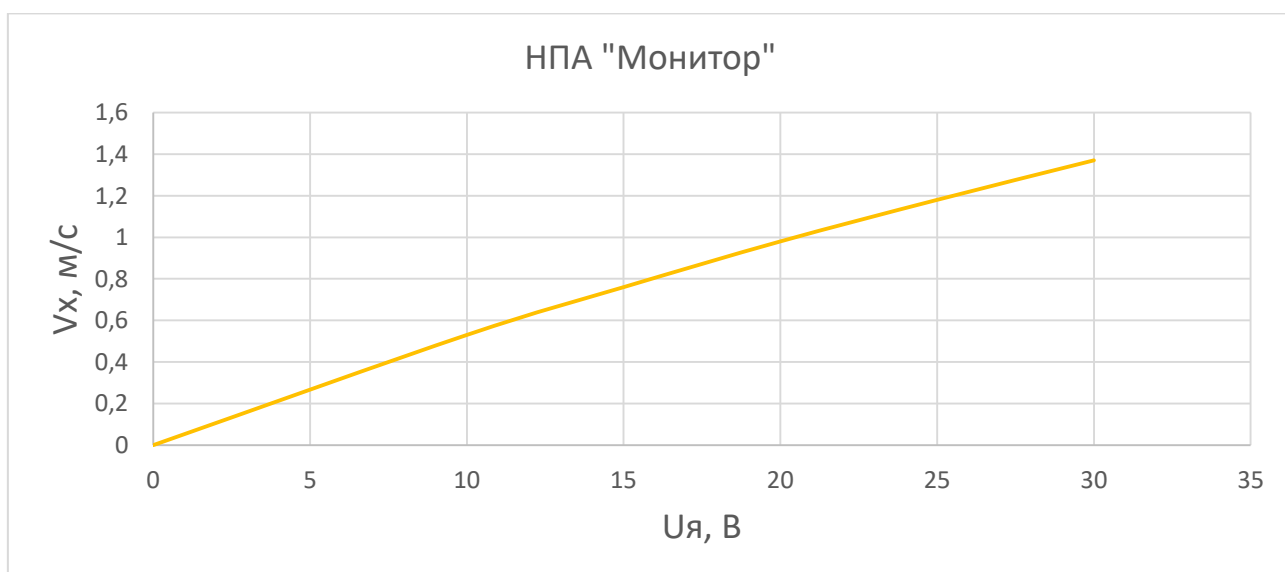


Рисунок 3.14 – График зависимости скорости буксировки ТНПА «Монитор» от напряжения якоря электродвигателя лебедки

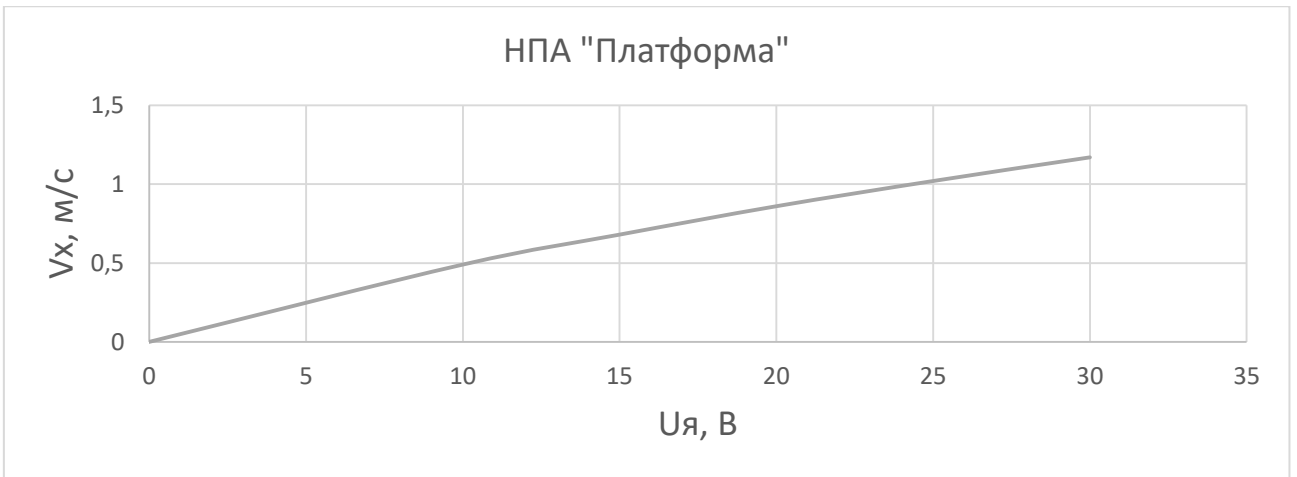


Рисунок 3.15 – График зависимости скорости буксировки АНПА «Платформа» от напряжения якоря электродвигателя лебедки

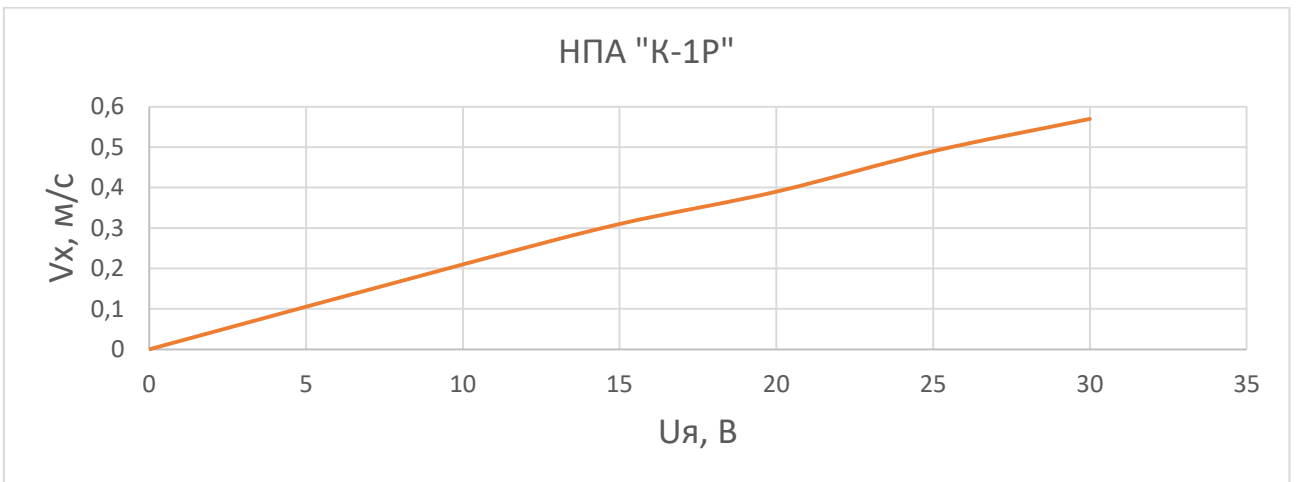


Рисунок 3.16 – График зависимости скорости буксировки АНПА «К-1Р» от напряжения якоря электродвигателя лебедки

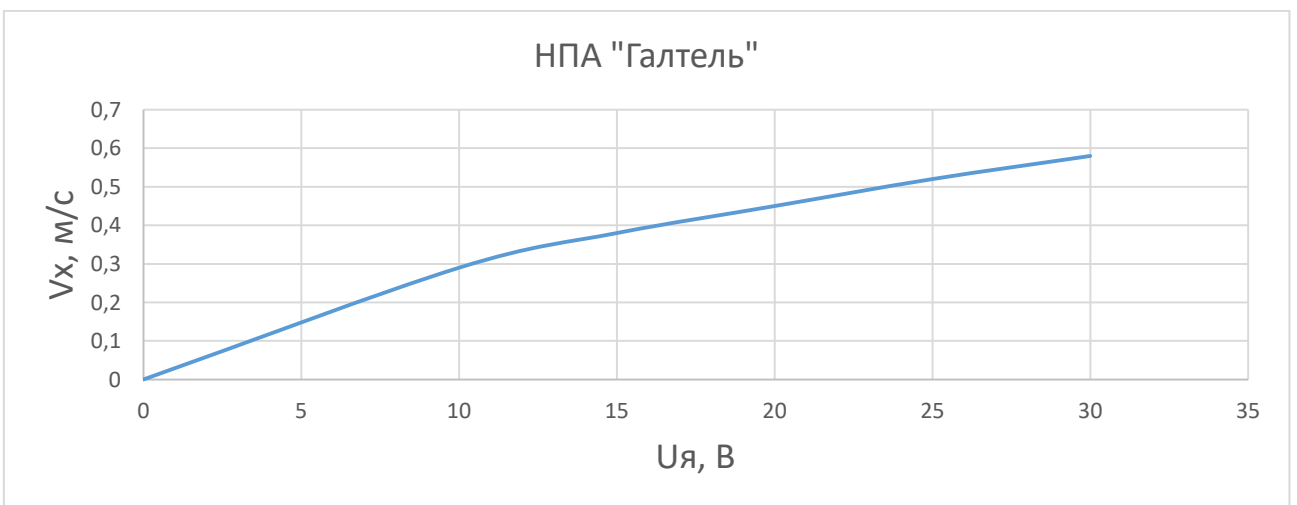


Рисунок 3.17 – График зависимости скорости буксировки ТНПА «Галтель» от напряжения якоря электродвигателя лебедки

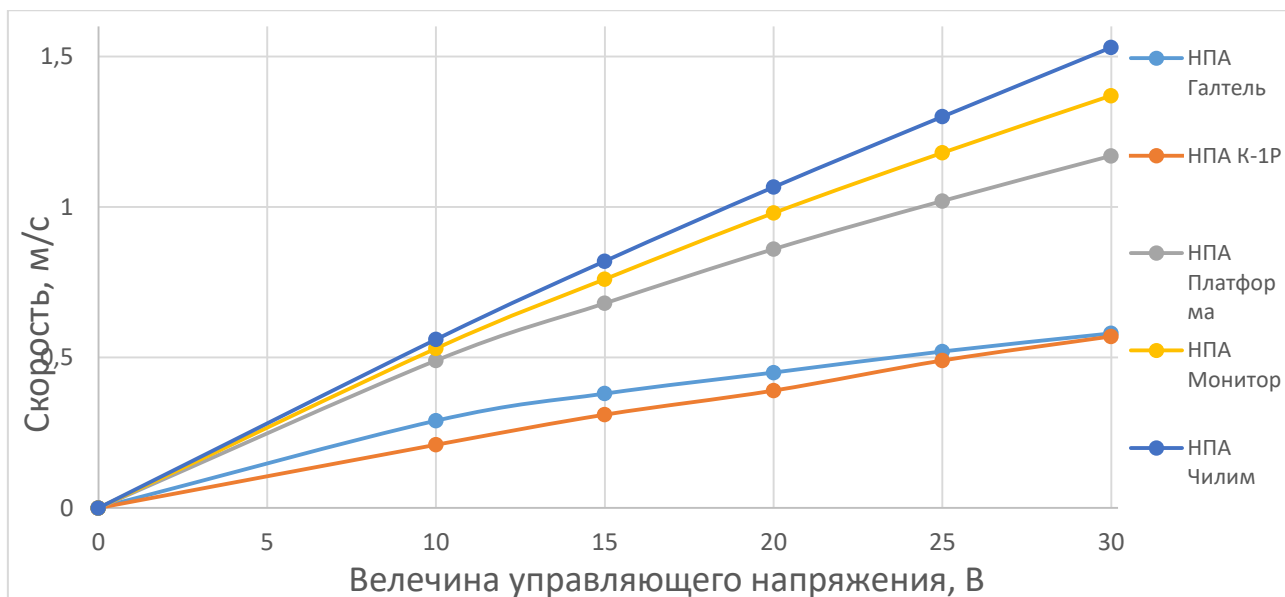


Рисунок 3.18 – Общий график зависимости скорости буксировки НПА от напряжения якоря электродвигателя лебедки

Вывод

В третьей главе были проведены экспериментальные исследования тензометрического стенда. Благодаря испытаниям электродвигателя ДПУ87-75-1-23 на нагрузочном стенде Magtrol, были получены характеристики, позволяющие получить коэффициенты C_m и C_ω , необходимые для составления математической модели тензометрического стенда. Исходя из математической модели была разработана модель тензометрического стенда в программном обеспечении Matlab. На основании характеристик, полученных в результате моделирования движения пяти НПА в режиме определения лобового сопротивления, были определены значения напряжений электродвигателя, обеспечивающие буксировку выбранного НПА с требуемой скоростью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был проведен глубокий анализ существующих методов измерения гидродинамических характеристик подводных аппаратов. Эффективными являются следующие методы:

- математическое моделирование движения АНПА;
- виртуальная продувка моделей;
- испытания АНПА в опытовых бассейнах;
- испытания АНПА в аэродинамических трубах.

Анализ данных методов выявил их недостатки: математическое моделирование движения АНПА и виртуальная продувка моделей не дают полный спектр необходимых гидродинамических характеристик, а транспортировка АНПА для испытаний в существующие лабораторные комплексы неприемлема для сотрудников ИПМТ, ввиду затрачиваемого времени, стоимости логистики и услуг испытательных центров.

Решением данной проблемы послужила разработка тензометрического стенда, который может быть установлен на морском причале доступного мелководного полигона бухты Патрокл.

Исходя из требований по назначению и функциональной схеме стенда была спроектирована модель и определен состав оборудования:

- измерительное оборудование;
- программно-аппаратных средств обработки и накопления данных;
- электрический привод.

На основании расчетов и анализа современного рынка электрического оборудования был произведен подбор соответствующего оборудования. В качестве измерительного оборудования были выбраны следующие компоненты:

- тензометрический датчик Тензо-М Т2-С3;
- магнитный энкодер AS5048;

– датчик тока на эффекте Холла ACS712ELCTR-30A-T;

В качестве программно-аппаратных средств обработки и накопления данных были выбраны следующие компоненты:

– программное обеспечение ZETLab;

– предварительный усилитель ZET 411;

– многоканальный аналого-цифровой преобразователь ZET 210.

В качестве электропривода был выбран электродвигатель ДПУ87-75-1-23.

Выбранный электродвигатель ДПУ87-75-1-23 был подвергнут испытаниям на нагрузочном стенде Magtrol. В результате испытаний были получены характеристики, позволяющие построить адекватную модель тензометрического стенда. Данная модель была реализована в программном обеспечении Matlab, с помощью которой был проведен ряд вычислительных экспериментов, которые позволили составить зависимости скорости буксировки разнообразных НПА разработки ИПМТ от напряжения управления электродвигателя лебедки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.] // под общ. ред. М.Д. Агеева; Ин-т проблем морских технологий // – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Агеев М.Д. - Автоматические подводные аппараты / М.Д. Агеев, Б.А. Касаткин, Л.В. Киселев // Изд-во: Судостроение, 1981 - 223 с.
3. Вельтищев В.В. - Автоматизация проектирования подводных телеуправляемых комплексов/ В.В. Вельтищев, А.Н. Кропотов, В.А. Чельшев // Современные технологии автоматизации – 1997 - №2 – с. 50 – 53
4. Гравитационная буксировочная система для испытаний моделей судов/ Н. А. Тарануха, С. В. Кошкин, Е. И. Селиванов, М. П. Шадрин // Мореходство и морские науки – 2011: избранные доклады Третьей Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (15-16 февраля 2011 г.), с. 90 – 107
5. Ильинский Н.Ф. - Общий курс электропривода / Н.Ф. Ильинский // Издательство МЭИ - 1999 г. - с. 30-36
6. Киселев Л.В - О параметрических соотношениях гидродинамики и устойчивости движения автономного подводного робота / Л.В. Киселев, А.В. Медведев // Подводные исследования и робототехника – 2013, №1(15) - с. 17-22.
7. Киселев Л.В. – Проблемно-ориентированные модели динамики и управления движением автономных подводных роботов / Киселев Л.В. // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. - с. 3771 – 3782
8. Киселев Л.В - Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций / Л.В. Киселев, А.В. Медведев // Подводные исследования и робототехника – 2012, №1(13) - с. 24-35.
9. Пантов Е.Н. - Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов // Из-во: Судостроение, 1973 - 209 с.
10. Русецкий А.А. – Оборудование и организация гидроаэродинамических лабораторий / А.А. Русецкий // Издательство «Судостроение» – 1975 г. – с. 151
11. АНПА «Клавесин-1Р» [Электронный ресурс] // ИПМТ ДВО РАН // Режим доступа: <http://www.imtp.febras.ru/podvodnaya-robototexnika.html?start=11>
12. АНПА «Чилим» и гибридный глайдер «Монитор» [Электронный ресурс] // ИПМТ ДВО РАН // Режим доступа: <http://www.imtp.febras.ru/podvodnaya-robototexnika.html?start=14>

13. Аэродинамическая труба впервые послужит для разработки кораблей ВМФ России [Электронный ресурс] // ФЛОТПРОМ // Режим доступа: <https://flotprom.ru/2017/КрыловскийЦентр1/>(дата обращения 18.04.2018)
14. Аэродинамическая труба Т-5 [Электронный ресурс] // Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского // Режим доступа: http://www.tsagi.ru/experimental_base/aerodinamicheskaya-truba-t-5/
15. Большая аэродинамическая труба [Электронный ресурс] // Крыловский государственный университет // Режим доступа: http://krylov-center.ru/rus/experimental_base/base-aerodyn/ (дата обращения 18.04.2018)
16. Глубоководный опытовый бассейн [Электронный ресурс] // Крыловский государственный университет // Режим доступа: http://krylov-center.ru/rus/experimental_base/basin-deerwater/ (дата обращения 05.04.2018)
17. Датчики и микроконтроллеры [Электронный ресурс] // Интернет-ресурс об электронике о IT-технологиях Habr // Режим доступа: <https://habr.com/post/260639/>
18. Костюков В.А. - Методика расчета гидродинамических коэффициентов АНПА / В.А. Костюков, А.Е. Кульченко, Б.В. Гуренко // [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, №3 (2015)// Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226> (дата обращения 05.04.2018)
19. Ландшафтная аэродинамическая труба [Электронный ресурс] // Крыловский государственный университет // Режим доступа: http://krylov-center.ru/rus/experimental_base/base-lvt/ (дата обращения 18.04.2018)
20. Маневренно-мореходный бассейн [Электронный ресурс] // Крыловский государственный университет // Режим доступа: http://krylov-center.ru/rus/experimental_base/basin-mansea/ (дата обращения 18.04.2018)
21. Об утверждении концепции федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016–2031 годы [Электронный ресурс]// Правительство России // Режим доступа: <http://government.ru/docs/18570/> (дата обращения 30.03.2018)
22. Опытный бассейн [Электронный ресурс] // Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского // Режим доступа: http://www.tsagi.ru/experimental_base/opytovyy-basseyn/
23. Разработка научных основ и технологий автоматизированного исследования океанической среды [Электронный ресурс] // ИПМТ ДВО РАН // Режим доступа: <http://www.imtp.febras.ru/metody-issledovaniya-okeana.html> (дата обращения 30.03.2018)
24. Робототехнический комплекс «МТ-2012» [Электронный ресурс] // ИПМТ ДВО РАН // Режим доступа: <http://www.imtp.febras.ru/podvodnaya-robototexnika.html?start=13>

25. Российский подводный роботизированный комплекс Платформа успешно прошел испытания [Электронный ресурс] // Техносфера // Режим доступа: <http://tehnoomsk.ru/node/2362>

26. Что такое тензодатчик [Электронный ресурс] // Разновес.ру // Режим доступа: <http://www.raznoves.ru/podderzhka/stati/cto-takoe-tenzodatchik-raznica-mezhdu-tenzometricheskim-datchikom-i-tenzorezistornym-datchikom/> (дата обращения 03.05.2018)

27. Электроприводы [Электронный ресурс] // Интернет-ресурс «Инженерные решения» // Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХОДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ.....	8
1.1 Виртуальная продувка	12
1.2 Математическая модель движения АНПА.....	14
1.3 Опытный бассейн	19
1.3.1 Глубоководный опытный бассейн Крыловского государственного научного центра	20
1.3.2 Маневренно-мореходный бассейн Крыловского государственного научного центра	22
1.3.3 Опытный бассейн Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского.....	23
1.3.4 Центр по проектированию, изготовлению и испытаниям необитаемых подводных аппаратов г. Владивосток	25
1.3.5 Гравитационная буксировочная система Дальневосточного опытового бассейна КНАГТУ	27
1.4 Аэродинамическая труба.....	30
1.4.1 Ландшафтная аэродинамическая труба Крыловского государственного научного центра	31
1.4.2 Большая аэродинамическая труба Крыловского государственного научного центра	33
1.4.3 Аэродинамическая труба Т-5 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского	35
Вывод.....	36
2 РАЗРАБОТКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО СТЕНДА	37
2.1 Требования по назначению и функциональная схема стенда.....	37

2.2 Модель использования стенда	39
2.3 Обоснование выбора измерительного оборудования стенда	42
2.3.1 Силоизмерительные датчики	42
2.3.2 Датчики скорости буксировки	43
2.3.3 Датчики электрических параметров стенда	45
2.4 Выбор программно-аппаратных средств обработки и накопления данных	51
2.4.1 Выбор тензометрического усилителя	52
2.4.2 Выбор многоканального аналого-цифрового преобразователя	54
2.5 Обоснование выбора электропривода стенда	56
2.5.1 Моделирование разгона и торможения ПА	57
2.5.2 Расчет параметров буксировочной лебедки	62
2.5.3 Выбор электродвигателя буксировочной лебедки	62
2.6 Разработка конструктивного облика стенда	64
Вывод	65
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКО- ГО СТЕНДА	66
3.1 Испытания электродвигателя на нагрузочном стенде Magtrol	66
3.2 Разработка математической модели стенда	69
3.3 Моделирование работы стенда в режиме определения лобового сопротивления ПА	70
Вывод	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	79

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

Кафедра автоматизации и управления

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ

на магистерскую диссертацию Косача Леонида Владимировича

по направлению 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств»

Руководитель ВКР: к. т. н., Костенко Владимир Владимирович

на тему: Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса определения ходовых характеристик подводных аппаратов в условиях мелководного полигона

Дата защиты ВКР «27» июня 2018 г.

Работа выполнена в полном соответствии с заданием и посвящена ключевым моментам разработки и исследования тензометрического стенда, обеспечивающего измерение лобового сопротивления НПА и его маршевой тяги в режиме буксировки. В основу исследования легли математические модели динамики АНПА и его движительно-рулевого комплекса. Актуальность выбранной цели исследования подтверждена глубоким анализом существующих средств измерения гидродинамических характеристик подводных аппаратов. В ходе проведенных исследований разработана модель использования стенда, определена функциональная схема с учетом необходимого оборудования, обеспечивающего заданные требования к измеряемым параметрам. По результатам нагрузочных испытаний электропривода буксировочной лебедки определены его параметры, необходимые для определения математической модели. Разработана математическая модель стенда в режиме буксировки в программной среде SIMULINK пакета прикладных программ MATLAB. В результате моделирования работы стенда в режиме измерения лобового сопротивления выявлена зависимость параметров буксировки от напряжения управления электроприводом для широкого класса НПА производства ИПМТ ДВО РАН. Приведен конструктивный облик тензометрического стенда, разработанного с учетом выбранного комплекта оборудования.

Тема работы затрагивает вопросы автоматизации измерения лобового сопротивления НПА и тяговых характеристик его движительно-рулевого комплекса и связана разработками, проводимыми в лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления ИПМТ ДВО РАН, что определяет ее актуальность и практическую ценность.

Работа носит выраженный прикладной характер, так как выполнена в рамках бюджетного финансирования ИПМТ ДВО РАН в части исследования эксплуатационных характеристик необитаемых подводных аппаратов.

По содержанию и объему диссертация полностью соответствует требованиям технического задания, в процессе выполнения работы Косач Л.В. ознакомился с необходимой фундаментальной, периодической и справочной литературой по исследуемой теме, показал отличную теоретическую и практическую подготовку, успешно использовал средства автоматизированного проектирования и моделирования сложных динамических систем. Принятые в работе решения достаточно аргументированы и подтверждены математическим моделированием, соответствующими расчетами и натурными испытаниями.

За время работы над диссертацией Леонид Владимирович проявил себя инициативным и дисциплинированным исполнителем. Поставленные задачи решал самостоятельно и в установленные сроки.

В целом, диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам, и заслуживает оценки "ОТЛИЧНО", а Косач Леонид Владимирович присвоения степени магистра по направлению 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Руководитель ВКР
Зав. лаб. 43 ИПМТ ДВО РАН, к.т.н.


(подпись)

В.В. Костенко
(и.о.фамилия)

26.06.2018

МП / Печать организации



Подпись Костенко В.В.
подверяю Косач Л.В.
Печать Косач Леонид Владимирович