МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет физики, математики и инженерных технологий
Кафедра электротехники, электроники и автоматики
форма обучения очная

Допускается к защите
«_____» _____ 2020 Г.
Зав. кафедрой Ключарев А.Ю.

Гладышев Михаил Дмитриевич

РАЗРАБОТКА ПОДВОДНОГО ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО АППАРАТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ИССЛЕДОВАНИЯ АКВАТОРИИ

Бакалаврская работа

по направлению подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
Профиль «Промышленная робототехника»

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент кафедры ЭЭИА
_____ Выборнов Н.А.

Нормоконтроль:

_____Козлова И.А.

С размещением работы в электронной библиотеке «астраханский государственный университет. выпускные квалификационные работы» согласен
_____ /_Гладышев М.Д._____

(подпись / расшифровка подписи)

Астрахань – 2020

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Астраханский государственный университет»

(Астраханский государственный университет)

Факультет физики, математики и инженерных технологий

Кафедра электротехники, электроники и автоматики

У т в е р ж д а ю

Зав. кафедрой _____

«____» _____2020 г.

З А Д А Н И Е

на бакалаврскую работу студента

Гладышева Михаила Дмитриевича

1 Тема дипломного проекта: «Разработка подводного телеуправляемого аппарата для мониторинга и исследования акватории».

утверждена приказом по университету от «_____» _____ 20__ г. №_____

2 Дата выдачи задания на бакалаврскую работу «_____» _____ 2020г.

3 Основные компоненты робототехнической системы:

- корпус;
- электропривод;
- гребные винты;
- микроконтроллер;
- аккумуляторная батарея;
- наземная станция управления;
- джойстик управления;

4 Общие требования к системе:

- робототехнический комплекс должен быть максимально мобильным;
- аппарат должен иметь возможность передвижения во всех плоскостях, оставаясь направленным в одну сторону;
- автономность системы не должна быть меньше 1 часа;

- конструкция аппарата должна быть модульной, и элементы максимально взаимозаменяемы;

5 Перечень графического материала:

- чертеж общего вида робототехнического комплекса;
- принципиальная электрическая схема;
- чертеж печатной платы;
- чертеж узла;
- технологическая сборка;
- технологический процесс;

6 Требования к эксплуатации;

- температура эксплуатации от 1 до 55 C^{o};
- минимизация поломки отдельных узлов аппарата, при попадании мусора в движительный отсек;
- обеспечение качественной гидроизоляции, защищающей от протечек;

Руководитель _____ Выборнов Н.А.

Задание принял к исполнению _____ Гладышев М.Д.

РЕФЕРАТ

Ключевые слова: РОБОТ, РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, ПОДВОДНАЯ РАБОТОТЕХНИКА, ТНПА (ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ), ОСМОТР, МОНИТОРИНГ, ПОДВОДНЫЕ СООРУЖЕНИЯ.

Пояснительная записка представлена на 86 страницах, включает в себя 41 иллюстрацию, 4 таблицы, 8 приложений, 91 формулу и 26 использованных источников.

Объектом исследования в данной работе является подводный телеуправляемый робототехнический аппарат, осмотрового класса.

Целью выпускной квалификационной работы является: разработка мобильного робототехнического комплекса с высокой управляемостью, и высокой маневровой способностью, так же обеспечение максимальной мобильности для развертки данного комплекса.

Исходя из цели, были поставлены следующие задачи:

- анализ технического задания;

- проверка аналогов подобных систем;

- учет сильных и слабых сторон аналогичных систем;

- проектировка конструкции ТНПА (телеуправляемого необитаемого подводного аппарата);

- разработка гребного винта подводного аппарата;

- разработка принципиальной и структурной схем, подводного аппарата;

- разработка математической модели управления ТНПА. (телеуправляемого необитаемого подводного аппарата).

Назначение: погружение на некоторую глубину из возможного диапазона, проведение осмотрово-мониторинговых работ.

Разработанная система имеет характерные отличия, которые выражены в: высокой мобильности, применении восьми бесколлекторных двигателей, а так же применение модульности в аппарате.

Abstract

Key words: ROBOT, ROBOTIC COMPLEX, UNDERWATER WORKING EQUIPMENT, TNPA (TELEPHONE CONTROL UNABILABLE UNDERWATER UNIT), INSPECTION, MONITORING, UNDERWATER CONSTRUCTIONS.

The explanatory note is presented on 86 pages, includes 41 illustrations, 4 tables, 8 appendices, 91 formulas and 26 sources used.

The object of study in this work is an underwater remote-controlled robotic apparatus, inspection class.

The aim of the final qualification work is to develop a mobile robotic complex with high controllability and high shunting ability, as well as ensuring maximum mobility for the development of this complex.

Based on the goal, the following tasks were set:

- analysis of technical specifications;
- verification of analogues of similar systems;
- taking into account the strengths and weaknesses of similar systems;
- design design TNPA;
- development of the propeller of the underwater vehicle;
- development of the principle and structural diagrams of the underwater vehicle;
- development of a mat model of TNLA management.

Purpose: diving to a certain depth from a possible range, conducting inspection and monitoring work.

The developed system has characteristic differences, which are expressed in: high mobility, the use of eight brushless motors, as well as the use of modularity in the device.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..……....8
1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ...…….…….…….…...10
1.1 Анализ разрабатываемого аппарат осмотрового класса. Постановка технического задания……..…….…..…10
1.2 Анализ имеющихся телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов……11
1.2.1 BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit …….....11
1.2.2 Супер гном…….…….….....13
1.2.3 Boxfish ROV…….…….…….……..14
1.2.4 Deep Trekker Robotics ….…….……...15
1.2.5 Вывод……17
2 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ…….…….…18
2.1 Разработка схем структурной, функциональной……..18
2.2 Конструкции аппарата. Материалы, используемые при работе…….……20
2.3 Разработка деталей конструкции……...……22
2.4 Гребной винт подводного аппарата...……...….25
2.5 Плавучесть подводного аппарата и стабильность……...…….....33
2.6 Расчет электронной компонентной базы аппарата. ….……...……...38
2.7 Расчет аккумуляторных батарей аппарата……...…….42
2.8 Износостойкость аппарата и ремонтопригодность. Анализ эксплуатационного ресурса……..……45
2.9 Расчет надежности плат управления. Расчет показателей безотказности. Расчет ремонтопригодности……...……46
3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ…….…….49
3.1 Управление подводным роботом осмотрового класса, кинематика движения…….49
3.2 Динамическое движение, вывод уравнений движения подводного аппарата……...52
3.3 Математическая модель управляемого движения подводного аппарата…….…..55
3.4 Выбор регулятора……60
3.5 Моделирование……....62

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ……...…..……66
4.1. Технико-экономическое обоснование……...……...……66

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ…..……..……..……..68

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Подводный телеуправляемый аппарат. Схема электрическая принципиальная …….……..……...…….....……72

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Печатная плата драйвера …….....…..…..……74

ПРИЛОЖЕНИЕ В - Технологическая карта сборки подводного телеуправляемого аппарата…….…78

ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Подводный телеуправляемый аппарат сборочный чертеж….……80

ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Таблица перечня элементов чертежа подводного телеуправляемого аппарата….……...……..……82

ПРИЛОЖЕНИЕ Е- Движительный узел сборочный чертеж .....……..…..…….…….85

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж - Спецификация чертежа движительного узла ….…….……..……80

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день подводная робототехника насчитывает чуть больше 40 лет развития. За это время она претерпела большие изменения как в средствах, методах организации, так и применения подводных робототехнических систем и их комплексов. Целью развитие морской робототехники, в том числе военной и специального назначения (МРВиСН) является повышение эффективности и расширение функциональных возможностей, в том числе и выполнение специальных подводно-технических и аварийно-спасательных работ различных ведомств и компаний.

Начиная с ранних 1950-х годов, дистанционные подводные аппараты (remotely operated underwater vehicles – ROV), применяемые по большей части военными [3], быстро эволюционировали от тяжелых и громоздких аппаратов тяжелого рабочего класса, используемых в основном при строительстве, до новейших, аппаратов, которые мы можем видеть сегодня на рынке.

На сегодняшний день существуют 4 основных класса аппаратов, которые, отличаются функционалом и масса-габаритными характеристиками. Так, сегодня, принято определять 4 группы, состоящие из: малогабаритных телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), ТНПА легкого класса, рабочие ТНПА легкого класса, рабочие ТНПА тяжелого класса.

Для того, чтобы узнать, чем же они отличаются друг от друга, необходимо подробно рассмотреть каждый класс. Так, малогабаритные ТНПА, характеризуются, малыми габаритами, при которых, они легко помещаются даже в легковые автомобили, по большей части, выполняют задачи по обследованию подводных объектов, как на открытой площади, так и в стесненных условиях, например, подобные аппараты, могут применяться в трубопроводах, внутри затонувших кораблей и др. Для эксплуатации достаточно 1 человека.

ТНПА легкого класса, ключевым отличием от малогабаритных аппаратов, являются более мощные приводы, увеличенные масса-габаритные характеристики. Предназначаются, для полномасштабных подводных исследований, т.к. могут нести на себе различное

оборудование, предназначенное, для выполнения иных задач. Среди такого оборудования, могут числится: различное осветительное оборудование, дополнительные камеры, манипулятор, гидролокатор, маяк отслеживания ГАНС (гидроакустическая навигация), и др. Так же аппараты данного класса, могут поднимать объекты небольшого веса.

Следом идут рабочие ТНПА легкого класса, довольно небольшие и мощные аппараты, с манипуляторами и различными инструментальными комплексами, которые, помимо задач по обследованию, и поиску, способны выполнять подводные работы, на различных объектах. Такими могут служить: платформы, трубопроводы, остовы и др. Обычно, такие аппараты, применяются, при поддержке бурения, и легкого строительства, а также исследованию труб, и прочих общих работ.

И наконец, рабочие ТНПА, тяжелого класса, данный вид комплексов, применяются при сложных работах, при сильных течениях, различных работах, на больших глубинах, а также при перевозке грузов. Данный класс имеет большие габариты и масса-габаритные характеристики, что в значимой степени отличает этот класс от других.

В ходе выполнения данной работы, был спроектирован, ТНПА, легкого класса, который, может применяться на глубинах, до 200 метров.

1 АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Анализ разрабатываемого аппарат осмотрового класса. Постановка технического задания

На сегодняшний день имеется довольно много видов и моделей, телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, [19] или ROV, которые так же, имеют различную цену, и функционал [4].

В ходе выполнения данной работы, предполагается разработать собственный робототехнический аппарат, отличный, от прочих, и включающий в себя лучшие достоинство, аналогов, представленных, на рынке сегодня. Планируется, применять данный аппарат, для обследования, различных подводных объектов. Для понимания функционала, было запрошено ТЗ, на подобный комплекс, ТЗ отражает основные требования к данному комплексу:

1) Стандартный контроллер и электроника ТНПА, представляющую собой легко заменимые модули, доступные для приобретения. Ключ к программированию контроллера должен быть открытым для внесения изменений, а также в образовательных целях;
2) Число движителей обусловлено необходимой степенью подвижности аппарата из условий выполняемых им задач (от четырех степенной подвижности (перемещение по 3 осям и вращение по одной), до шести степенной (перемещение и вращение по всем осям));
3) Освещение спереди и сзади, должно быть с регулируемой яркостью. Ближний и дальний свет;
4) Цифровая видеокамера спереди и сзади;
5) Система навигации:

- компас для ориентации аппарата под водой;

- сонар для обнаружения объектов на расстоянии или в условиях ограниченной видимости;

- система позиционирования с привязкой к географическим координатам с короткой базой;

6) Возможность применить: автокурс, автоглубина, удержание позиции;

7) Возможность применения системы мониторинга окружающей среды, с помощью сертифицированных датчиков:

- датчик температуры с возможностью измерения придонного слоя грунта (заглубление на 20 см. в грунт);

- устройство для сбора газа;

- pH-метр;

- измерение солености воды.

8) Телеметрия:

- дата и время;

- глубина;

- компас и текущее направление движения аппарата по компасу;

- температура среды;

- мощность и направление работы двигателей;

В дальнейшем, в ходе работы, будут рассматриваться различные технологические процессы, позволяющие добиться, реализации поставленных задач.

1.2 АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

1.2.1 BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit

На сегодняшний день, как заявляет производитель, является самым доступным в мире, высокопроизводительным ROV [17] (remotely operated underwater vehicles - дистанционным

управляемым подводным аппаратом). Аппарат имеет на борту 6 управляемых двигателей, и векторное управление, вся его электроника и исходные коды, находятся в открытом доступе, а также данный аппарат, способен оснащаться улучшениями, на рисунке 1 приведен общий вид аппарата.

Сам аппарат при покупке поставляется в разобранном виде, процесс сборки занимает от 6 до 12 часов. Производитель утверждает, что в таком состоянии, покупатель, сможет самостоятельно, понять, как устроен, аппарат внутри, и как связываются компоненты между собой. Что в дальнейшем поможет производить усовершенствование модели, без особых проблем.

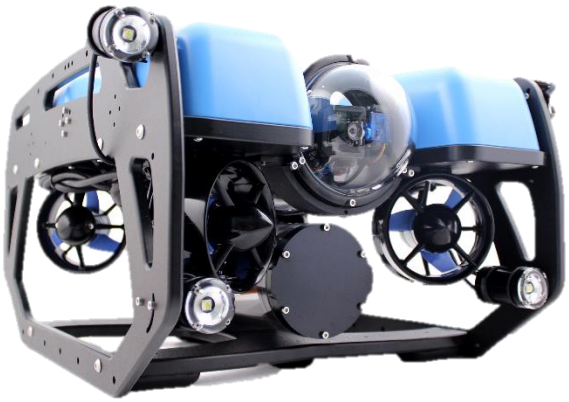


Рисунок 1 - Стандартная конфигурация BlueROV2

Аппарат, представленный на рисунке 1, можно оснастить 4 фонарями, каждый обеспечивает яркость до 6000 люмен, это позволяет довольно хорошо осветить глубины. Векторное управление, поможет сохранить устойчивость аппарата, и обеспечить плавное перемещение под водой, тем самым упрощая работу оператора, и увеличивая четкость изображения.

Говоря о дополнительных навесных модулях, стоит о них упомянуть. Так можно оснастить аппарат более длиной катушкой, обеспечивающий длину до 300 метров, больше, не имеет смысла, ведь, даже, при малых течениях, кабель с сечением больше 8 мм, начинает сносить, а учитывая мощности моторов, используемых в аппарате, то можно точно заявить, что полная длина кабеля, будет использоваться только в озерах, или закрытых водных ресурсах.

Так же аппарат можно оснастить сканирующим гидролокатором, обеспечивающим, навигацию в условиях низкой видимости. Модуль GPS, соединённый подводный, обеспечивает навигацию, и отображает свое местоположение на карте, в реальном времени.

Главную, на мой взгляд, дополнительную конфигурацию, хотелось бы отметить - Heavy Configuration. Данная конфигурация, обеспечивает оснащение аппарата, дополнительными 2 моторами, и 2 поплавками. После этого аппарат, выглядит, совсем иначе. На рисунке 2 видно, что после улучшения, данный аппарат приобрел иной вид, теперь моторы, отвечающие за погружение и всплытие, располагаются по бокам конструкции - симметрично.

Данное расположение моторов позволяет добиться 6 степенного управления аппаратом, что сделает его управление более гибким, а также позволит выполнять различные акробатические движения, применяемые часто в соревнованиях по подводной робототехнике, среди ТНПА. В дальнейшем подобное расположение моторов будет применяться в собственном аппарате.

Рисунок 2 – Аппарат BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit

1.2.2 Супер ГНОМ

Довольно известная фирма, выпускающая так же, подводные телеуправляемые аппараты, и дополнительную атрибутику к ним. Для сравнения выбрана именно эта модель, изображенная на 3 рисунке, т.к. данный аппарат, имеет наибольшую степень подвижности, среди своих собратьев. У него имеется 4 горизонтальных мотора, для перемещения вперед, назад, и 2 мотора, отвечающие, за погружение, всплытие.

Рисунок 3 – Супер ГНОМ

На аппарате установлены 2 видеокамеры: спереди и сзади. Данный аппарат, довольно быстрый, и маневренный, но единственным минусом, является – меньшая подвижность аппарата, по сравнению, с BlueROV2 Heavy Configuration.

Данные аппараты, нашли свое применение, во многих сферах: поисково-спасательные работы, данные робототехнические комплексы, применяются при поиске и обследовании затонувших объектов, а так же различных подводных стационарных объектах; Аппараты применяются в осмотровых и ремонтных работах, при инспекции судов, тем самым сокращая время и затраты; Обследовании различных объектов федерального или регионального значения, примером могут служить атомные электростанции, нефтедобывающие сооружения, различные гидроэлектростанции и дамбы с плотинами.

На аппарат, так же может монтироваться дополнительное оборудование, в том числе манипулятор, локатор, панорамные камеры, и прочие системы, расширяющие функционал комплекса. Минусами, данной системы, хотелось бы отметить, отсутствие еще 2ух вертикально расположенных двигателей, которые могли бы обеспечить дополнительные степени подвижности, и отсутствие собственного источника питания. Ведь, для корректного использования кейса управления данным робототехническим устройством, необходим источник питания 220V.

1.2.3 Boxfish ROV

Следующий аналог - Boxfish ROV, на рисунке 4, телеуправляемый подводный аппарат, выполненный в простом исполнении. Данная конструкция включает в себя

центральную колбу, в которой находится вся электроника плюс аккумуляторы, поверх колбы, располагаются 8 моторов закрепленных, к колбе и раме конструкции.

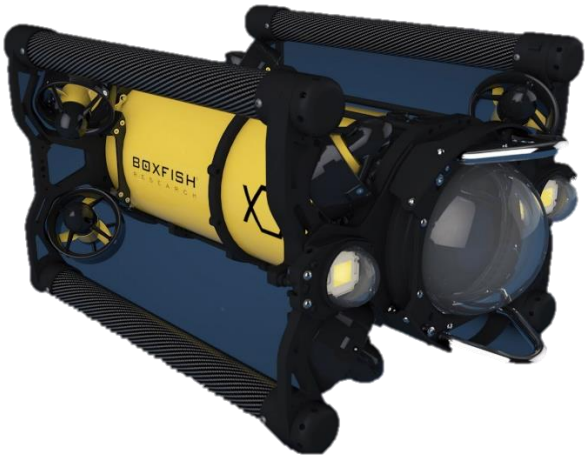


Рисунок 4 – аппарат Boxfish ROV

Аппарат рассчитан на погружения до 300 метров, это наибольший показатель, среди аналогов. Разработчики, так же гарантируют передачу качественную связи, при использовании кабеля длиной до 1000 метров. Данная гарантия бросается в глаза. В дальнейшем, в аппарате, хотелось бы тоже, применить подобную технологию. Так же, конструкция данного аппарата, весьма надежна, на первый взгляд, нет дополнительных капсул, связанных между совой, и, следовательно, лишних отверстий в корпусе, через которые может проникнуть вода.

За счет своей конструкции аппарат может работать, даже с несколькими загрязненными двигателями. А если связь нарушится, и кабель связи порвется, в данном аппарате, предусмотрена функция всплытия, и сохранения местоположения, при этом используется уже собственное питание. Так же отличительной чертой аппарата, является панорамная видеокамера с разрешением в 4К. Состоит она из двух ультраширокх навигационных камер, обеспечивающих объемную видимость и отличную ситуационную осведомленность. В аппарате, так же реализована функция стабилизации.

Данный робототехнический комплекс применяется по большей части для качественной видео и фото съемке.

1.2.4 DEEP TREKKER ROBOTICS

Данный робототехнический аппарат сразу бросается в глаза [18] своим дизайном. Что позволяет становиться запоминаемым среди прочих. Сам аппарат оснащен 6 моторами,

4 горизонтальными и 2 вертикальными, 2 капсулами под довольно мощные фонари, и камера, с вертикальными углами обзора -110 º – 150 º (260 º градусов обзора), что позволяет производить видео и фото съемку не только объектов, располагающихся на дне, но и объектов располагающихся выше аппарата. Что касается габаритов аппарата, то ширина составляет 440 мм, высота 235 мм, и длина 717 см.

По заверению разработчиков, максимальная глубина аппарата составляет 305 метров, что является наибольшей, среди все остальных аппаратов. В дальнейшем, необходимо приблизить отметку погружения собственного аппарата к рассматриваемому. В аппарате, так же реализовано векторное управление, что говорит о необходимости внедрения его в собственный аппарат.

На Рисунке 5 приведена фотография, самого аппарата. По бокам располагаются поплавки, так же обеспечивающие довольно малое лобовое сопротивления и создавая хорошую обтекаемость аппарату. Управление реализовано на пульте управления, похожим, на тот, что применяется в управлении квадрокоптеров.

Рисунок 5 – Аппарат DEEP TREKKER ROBOTICS

На данный робототехнический комплекс, так же монтируется дополнительное оборудование, производимое этой же фирмой. Одним из главных минусов хотелось бы отметить, крайне высокую стоимость аппарата, которая составляет 37 499 $, что эквивалентно – 2 800 000 руб. Данная цена аппарата, крайне велика, производитель характеризует такую цену, с высокой глубиной погружения, работой под водой, до 8 часов,

камерой с разрешением в 4К, набором различных датчиков, обеспечивающих комфортное управление, а также способность данного аппарата, выполнять сложные элементы управления под водой и высокую стабилизацию.

1.2.5 Вывод

В ходе рассмотрения наиболее интересных и схожих робототехнических системы, был произведен их анализ, на основе которого были выявлены сильные и слабые стороны каждого из комплексов. В дальнейшим, при разработке своего робототехнического подводного комплекса, будут учитываться их ошибки, а также будут применены улучшенные модули и узлы. В дальнейшем стоит уделить большое внимание дальности связи подводного робота, и наземной станции управления, ведь это может дать существенное преимущество, перед конкурентами. Так же заострить внимание на системе управления, которая должна быть точной, но при этом для оператора удобной и простой в освоении. Управление аппаратом, будет осуществляться через пилотный джойстик, который применяется по большей части в авиа симуляторах, это позволить улучшить управление роботом, а также позволит изучить плюсы и минусы такого управления.

2 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Разработка схем структурной, функциональной

Для понимания структуры аппарата, а также его особенностей, необходимо составить структурную схему, которая определяла бы основные функции изделия, а также их взаимосвязи между ними. Схема будут составлена в общем виде.

В ходе рассмотрения аналогов, было выявлено, что аппарат, должен быть достаточно мобильным, и способным передвигаться во всех направлениях, следовательно, необходимо применять, не 6 моторов, как в большинстве аналогов, а 8. Пример такого расположения моторов, мы могли увидеть у BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit. Так же конструкция должна быть модульной, а ее части взаимозаменяемыми, идеально, и при необходимости ее можно было бы модернизировать, следовательно, конструкция как у аппарата Boxfish ROV отпадает. На борту должны находиться основные элементы электроники, а аккумуляторная батарея, для большей безопасности, вынесена в отдельный отсек. Так же необходимо наличие стандартного набора датчика, для подобного робототехнического комплекса, видеокамеры, и нескольких фонарей.

Таким образом, структурная схема программно-аппаратного комплекса, будет выглядеть, следующим образом рисунок 6.

Как видно из схемы, комплекс будет состоять из двух частей: наземная часть базирования, с которой происходит все управление, и куда осуществляется передача изображения с аппарат и подводная часть, непосредственно, в которую входит сам аппарат. Связь межу ними осуществляется через кабель нулевой плавучести, длина которого может варьироваться от 50 до 300 метров.

Для корректного управления, и получения качественного видео сигнала, необходимо использовать конвертор видео сигнала, который способен передавать входящие сигналы, на расстояния до 300 метров.

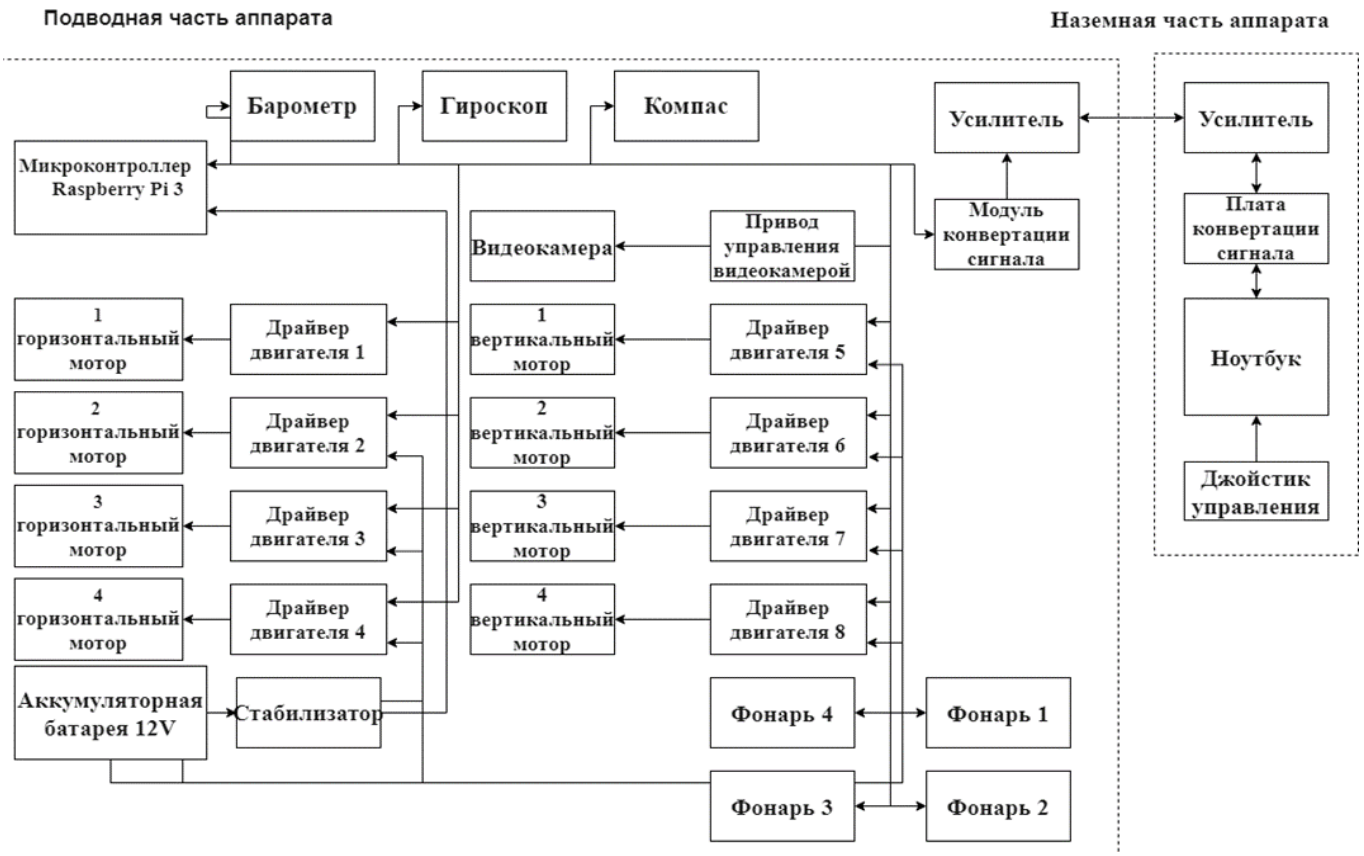


Рисунок 6 – Структурная схема комплекса

Для этого был выбран видео распределитель SC&T VD102 (VE02), который отвечает всем, необходимым требованиям, а именно: обеспечивает передачу видео изображения на дистанции, до 300 метров, работает от 5 вольт, при этом, расходует всего 150 мА, обеспечивает передачу видео изображения, качеством, до 1600*1200 пикселей. [20]

Рисунок 7 – Конвертер видео сигнала SC&T VD102 (VE02)

Таким образом, в дальнейшем, данный модуль, будет с одной стороны соединен с камерой аппарата, а с другой стороны, с ноутбуком оператора, обеспечивая передачу видео изображения, в хорошем качестве.

2.2 Конструкция аппарата. Материалы, используемые при работе

Конструкция аппарата, должна быть надежной и крепкой, материал, используемый в робототехническом комплексе, должен быть одновременно легким, прочным и доступным. Таким свойствами обладают различные органические и не органические полимеры, среди которых полипропилен, полиэтилен, полистирол и др. Каждый из материалов обладает определенными свойствами и характеристиками. Необходимо разобраться, какой материал, наилучшим образом подойдет на роль основы конструкции.

Основные характеристики рассматриваемых материалов рассмотрены в Табл.1, которая отражает, так же и цену, за лист формата 1500*3000 мм.

Таблица 1 – Основные характеристика материалов

Наименование материала	Плотность	Температурный диапазон	Модуль упругости	Предел прочности растяжение	Цена
Ударопрочный полистирол	1,05 гр/см^3	-75 - +105 C^o	2850-2930 МПа	45-50 МПа	11250 руб.
Полиэтилен	0,91-0,95 гр/см3	-70 - +80 C^o	700-1200 МПа	35-45 МПа	9600 руб.
Полипропилен	0,9 -0,92 гр/см3	-20 - +80 C^o	1200-1600 МПа	41-47 МПа	7960 руб.
Капролон	1,15-1,16 гр/см3	-40 - +70 C^o	2000-3000 МПа	42-50 МПа	8360 руб.

Рассмотрев, каждый материал подробно, хотелось бы выделить основные моменты, сыгравшие роли, при выборе основы для корпуса.

Ударопрочный полистирол, рисунок 8 – довольно интересный материал, который, в обыденной жизни мы можем наблюдать в простых стаканчиках из-под йогурта, но ударопрочный полистирол, отличается улучшенными прочностными характеристиками, и толщиной. Рассмотрев проверенные интернет магазины, которые предоставляют данный материал, удалось выяснить, что он, имеет довольно высокую начальную стоимость. Хоть материал имеет обладает хорошими прочностными характеристики, и практически нулевую

плавучесть, но его цена, и конечная цена с доставкой, на текущий момент не являются доступными. Таким образом материал отпадает.

Рисунок 8 – Ударопрочный полистирол

Листовой полиэтилен [16] довольно близок по своим физическим и химическим свойствам с полипропиленом, но имеет ряд небольших отличий, которые, опять же играют важную роль, при выборе основного материала. Во-первых, материал является довольно пластичным, в отличии от полипропилена, так же выдерживает максимальное давление в 16 Мпа, когда у полипропилена, этот параметр составляет 20 Мпа. И цена, вместе с доставкой, конечно, уже лучше, чем у ударопрочного полистирола, который был рассмотрен раннее, но все равно, оставляет желать лучшего.

Полипропилен же, рисунок 9, как было сказано раннее, имеет улучшенные прочностные характеристики, нежели полиэтилен, и выдерживает большее давление. В целом, материал имеет почти такие же химические свойства, как и листовой полиэтилен. В ценовой же категории, он является лидером, данный материал, имеется в наличии, по городу Астрахань, следовательно, имея в распоряжении личное транспортное средство, можно одним днем оформить покупки, произвести доставку, и начать обработку материала.

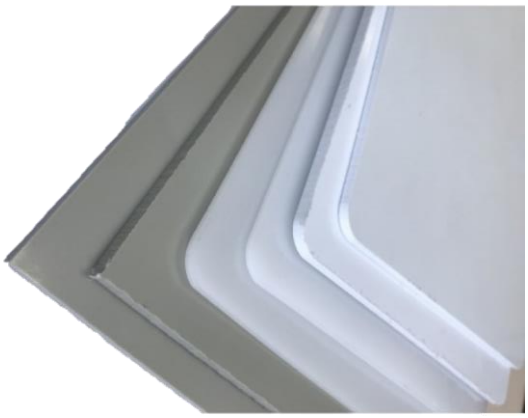


Рисунок 9 – Листы полипропилена и полиэтилена

Следующим материалом, является капралон - рисунок 10, материал, которым уже более 30 лет заменяют некоторые стальные детали, на производстве. Материал, зарекомендовал себя достаточно хорошо, как в прочностных параметрах, так и химических. Основным свойством материала, является - низкое трение с другими поверхностями. Данный эффект довольно часто применяют в изготовлении подшипников, на основе этого материала, и использованию его в качестве шестерней, или других вращающихся деталей. В целом материал, показывает хорошие характеристики, но, выделяются 2 крупных минуса. 1 – практически везде материал продается в гранулах, ведь основной способ изготовления деталей из него — это отливка, что в нашем случае отпадает, а 2 – если материал продается листами, то не в допустимых размерах. Листы данного материала, не соответствуют некоторым размерам бедующего аппарата, что в свою очередь, накладывает ряд ограничений, на размеры будущих элементов конструкции. Тем самым материал не является допустимым.

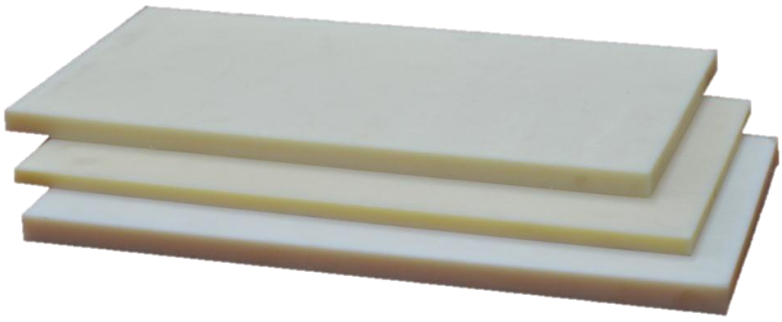


Рисунок 10 – Капролон листовой

Следовательно, после рассмотрения наиболее приемлемых материалов, наиболее доступным, как функционально, так и по ценовой политике оказался – полипропилен.

2.3 Разработка деталей конструкции

Основой аппарата, станут алюминиевые колбы, рисунок 11, имеющие внешний диаметр 110 мм, и длину в 250 мм. Производителем, указано, что максимальная глубина, которую выдерживает колба, составляет 300 метров. Так же в стенках колбы, выточены 6 отверстий с резьбой, на каждой из сторон, что дает возможность закрепления уплотнительного элемента конструкции, который в свою очередь держит прозрачную линзу, что дает возможность установить камеру.

Рисунок 11 – Используемая колба

Внутри колб будут располагаться вся электроника, и аккумуляторы. Было решено, использовать 2 отдельные колбы, [15] для большей сохранности, и удобства размещения компонентной базы аппарата. В первой колбе, расположатся: камера, микроконтроллер, драйверы, которые обеспечат вращения моторов, стабилизаторы, и некоторые из датчиков, во второй же колбе, будут располагаться аккумуляторные батареи, которые будут собираться самостоятельно из отдельных литий-ионных аккумуляторных батарей. В дальнейшем будут рассчитаны необходимые емкость и напряжение.

Конструкция самого аппарата, будет изготовлена из полипропилена, и печатных изделий из PLA пластика. В ходе разработки был выбран полипропилен, толщиной 8 мм, который, должен выдержать все нагрузки, прилагаемые к конструкции во время ее эксплуатации, в том числе и случайные падения.

Для подтверждения этой догадки, были произведены расчеты прочности, в программе КОМПАС-3D, где, с помощью специальной библиотеки, были рассчитаны основные параметры прочности, а именно, при каких нагрузках и как поведут себя отдельные части конструкции. Для этого, была заполнена таблица, основных свойств материала, рисунок 12, которым является полипропилен.

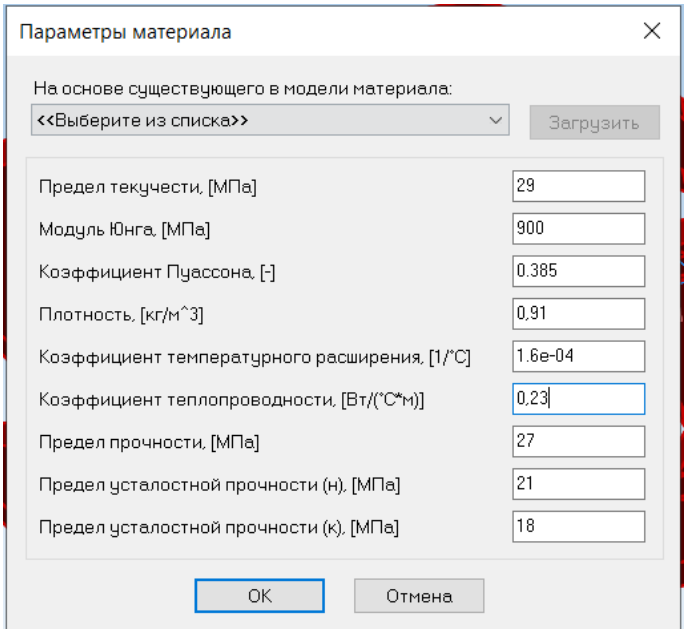


Рисунок 12 – Параметры задаваемого материала

Далее, был произведен расчет данной детали. Расчет показал, что при нагрузке в 100 Н, на края детали, она не сломается, а лишь прогнется, на 21.3 мм. Это показано на рисунках 13, 14, 15. Таким образом, можно сделать вывод, о том, что конструкция данного аппарата, сможет выдерживать прямые столкновения с различными подводными объектами, при этом не навредив целостности корпуса.

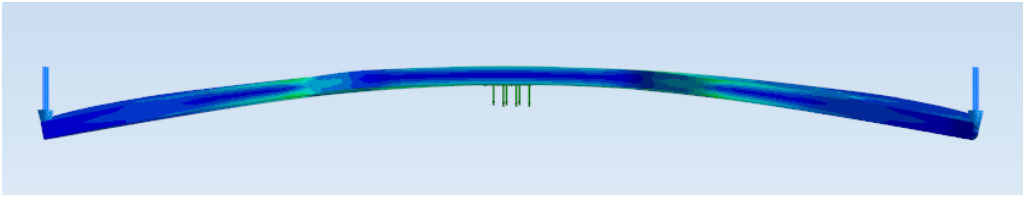


Рисунок 13 – Изгиб детали

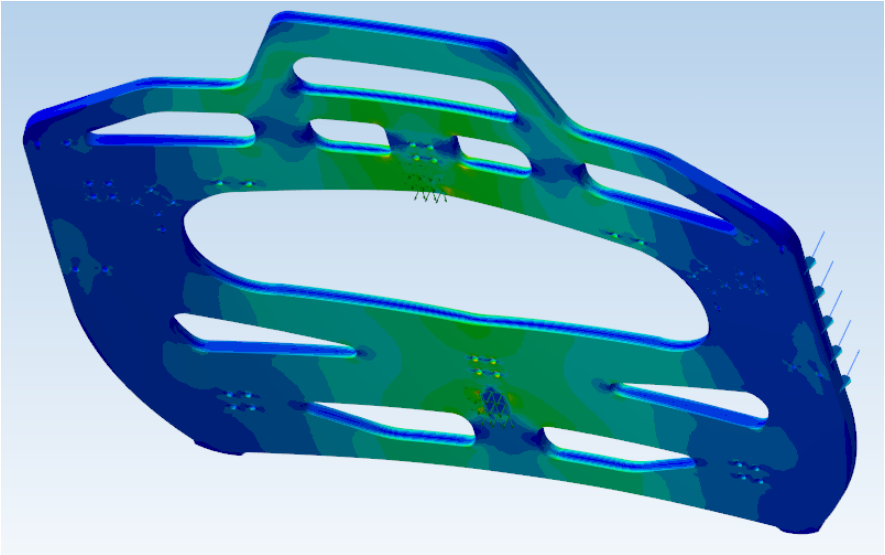


Рисунок 14 – Деформация детали при нагрузках

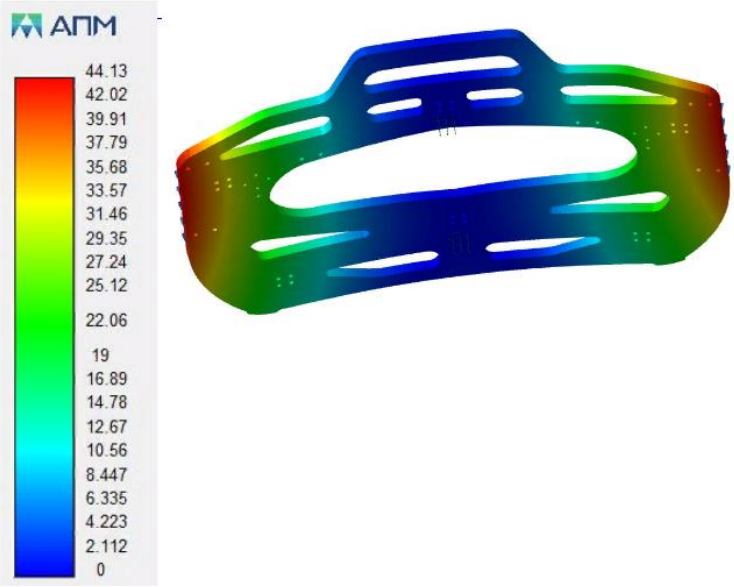


Рисунок 15 – Распределение нагрузок

2.4 Гребной винт подводного аппарата

Рассмотрим, наиболее интересную деталь в подводном [21] аппарате. Для корректного расчета гребного винта, который будет установлен на нашем ПА. Диаметр, а также шаг гребного винта, являются одними из основных, а, следовательно, и важнейшими параметрами, характеризующими гребной винт. От этих характеристик зависят различные параметры, один из таких - степень использования мощности двигателя. При движении корпус судна увлекает за собой воду, создавая попутный поток, поэтому скорость встречи

винта с водой - V_a, будет больше, чем фактическая скорость судна - V. У быстроходных, глиссирующих лодок разница, составляет всего 2-8, а уже у тихоходных значение равняется 15-20% [10].

Корпус судна, спроектирован таким образом, чтобы образовать попутный поток, уменьшая при этом скорость потока вод, натекающей на гребной винт. Это как раз учитывает коэффициент гребного потока – w.

Скорость натекания воды на винт, рассчитывается по формуле (1):

$$V_a=V*(1-w) \quad (1)$$

где V- скорость судна;

Величина, называемая скольжением, характеризует работу лопасти винта под углом аппарата α к потоку воды. Отношение скольжения к теоретической скорости винта в процентах называют относительным скольжением и выражают формулой (2):

$$S = 1 - H * n/V_a \quad (2)$$

где n – частота вращения винта;

Оптимальная величина скольжения винтов, которые имеют отношение, равное H/D <1,2 составляет s= 0.14-0.16; а для винтов, имеющих H/D> 1,2 s = 0.12 – 0.14, где H/D – это шаговое отношение. Если рассматривать легковые быстроходные лодки, то для них необходимы винты с большим шагом или же с большим шаговым отношением H/D, а для тяжелых и тихоходных суден с меньшим.

Если рассматривать обычные двигатели, с диапазоном вращения от 1500 тыс. об/мин, до 5000 тыс. то оптимальное шаговое отношение H/D равняется: для гоночных лодок и суден, способных перейти в глиссерный режим – 0.9 – 1.5; для легких прогулочных суден составляет 0.6 ÷ 3–1,0 и тяжелые тихоходные суда или катера – 0.55 ÷ 0,80. Однако, стоит учитывать факт, что, данные показатели будут принимать именно эти значения, при установившемся вращении мотора, со скоростью 1000 об/мин, что ориентировочно составляет 15 км/ч.

Если говорить непосредственно о винте, как об устройстве, то это деталь, преобразующая вращение вала двигателя в упор, т.е. в силу, которая способствует перемещению судна вперед. Но, если мы рассмотрим вращение винта, то на его лопастях, смотрящих в сторону движения катера т.е. на обращенных создается разрежение. А на нагнетающих, т.е. которые обращены вперед повышающееся давление воды. Таким образом

из-за разности давления возникает подъемная сила Y. И теперь, разложив эту силу на 2 составляющие, мы увидим, что 1 сила направлена в сторону движения судна, а 2 направлена перпендикулярна, это и есть сила P, называемая упором гребного винта и конечно же сила T – сила создающая крутящий момент [11].

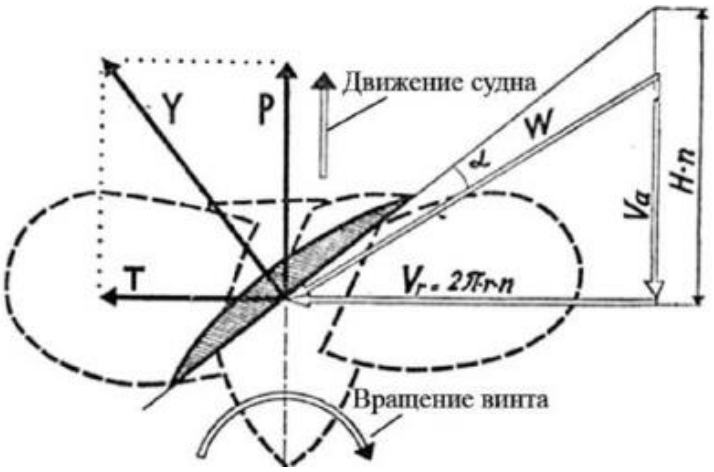


Рисунок 16 – Схема сил и скоростей на
лопасти для винта правого вращения

На рисунке 16, показаны скорости, а также силы, которые воздействуют в конкретном поперечном сечении лопасти. Предположим, что скорость вращения подобного винта выражает V, в свою очередь, зависящая от конкретного радиуса r в некотором сечении, тогда получаем что: $V_r=2\pi rn$, где n – частота вращения конкретного винта выражаемая в об/с. Таким образом, получаем, что – чем больше r, т.е. чем ближе рассматриваемый нами участок к концу лопасти, тем больше окружная скорость движения V, и следовательно и больше суммарная скорость W.

Обратимся снова к рисунку 16, а именно сторону V. Если рассматривать данную сторону в треугольнике, то можно заметить, что она остается постоянной, и по мере удаления сечения лопасти от центра, необходимо разворачивать ее под большим углом к оси винта, чтобы угол по отношению к оси винта оставался оптимальным, т.е. оставался одинаковым для всех сечений [13]. Тем самым получаем постоянный шаг H на винтовой поверхности. Шаг винта характеризует перемещение любой точки лопасти вдоль оси на протяжении оборота винта [22].

Представим гребной винт, который является сам по себе сложной винтовой поверхностью рисунок 17. При работе рассматриваемая лопасть совершает скольжение по направляющим угольникам, имеющих разную длину и радиус, но одинаковую высоту – H,

таким образом за один оборот всегда поднимается на величину Н. Таким образом получаем, что скорость, есть произведение шага, на частоту вращения, вдоль оси винта.

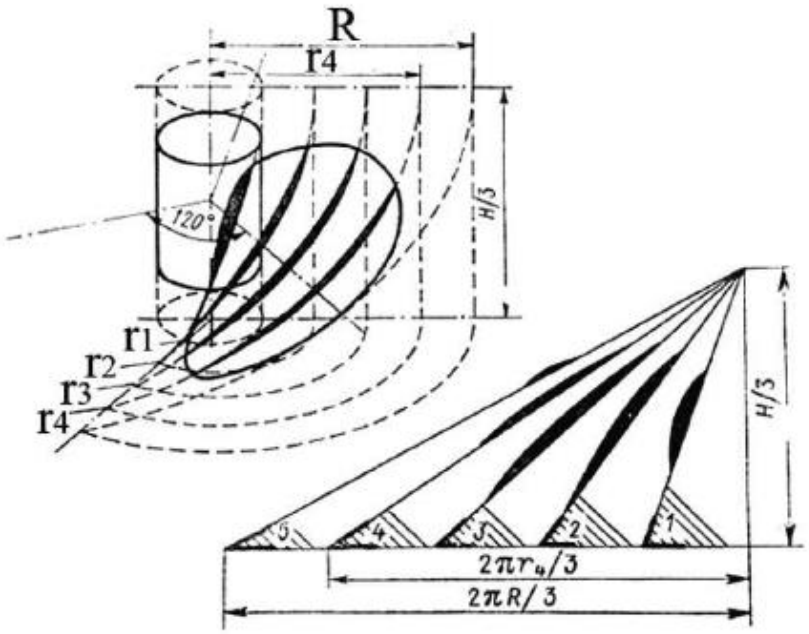


Рисунок 17 – Сложная винтовая поверхность лопасти и угольники шага

Угол атаки лопасти, влияет на упор винта, оптимальное значение угла профиля лопасти находится в пределе 4-8° градусов. Если же угол атаки больше, то мощность двигателя затрачивается не рационально, а если угол атаки слишком мал, то подъемная сила и, следовательно, упор гребного винта будут малыми, и мощность двигателя будет недоиспользованной.

На рисунке 17 показывается взаимодействие между лопастью и водой, угол *a*, можно представить, как отношение между направлением вектора скорости набегающей на лопасть потока, которую обозначим как W и нагнетающей поверхностью. Вектор скорости (3) ока же, образован сложением векторов скорости перемещения винта вместе с судном и скоростью вращения перемещения лопасти, в плоскости перпендикулярной оси винта. Таким образом, сопротивление движение судна можно рассчитать по формуле:

$$R = \frac{\varsigma p * V^2 * \Omega}{2} \qquad (3)$$

где p – плотность воды, равная 1025 кг/м^3;

ς – коэффициент полного сопротивления;

Ώ - суммарная смоченная поверхность, выраженная в м^2.

Сопротивление корпуса судна же, зависит во многом от его формы. Не существует точного описания формы судна, но применяются для расчета различные коэффициенты, значения которых как раз и влияют на ходовые параметры судна.

Полезная мощность, развиваемая винтом, рассчитывается по формуле:

$$N = P(1-t)\frac{Va}{1-w} \quad (4)$$

где P – упор винта,

w – Коэффициент попутного потока,

t – Коэффициент засасывания.

Теперь рассмотрим подробный расчет для винта. Рассмотрим идеальный винт, упор которого равен: $P=mC_a=2mC_a$. Выразим из уравнения массу жидкости m, получим:

$$m = p\frac{\pi D^2}{4}C_a \quad (5)$$

Из этой формулы получим:

$$P = \frac{1}{2}p\pi D^2 C_a^2 \quad (6)$$

$$C_a = \sqrt{\frac{2P}{p\pi D^2}} \quad (7)$$

Упор несущего винта – есть результат сообщения потоку воды, который проходит через лопасти некоторое количество движения. Существует так же полезная мощность идеального несущего винта, который выражается формулой:

$$n_H = \frac{PC_{a1}}{75N} \quad (8)$$

Назовем данную величину *относительным КПД* винта. Относительный КПД винта, определен из сравнения минимальных возможностей мощности, необходимой для создания упора с действительно потребляемой мощностью. Таким образом:

$$n_H = \frac{\sqrt{2P}}{75ND}\sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (9)$$

Для нашего аппарата, характерны D=0.074 м, и мощность двигателя P=0.012 КВт.

$$1 = \frac{\sqrt{2P}}{75 * 0.012 * 0.074}\sqrt{\frac{P}{3.14 * 104}} \quad (10)$$

P = 0, 9 кгс (9 Н)

Так же, гребной винт проектируется исходя из мощности бесколекторного двигателя, и количеству оборотов в минуту. Чем больше лопастей, тем ниже КПД, но при этом при малом количестве лопастей начинают возникать вибрации, таким образом, необходимое число лопастей, можно рассчитать по формуле, которая выражается отношением:

$$K_d = DV_p\sqrt{\frac{\rho}{\mathrm{P}}} \quad (11)$$

где D-диаметр винта, который равняется 74 мм;

V_p-расчетная скорость потока воды м/с:

$$V_p = V(1 - \Psi) \quad (12)$$

где V – скорость протекающей воды 3 м/с;

Ψ-коэффициент попутного потока, равный 0.299, тогда получим:

$$V_p = V(1 - \Psi) = 3 * (1 - 0.299) = 2.103 \quad (13)$$

Теперь подставим наши данные:

$$K_d = 0{,}074 * 2{,}1 * \sqrt{\frac{1{,}025}{9}} = 0{,}165 \quad (14)$$

Так, при условии, что нагрузка является малой, и коэффициент Kd<2, то примем количество лопастей z=3.

Упор в большой степени зависит от угла атаки α профиля лопасти. Оптимальное значение α, для быстроходных катерных винтов 4-8°. Если α больше оптимальной величины, то мощность двигателя непроизводительно затрачивается на преодоление большого крутящего момента. Теперь необходимо рассчитать угол гребного винта, который рассчитывается по формулам:

Рассчитаем набегающий вектор скорости

$$V_r = 2\pi rh \quad (15)$$

Vr=2*3.14*0.38*0.45=10.7

Va=C*a_2/2 (16)

где a – тангенс угла наклона кривой коэффициента a=$\frac{dc_y}{d\alpha}$

Шаг винта - вторая важнейшая техническая характеристика. Шаг винта соответствует расстоянию, на которое винт переместится за один полный оборот в плотной среде (не воде) без проскальзывания. Шаг определяется как угол наклона лопасти к горизонтальной оси крыльчатки и измеряется в дюймах.

H=sin(a)*D*2.54 (17)

Толщина сечения винта t регламентируется ГОСТом-8054-81, принимая во внимание, что винт, относится к «Обычной» группе, и его диаметр менее 0.8 м, то, получаем толщину равную 2 мм.

Так же в модель проектируемой детали, был добавлен дополнительный элемент сборки – защитный кожух винта. Он позволит защитить от случайных попаданий ненужного мусора и сторонних объектов во время работы винта, тем самым сохранив его в целостности. Так же за счет кожуха, будет повышена плотность выходящего потока воды, тем самым увеличится скорость движения аппарата. На рисунке 18 приведен вид данного кожуха в разрезе.

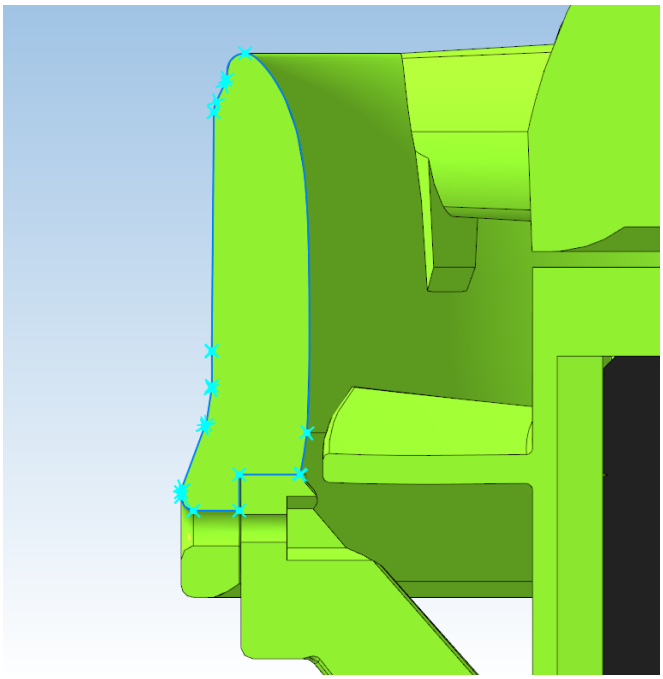


Рисунок 18 – Защитный кожух винта

При разработке подводного аппарата, принципиально важно затрагивать не только внутреннюю компоновку аппарата, но и всю конструкцию в целом, а именно: необходимое количество двигателей, их расположение места расположения, установление второстепенных и основных режимов работы, оценка допустимых диаметров гребных винтов, мощности установленных двигателей, которые размещаются на аппарате.

Расчет двигателя состоит из гидродинамического расчета и расчета прочности. Так же, может получиться, что выбранный двигатель, является более мощным или тяжелым, нежели, это необходимо.

Модельные испытания самого двигателя, наиболее уместно совмещать с испытаниями самого аппарата, при которых важно учитывать и определять не только данные по сопротивлению, но и различные коэффициенты, взаимодействия двигателей и корпуса.

Хотелось бы отметить что для двигателей глубоководных аппаратов, вопросы, кавитации практически не имеют значений, что позволяет в ряде случаев получить гребные винты с более высокими показателями, чем, для надводных судов, однако, если судно должно работать, еще и на поверхности воды, то следует производить дополнительные расчеты. На рисунке 19, приведён мотор, который планируется установить на аппарат.

При расчете винта необходимо:

1) Из конструкторских соображений знать диаметр винта, который в нашем случае D=74 мм. Так же необходимо учитывать плавучесть аппарата, которая у нас положительная. Требуется найти элементы винта, создающие упор P=p, при наименьших затратах мощности.
2) Задан диаметр винта, и мощность приводного мотора N= 80 Вт. Требуется найти элементы винта, создающего наибольший упор.

Рисунок 19 - Рассматриваемый мотор DXW BRF2838

3) Основываясь на характеристики мотора, можем выявить, что его скорость вращения составляет 350 оборотов на вольт, или К=3950 оборотов в минуту.

4) КПД пары винта с мотором, вычисляется по формуле: $\eta = \frac{Rv}{2\pi nM}$ где, R - радиус винта – 37 мм, v-скорость вращения(учитывая, что радиус равен 37 мм, и мотор совершает 1770 об/мин, то скорость составит 24.6 км/ч), М- крутящий момент – 0.28 Н/см. КПД является оценкой эффективности работы гребного винта, его максимальная величина может достигать 70-80%, на малых судах 35-50%.

$$\eta = \frac{0{,}038 * 24{,}6}{2 * 3{,}14 * 1770 * 0{,}0028} * 100 = 30\%$$

Что является приемлемым.

5) Одним из наиболее важных параметров является – тяга винта. Которая выражается по (18) формуле:

$$T = \frac{75P}{v}\eta \qquad (18)$$

где Р – потребляемая мощность в л.с., которая при переводе из ватт, составляет - 0,11 л.с (1 л.с. – 0.74 кВт)

$$T = \frac{75 * 0{,}11}{24{,}6} = 0{,}30 \text{ кгс}$$

Таким образом, получаем, что в дальнейшем, тяга одного мотора составит 3 Н.

2.5 Плавучесть подводного аппарата и стабильность

Сам аппарат по итогу разработке должен иметь нулевой коэффициент плавучести [23]. Но, что же это такое. Для начала необходимо разобраться во всех определениях, которые конкретизируют плавучесть и ее свойства. Сам термин плавучесть характеризует свойство погруженного в жидкость тела, оставаться в равновесии, не выходя из воды и не погружаясь дальше, т.е. плавать.

Существует несколько определений, характеризующих виды плавучести: запас плавучесть – характеризует оставаться на плаву, при заданной нагрузке. Данное определение хорошо характеризует корабль, и его свойство оставаться на плаву, при заданных к нему нагрузках. Выражается, как процент объема водонепроницаемых отсеков выше ватерлинии, к общему водонепроницаемому объему. Любое нарушение изоляции ведет к снижению запаса плавучести. Уравнение равновесия плавучести имеет вид:

$$\mathrm{P} = y(V_0 - V_h) \qquad (19)$$

где P – вес судна;

у – плотность воды;

V – погруженный объем;

Нейтральная плавучесть – равна запасу плавучести т.е. возьмем в пример корабль, и его надводную часть, тогда если, объем принятой воды в точности равен запасу плавучести, то можно считать, что плавучесть утеряна, и ее запас равен 0. При таком состоянии любое внешнее воздействие может вызвать уход судна под воду. А различных воздействий, как мы знаем, в воде, достаточно. Именно это характеризует нейтральную плавучесть.

Отрицательная плавучесть - если при приёме воды на судно, ее объем становится, больше чем запас плавучести, то в таких случаях, принято говорить, что судно получает отрицательную плавучесть. В таком состоянии оно не способно плавать, а может только тонуть. Поэтому на судна устанавливают дополнительные и обязательные запасы плавучести, которые не должны быть повреждёнными, для состояния безопасного плавания.

Теперь рассмотри модель разрабатываемого аппарата, основные узлы конструкции которого были спроектированы и рассчитаны. На получившейся модели, которую мы можем увидеть, на рисунках 20 и 21 отмечена точка – центр масс аппарата. Точка находится ниже, центра аппарата, это показывает, то, что при добавлении поплавков, сделанных из пористого пенопласта, аппарат, не будет переворачиваться и всплывать к «верху брюхом». Аппарат будет в дальнейшем ровно погружаться и всплывать.

Поплавковые элементы, будут располагаться, в верхних отведенных под них отсеках, которые надежно прикреплены к корпусу аппарата, и имеют отверстия для свободного протекания через них воды.

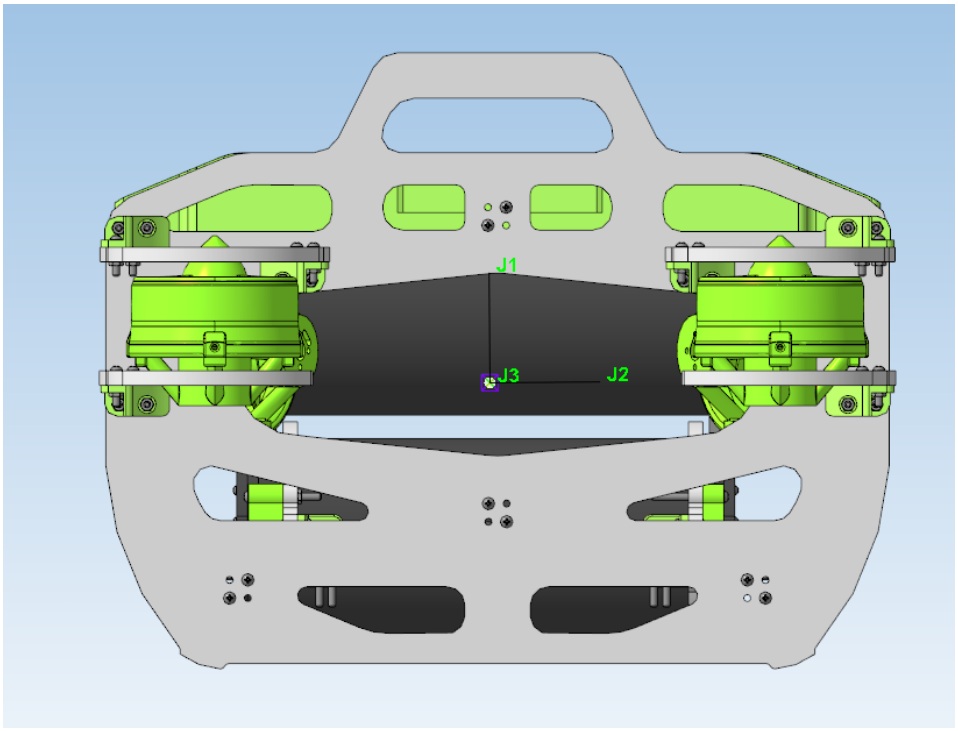


Рисунок 20 – Вид аппарата справа

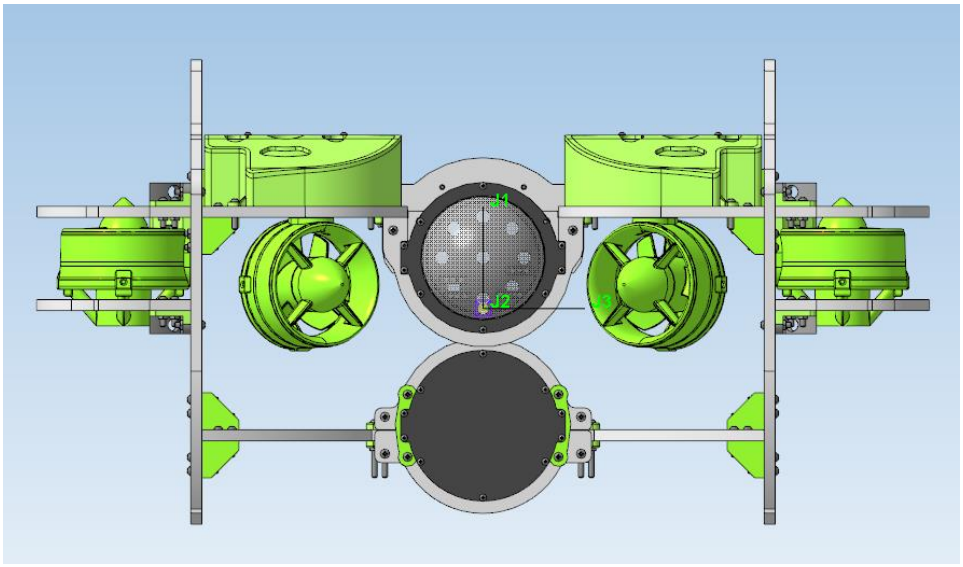


Рисунок 21 – Вид аппарата спереди

Отдельно стоит упомянуть про сопротивление движения тел, о котором было немного сказано, при рассмотрении гребного винта устройства. Сейчас же необходимо рассчитать сопротивление движения аппарата, при его движениях в разных плоскостях. Ведь наше перемещение не ограничено одной плоскостью, аппарат способен осуществлять перемещение, повороты, вращения во всех трёх плоскостях.

Рассмотрим движения нашего аппарата в открытом водоеме. При этом будем учитывать различные параметры, и коэффициенты сопротивлений. Одним из таких является число Рейнольдса, - это безразмерная величина, которая характеризует отношение инерциальных сил, к силам вязкого трения в вязких жидкостях и газах. Критическое число Рейнольдса определяет скорость перехода от ламинарного к турбулентному течению воды. Критическое число Рейнольдса в открытых руслах равно Re=900.

В открытых руслах число Рейнольдса определяют по формуле:

$$Re_{kr} = \frac{(\frac{\mu}{\rho} * R)}{\eta} \quad (20)$$

где η-динамическая вязкость;

μ - коэффициент трения, возникающий между жидкостью и материалом обтекания;

ρ - плотность жидкости в которой находится аппарат;

R - гидравлический радиус;

При небольших скоростях потока, когда число Рейнольдса меньше критического, тонкий слой жидкости прилипает к поверхности цилиндра, образуя так называемый пограничный слой. Толщину пограничного слоя можно определить по формуле.

Число Рейнольдса имеет значение 900 для открытых водоемов при нем ламинарное течение превращается в турбулентное.

$Re(kr) = 900$, а l = 0.464 – характерный линейный размер обтекаемого тела, тогда получаем, что:

$$H = \frac{l}{\sqrt{Re(kr)}} = 0.0155 \quad (21)$$

Рассмотрим сопротивления тела, при скорости 2 м/с, тогда примем, что C – коэффициент лобового сопротивления, который имеет различные значения, зависящие от формы тела, рисунок 22, в нашем случае принимает значение, равное 1,32. Т.к. наше тело не является сильно выгнутым, или же хорошо обтекаемым, поэтому возьмем максимальное принимаемое значение.

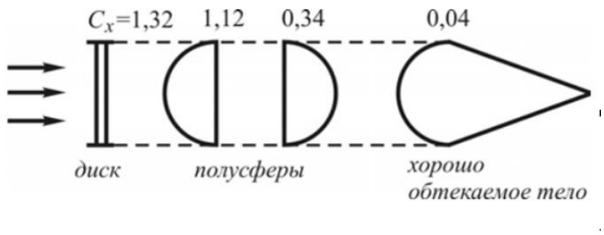


Рисунок 22 – Зависимость сопротивления от формы тела

Рассмотрим 3 проекции робота, рисунки 23, 24, 25, так проекция спереди будет принимать значение, равное:

$$Fc = C * S * \frac{p*v^2}{2} = 0.199 \text{ (Н)} \quad (22)$$

где v = 2 м/с – предполагаемая скорость движения подводного аппарата;

p = 1.025 плотность воды;

S = 0,073874 м^2 – лобовая площадь обтекаемого тела;

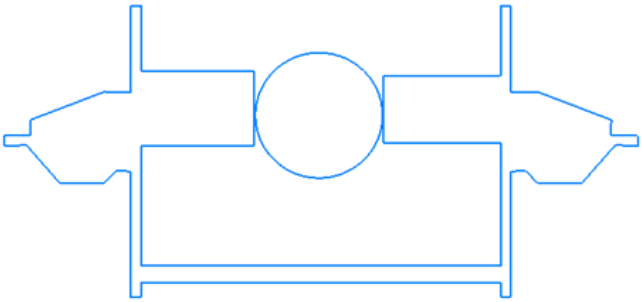


Рисунок 23 – Проекция аппарата спереди

Рассчитаем теперь боковое сопротивление нашего аппарата, то той же формуле, но со значением площади аппарата, равной S2 = 0.212 м^2, тогда получаем:

$$Fc2 = C * S2 * \frac{p*v^2}{2} = 0.5737 \text{ (Н)} \quad (23)$$

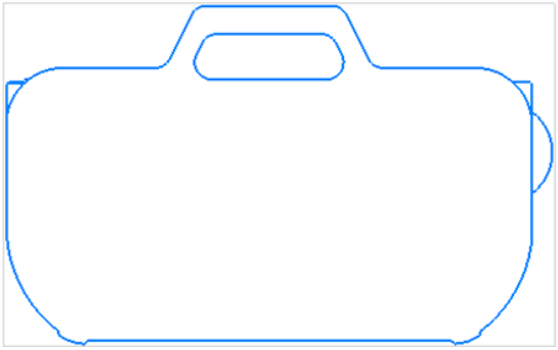


Рисунок 24 – Проекция аппарат справа

Рассчитаем теперь сопротивление нашего аппарата при его подъеме или вертикальном погружении, то той же формуле, но со значением площади аппарата, равной S3 = 0.245 м^2, тогда получаем:

$$Fc3 = C * S3 * \frac{p*v^2}{2} = 0.663 \text{ (Н)} \quad (24)$$

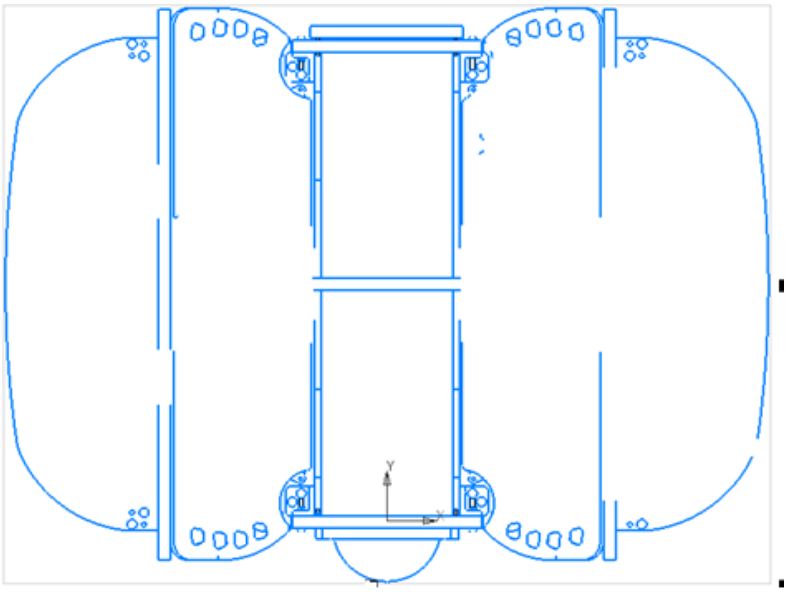


Рисунок 25 – Проекция аппарата сверху

Таким образом, полученные величины, будут характеризовать в дальнейшим силу сопротивления, и будут вычитаться из полученных сил действий. Тем самым увеличивая правдоподобность теоретического материала, который в дальнейшем будет реализовываться практически на готовом аппарате.

2.6 Расчет электронной компонентной базы аппарата

Перед началом всякого расчета, необходимо составить план, по которому будет реализовываться расчет. В особенности стоит рассмотреть группировку компонентов, которые будут применяться в данном робототехническом комплексе. Для осознания и понимания того, как будет устроена внутри электронная часть аппарата, была разработана структурная электрическая схема, отражающая все основные узлы системы (Рисунок 26).

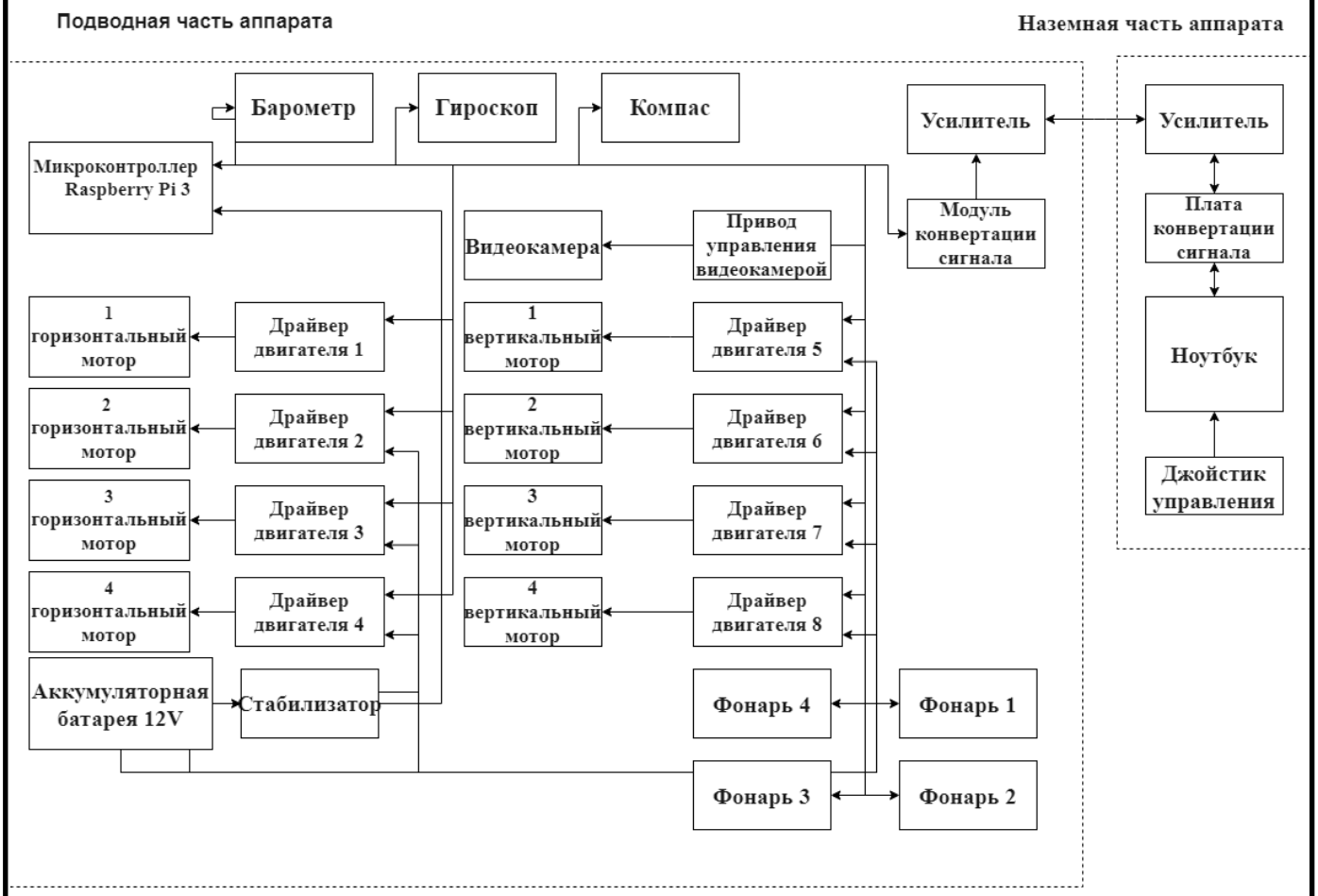


Рисунок 26 – Общая структурная схема системы

Изучив данную схему, можно заметить, что будет так же и наземная станция, которая будет представлять из себя ноутбук пользователя, и плату выхода, которая будет передавать видео поток, и показания с датчиков непосредственно на экран оператора. Таким образом, можно избавить от переноски кейс, который достаточно часто включают в сборку. В подобных кейсах находится: экран, основные кнопки управления, иногда джойстик, отвечающий за ориентацию аппарата под водой.

Рисунок 27 – Кейс управления аппаратом

Довольно часто, производители используют подобное оборудование - рисунок 27. Если на борту телеуправляемого необитаемого подводного аппарата, не имеется собственного источника питания. Обычно электрическая последовательность подключения подобных комплексов, строится следующим образом: генератор, кейс, аппарат. Если это испытания аппарата в помещении, то генератор заменяется обычной розеткой на 210-230V. Если же поездки являются выездными, то используется в большинстве своем бензиновые генераторы переменного тока. Обеспечивающие электропитание, как самого кейса, так и подводного аппарата, что в большинстве случаев крайне неудобно, т.к. накладывает ряд ограничений. Но, при использовании ТНПА, со встроенным источником питания, и управляющую станцию, как ноутбук пользователя, то это дает на много больше гибкости в применении данного комплекса, и не заставляет таскать с собой тяжелые сторонние предметы.

После составления структурной схемы, следует переходить к составлению принципиальной электрической схемы. Данный тип схем, необходим для передачи, с помощью графических элементов и буквенно – цифирных обозначений связей, между элементами электрического устройства. В данном робототехническом комплексе, хотелось бы применить собственноручно разработанный электронные платы, для управления моторами. Основами будут служить микросхемы MC33035P рисунок 27 и MC33039DG рисунок 28.

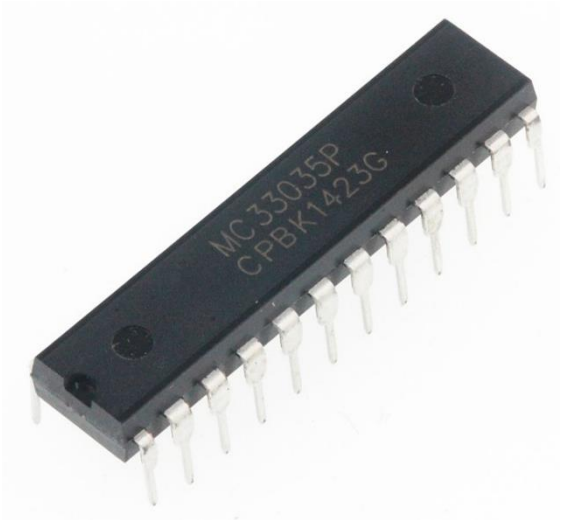


Рисунок 28 – Микросхема MC33035P

Микросхема MC33035P служит для управления бесщеточными двигателями постоянного тока. Ее основные параметры:

- Работа от 10 до 30 В.
- Блокировка пониженного напряжения.
- Вывод 6.25 В, способного обеспечить питание датчика.
- Внутренняя Тепловая Защита.
- Дискретные фазировки датчика 60° / 300° или 120° / 240°.
- Может эффективно управлять щеточными двигателями постоянного тока с внешним мосфет транзистором, с Н-мостом.

Микросхема MC33039DG рисунок 29 высокопроизводительный регулятор скорости, специально разработанный для управления бесщёточными моторами. Его внедрение в схему, позволит более точно осуществлять регулировку скорости вращения моторов, а, следовательно, и плавность движения, будущего аппарата. Особенностями данной микросхемы являются:

- Улучшенное регулирование при низкой скорости работе двигателя.
- Применение транзисторно-транзисторной логики.
- Работа до 5,5 В от прямого питания.

• Внутренний шунтирующий регулятор позволяет работать от нерегулируемого источника питания.

• Инертное фазирование датчика 120° / 240°.

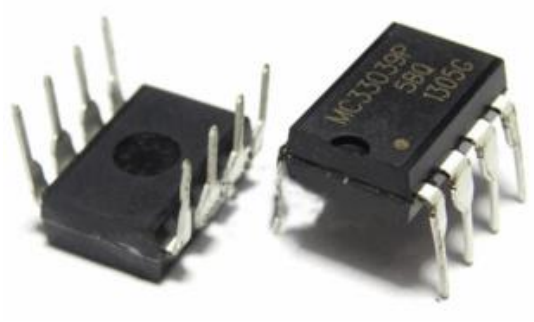


Рисунок 29 – Микросхема MC33039DG

Используя 2 выше упомянутые микросхемы, был спроектирован драйвер двигателя, рисунок 30, позволяющий осуществлять довольно плавное регулирование скорости.

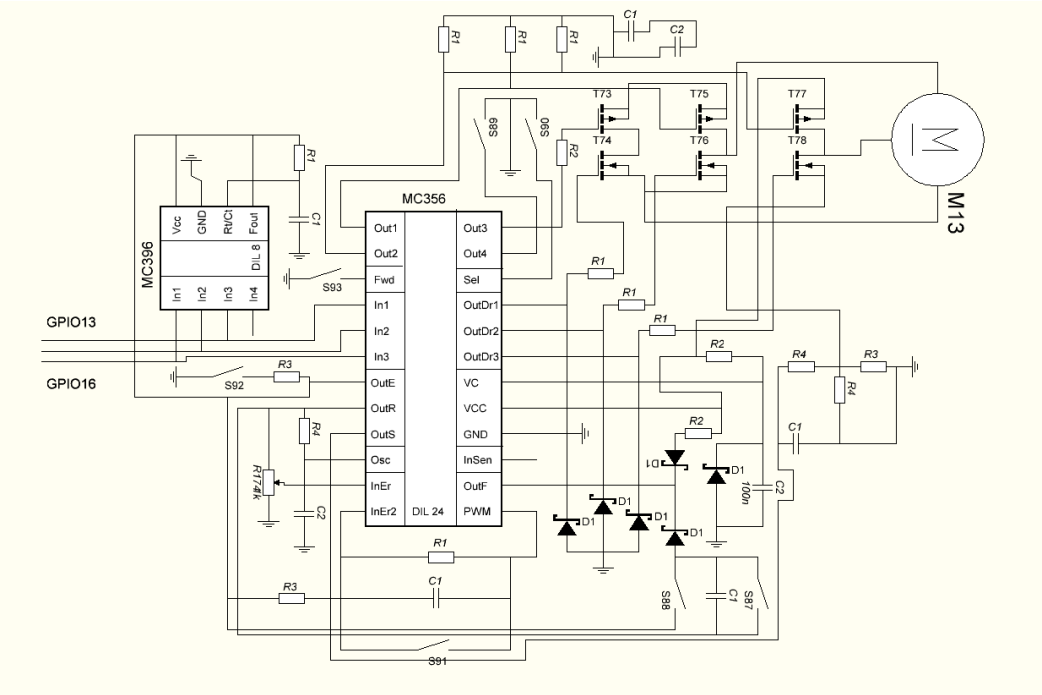


Рисунок 30 – Схема драйвера

После составления его структурной схемы, необходимо сделать печатную плату. На сегодняшний день, получилось реализовать двустороннюю версию платы с перемычками. Большое количество элементов перекрывало друг друга. И было принято решение о проектировке двухсторонней платы. Пример платы, изображен на рисунке 31.

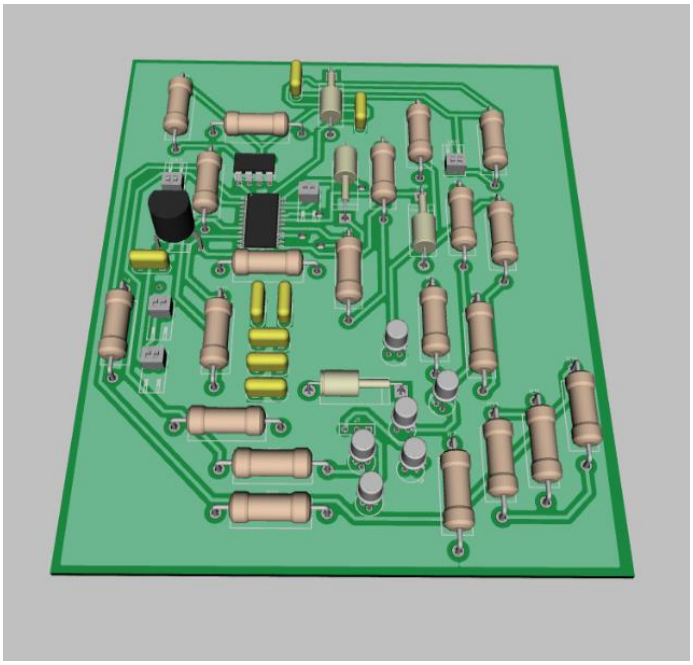


Рисунок 31 – Драйвер двигателя

В дальнейшем, будет произведен сравнительный анализ двух драйверов, изготовленного и покупного.

Основой аппарата, станет одноплатный компьютер Raspberry Pi 3b+. В дальнейшем планируется применять систему технического зрения на аппарате, для выявления определенных контуров и цветов. Технические параметры данного компьютера позволяют ему это делать.

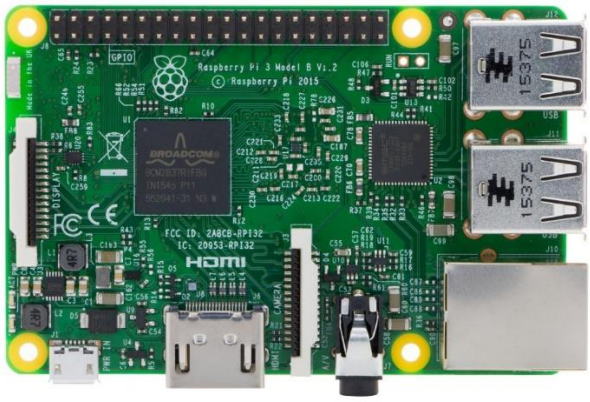


Рисунок 32 - Raspberry Pi 3b+

Если говорить о техническом функционале данного одноплатного компьютера, то они вполне не плохие, и позволяют выполнять множественные операции, в том числе и с систе мой технического зрения. Характеристики платы:

- Процессор: 64-битный 4-ядерный ARM Cortex-A53 на однокристальном чипе BroadcomBCM2837;
- Тактовая частота: 1,2 ГГц
- Оперативная память: 1ГБ LPDDR2 SDRAM;
- Цифровой аудио/видео выход: HDMI;
- Композитный аудио/видео выход: 3,5 мм (4 pin);
- Bluetooth: Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy;
- Порты ввода-вывода: 40;
- Габариты: 85×56×17 мм.

2.7 Расчет аккумуляторных батарей

Для определения времени работы будущего аппарата, необходимо рассчитать емкость аккумуляторов, необходимые ему на борту. Сперва, необходимо определить среднюю мощность подключаемого оборудования в ваттах. Необходимо узнать именно среднее потребление всей системы. Оно может отличаться от максимальной или номинальной мощности, указанной в описаниях оборудования.

К примеру, используемый двигатель, может номинально потреблять 130 Вт, но на деле его расход составляет 80-90 Вт. Это свидетельствует, о том, что двигатель работает не на полную мощность, или же работает в режиме краткосрочного запуска.

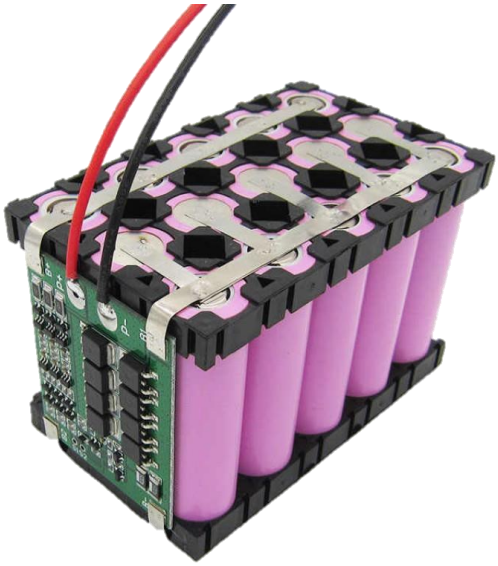


Рисунок 33 – Пример аккумуляторной сборки

Так как в режиме удержания позиции ПА использует краткосрочную работу двигателей то для этого надо найти потребление энергии по промежутку работы.

Начнем с расчета моторов, в данном аппарате применяются моторы DXW BRF2838, у которых максимальное значение тока составляет 7.5 ампер, при напряжении 12 воль, получаем, что суммарная мощность 1 мотора не превышает 90 Вт. За начальные данные возьмем это число.

В режиме удержания позиции двигатели мощностью 90 Вт работают каждые 5 секунд и длительностью в 3 секунды, тогда мощность работы в данном режиме:

$$P_{\text{кр.дв}} = \frac{P_{\text{в.дв}}}{t_0} t_1 \tag{25}$$

где $Р_{в.дв}$ – сумма мощностей вертикальных двигателей.

$Р_{кр.дв}$ – сумма мощностей двигателей в режиме удержания позиции.

t_0 – Время работы двигателя в секундах.

t_1 – Интервал работы двигателя в секундах.

Таким образом получаем:

$$\text{Р}_{\text{кр.дв.}} = \frac{360}{0{,}03} * 0{,}02 = 240 \text{ Вт} \tag{26}$$

Для расчета времени работы в режиме удержания позиции, так же необходимо знать емкость батареи С = 2900 мАч = 2.9 Ач, рабочее напряжение V = 3,7 вольт, полная мощность режима удержания позиции: мощность горизонтальных двигателей 240 Вт, остальное 35 Вт (видеокамера, контроллер, регуляторы двигателей, одноплатный ПК) общая мощность режима 505 Вт. Таким образом получаем:

$$T = C * V * \frac{1}{P_{\text{общ}}} \tag{27}$$

где Т – время работы ПА, в режиме удержания позиции.

$$T = 2{,}9 * (3{,}7 * 52) * \frac{1}{505} = 1.1 \text{ ч} \tag{28}$$

Аппарат будет способен находиться под управлением оператора 1 час и 10 минут, при условии, что работают 8 двигателей, при их средней мощности в 60%.

Таким образом, можно рассчитать время работы ПА, при других режимах: крейсерская скорость, режим прижатия к дну, режим вертикального погружения, или линейного перемещения, таблица 2.

Таблица 2 – Соотношения мощности и времени работы аппарата

№	Наименование режима	Описание режима.	Потребляемая мощность	Время работы в часах
1	Крейсерская скорость	Аппарат движется с максимальной скоростью – 1 м/с.	300 Вт	1,85
2	Прижатия ко дну	Работают лишь горизонтально расположенные винты с мощностью 30 %	140 Вт	4
3	Вертикальное погружение	Работают горизонтальные двигатели со скоростью 1 м/с	260 Вт	2,1

2.8 Износостойкость и ремонтопригодность. Анализ эксплуатационного ресурса

Если говорить о износе, как о механическом явлении, то такой процесс, происходит в виду воздействия механических, физических или химических факторов. Механический износ различных деталей и компонентов, проявляется в пластической деформации поверхности изделия. Большое влияние на подобное воздействие, оказывает сила трения, возникающая при взаимодействии сопряженных деталей.

Механический износ – неизбежный естественный процесс. Основная задача, при эксплуатации, различного оборудования, является в обеспечении условий, уменьшающих

скорость износа, и поддержание компонентов устройства в надлежащем состоянии. Помимо механического износа, имеет место быть процессу старения материалов. При старении происходит диффузионное перемешивание атомов материала. Если говорить о металле, то в нем происходит распад структур, и изменение химического состава.

Для описания процесса старения, во время эксплуатации аппарата используют экспоненциальное уравнение, вида:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \exp(-K\tau e^{-\frac{u}{E}}) \quad (29)$$

где σ и σ_0 – текущая, и начальная прочность материала;

τ – время;

К – константа;

Е, u – энергия активации, и энергия процесса старения соответственно;

Если же мы говорим о материале, который полимер, то, его старение происходит с большей скоростью, чем у металлов, и уравнение реакции будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dc}{d\tau} = -kc = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)c \quad (30)$$

где с – концентрация молекул не затронутых разрушения;

k – константа скорости реакции;

k_0 – пред экспоненциальный множитель;

Т – температура;

К,R – газовые постоянные;

2.9 Расчет надежности плат управления. Расчет показателей безотказности. Расчет ремонтопригодности

При расчете электронных схем, проектируемого устройства, необходимо знать величину безотказности работы элементов РЭУ.

Таблица 3 – Интенсивность отказов элементов РЭУ

Группа однотипных элементов	**Количество элементов в группе**	**Интенсивность отказа для элементов** 10^{-6} $ч^{-1}$	**Произведение** 10^{-6} $ч^{-1}$
1	2	3	4
Резисторы постоянные непроволочные (ток постоянный), конденсаторы керамические	63	0,05	3,15
Конденсаторы электролитические, микросхемы аналоговые	29	0,55	15,95
Резисторы переменные	10	0,5	5
Трансформаторы, стабилитроны	2	0,9	1,8
Соединения пайкой (ток постоянный)	405	0,04	16,2
Плата, диоды	8	0,2	1,6

Данная таблица отражает параметры надежности, того или иного элемента, входящей в состав некоторой системы. Данные значения, являются табличными, и были определены практическими методами. Табличное значение, в размерности 10 в степени -6, обозначает отказ на миллион часов работы.

Следовательно, если при работе аппарата, исключить внешние факторы, к которым относятся: нарушение герметичности корпуса, падения аппарата, нарушение норм хранения, и др. То работоспособность электронной компонентной базы, будут составлять, как минимум 40 000 рабочих часов.

3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Управление подводным роботом осмотрового класса, кинематика движения

Для описания кинематики [24] и вывода уравнений движения, необходимы системы координат: неподвижная, связанная, скоростная. Неподвижную обозначим, как: O_o, x0, y_0, z_0; связанная, или подвижная система координат будет записана, как: O_p, x_p, y_p, z_p; и наконец скоростная: O_s, x_s, y_s, z_s;

Неподвижная система координат, является нашим началом, с точкой старта O_o, связанная же система координат, используется для анализа движения, где точка O_p является центром масс нашего объекта, и пересекаются оси: O_px, O_py, O_pz, и наконец подвижная система координат так же жестко связана с центром масс, но оси, O_sx_s, O_sy_s, O_sz_s параллельны соответственно, O_ox_0, O_oy_0, O_oz_0 рисунок 34.

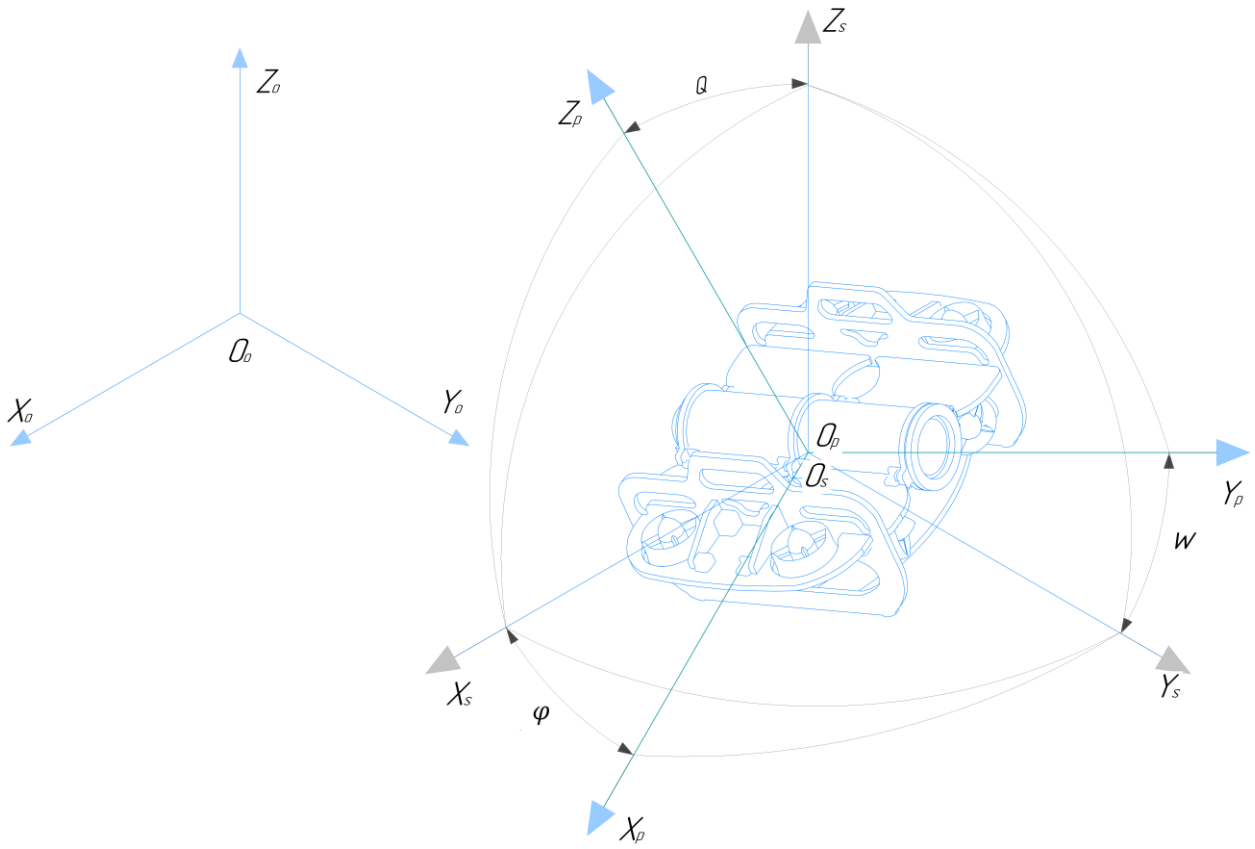


Рисунок 34 - Системы координат и их расположение

					БР.15.03.06.02.2020.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Гладышев М.Д.			3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Выборнов Н.А.				У	49	
Н. Контр.		Козлова И.А.				АГУ ДРТ-41		
Утверд.		Ключарев А.Ю.						

Для каждого из углов Эйлера [12], нам необходимы преобразованные координаты, которые представляют из себя матрицу размерами 3*3. Для каждой из осей существует своя матрица. Запишем для каждой из оси исходную матрицу поворота.

Любое вращение в трёхмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трёх ортогональных осей (например, вокруг осей декартовых координат). Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трёх матриц поворота.

$$M_X(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$M_Y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\omega) & 0 & \sin(\omega) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\omega) & 0 & \cos(\omega) \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$M_Z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\vartheta) & 0 & \sin(\vartheta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\vartheta) & 0 & \cos(\vartheta) \end{pmatrix} \quad (33)$$

В результате получаем матрицу преобразованя координат, которая свзяывает неподвижную систему координат O_o, x0, y_0, z_0; и подвижную систему координат O_p, x_p, y_p, z_p; которая привязанная к аппарту.

$$M(\varphi, \omega, \vartheta) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} \quad (34)$$

где: $M_{11} = cos(\varphi) * cos(\psi)$ (35)

$$M_{12} = -cos(\varphi) * sin(\psi) * cos(\vartheta) + sin(\varphi) * sin(\vartheta) \quad (36)$$

$$M_{13} = cos(\varphi) * sin(\psi) * sin(\vartheta) + sin(\varphi) * cos(\vartheta) \quad (37)$$

$$M_{21} = sin(\psi) \quad (38)$$

$$M_{22} = cos(\psi) * cos(\vartheta) \quad (39)$$

$$M_{23} = -cos(\psi) * sin(\vartheta) \quad (40)$$

$$M_{31} = -sin(\varphi) * cos(\psi) \quad (41)$$

$$M_{32} = sin(\varphi) * sin(\psi) * cos(\vartheta) - cos(\varphi) * sin(\vartheta) \quad (42)$$

$$M_{33} = -(sin(\varphi) * sin(\psi) * sin(\vartheta) + cos(\varphi) * cos(\vartheta) \quad (43)$$

Введем, некоторые термины, характерезующие повороты аппарата в разных плоскостях. Так в дальнейшем будем апперировать терминами: рысканье, тангаж, крен. Это углы, отвечающие за повороты в различных плоскостях, так рысканье – поворот вокруг оси OZ, тангаж – поворот вокруг оси OY, и наконец крен – угол поворота вокруг OX .

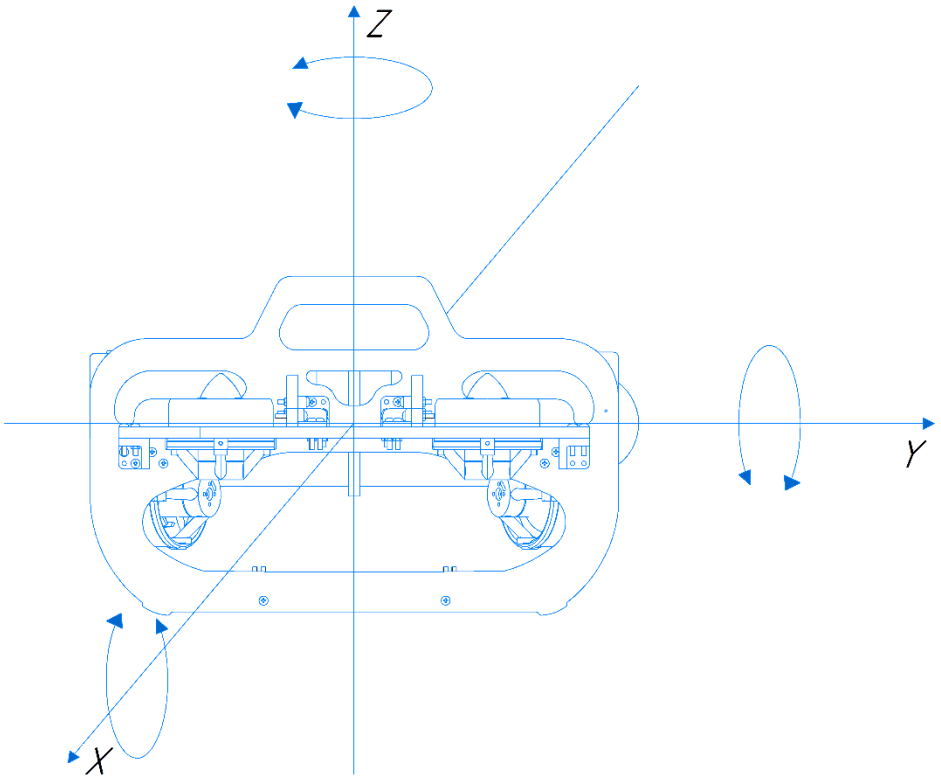


Рисунок 35 – Наглядное изображеие углов рысканье, тангаж, крен

Для стабильного движения подводного аппарата, при его установившемся движении, необходимо выполнение некоторых условий, а именно:

$$\begin{matrix} V_{Ax} = const & \omega_x = const \\ V_{Ay} = const & \omega_y = const \\ V_{Az} = const & \omega_z = const \end{matrix} \quad (44)$$

Необходимо сделать преобразование для записи линейного вектора скорости, таким образом получаем:

$$V_A = \begin{pmatrix} V_{MX} \\ V_{MY} \\ V_{MZ} \end{pmatrix} = M(\varphi, \omega, \vartheta) * V = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{23} & M_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} \quad (45)$$

Вектор скорости в данной системе координат имеет направление, которое определяется углами α, β.

Угол β – угол, между вектором скорости и связанной системой координат: O_p, x_p, y_p, z_p. Угол α – угол между вектором скорости и осью Ox связанной системы координат, который проецируется на продольную ось. При этом угол α отсчитывается от вектора скорости.

Таким образом, проекции скорости на оси связанной системы координат имеют вид:

$$\begin{pmatrix} V_{Ax} = V * \cos(\beta) * \cos(\alpha) \\ V_{Ay} = -V * \sin(\alpha) * \cos(\beta) \\ V_{Az} = V * \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (46)$$

3.2 Динамическое движение, вывод уравнений движения подводного аппарата

Существуют различные методы расчета и вывода уравнений движений подводных аппаратов [9], главное их отличие зключется в том, что аппараты могут быть закрыты (форма торпеды) и открыты (некоторые из элементов проницаемы). Наш аппарат оносится ко 2 группе.

Рассмотрим неподвижную систему координат O_o, x_0, y_0, z_0; В которой происходит движение нашего аппарата [25], который мы будем рассматривать как твердое тело. Запишем классические уравнения движения ПА в O_o, x_0, y_0, z_0;

$$\frac{d\overline{K}}{dt} = \overline{R}\,;\ \frac{d\overline{L}}{dt} = \overline{M} \quad (47)$$

где K- главный вектор импульса, R-является главным вектором, L-главный момент импульса, M-главным моментом.

Далее, рассмотрим подвижную систему координат O_p, x_p, y_p, z_p,, которая жестко связанна с нашим аппаратом. Уравнения движения ПА имеют в ней вид:

$$\frac{d\overline{K}}{dt} + \overline{\Omega} * K = \overline{R}\,;\ \frac{d\overline{L}}{dt} + \overline{\Omega} * \overline{L} + \overline{v} * \overline{K} = \overline{M} \quad (48)$$

В данной системе координат начало отсчета движется с линейной скоростью v, а ПА вращается с угловой скоростью Ω. Далее, необходимо привести предыдущие 2 векторных уравнения к 6 скалярным.

$$\frac{d\overline{K_x}}{dt} + \overline{\omega}_y K_z - \overline{\omega}_z K_y = \overline{R_x}\,; \quad (49)$$

$$\frac{d\overline{K_y}}{dt} + \bar{\omega}_z K_x - \bar{\omega}_x K_z = \overline{R_y}; \quad (50)$$

$$\frac{d\overline{K_z}}{dt} + \bar{\omega}_x K_y - \bar{\omega}_y K_x = \overline{R_z}; \quad (51)$$

$$\frac{d\overline{L_x}}{dt} + \bar{\omega}_y L_z - \bar{\omega}_z L_y + \bar{v}_y K_z - \bar{v}_z K_y = \overline{M_x}; \quad (52)$$

$$\frac{d\overline{L_x}}{dt} + \bar{\omega}_y L_x - \bar{\omega}_x L_z + \bar{v}_z K_x - \bar{v}_x K_x = \overline{M_y}; \quad (53)$$

$$\frac{d\overline{L_z}}{dt} + \bar{\omega}_x L_y - \bar{\omega}_y L_x + \bar{v}_x K_y - \bar{v}_y K_x = \overline{M_z}; \quad (54)$$

Для того, чтобы упростить уравнения, необходимо представить проекцию импульса и момента импульса через кинетическую энергию, таким образом мы получим:

$$K_x = \frac{dW}{dv_x} \quad K_y = \frac{dW}{dv_y} \quad K_z = \frac{dW}{dv_z} \quad (55)$$

$$L_x = \frac{dW}{dw_x} \quad L_y = \frac{dW}{dw_y} \quad L_z = \frac{dW}{dw_z} \quad (56)$$

$$W_A = \frac{1}{2}m\left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right) + mv_x\left(w_y z - w_z y\right) + mv_y(w_z y - w_x y) + mv_z\left(w_x y - w_y z\right) + \frac{1}{2}J_{xx} * w_x^2 + \frac{1}{2}J_{yy} * w_y^2 + \frac{1}{2}J_{zz} * w_z^2 - J_{xy}w_x w_y - J_{xz}w_x w_z - J_{zy}w_z w_y \quad (57)$$

где m-масса ПА, x_c y_c z_c – координаты его центра, J_{xx} J_{yy} J_{zz} – моменты инерции, и, J_{xy} J_{yz} J_{zx} – центробежные моменты инерции.

$$J_{XX} = \int (y^2 + z^2)dm \; ; \; J_{XZ} = \int yzdm \; ; \quad (58)$$

Далее, преобразуем выражение, связанное с W_A в матричную форму:

$$W_A = 0.5[v^T \acute{\Omega}^T] I \begin{bmatrix} v \\ \acute{\Omega} \end{bmatrix} \quad (59)$$

где $v=[v_x \; v_y \; v_z]^T$ и $\acute{\Omega}=[w_x \; w_y \; w_z]^T$ – матрицы линейной и угловых скоростей ПА;

I – матрица инерциальности ПА, рассматривающая его, как абсолютно твердое тело.

$$I=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_c & -my_c \\ 0 & m & 0 & -mz_c & 0 & mx_c \\ 0 & 0 & m & my_c & -mx_c & 0 \\ 0 & -mz_c & my_c & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_c & 0 & -mx_c & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_c & mx_c & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (60)$$

В случае, если начало координат связанной системы координат совмещено с центром масс ПА, то его координаты, имеют значение, равное $x_c=y_c=z_c=0$, а также центробежные моменты $J_{xy}=J_{yz}=J_{zx}=0$; При допущениях выражение кинетической энергии упрощается, тем самым ее можно представить, как сумма кинетической энергии поступательного движения центра масс и вращательного вокруг осей, которые проходят через центр масс [5]. Таким образом, получаем:

$$W_B = 0.5[v^T{}'\Omega^T]I_B\begin{bmatrix} v \\ {}'\Omega \end{bmatrix} \quad (61)$$

где I_B-матрица присоединительных масс и моментов инерции для элементарного объема dV, будет иметь следующий вид:

$$I'_B=\rho\begin{bmatrix} dV & 0 & 0 & 0 & z_c dV & -y_c dV \\ 0 & dV & 0 & -z_c dV & 0 & x_c dV \\ 0 & 0 & dV & y_c dV & -x_c dV & 0 \\ 0 & -z_c dV & y_c dV & (z^2+y^2)dV & -yxdV & -xzdV \\ z_c dV & 0 & -x_c dV & -xydV & (z^2+x^2)dV & -yzdV \\ -y_c dV & x_c dV & 0 & -xzdV & -yzdV & (x^2+y^2)dV \end{bmatrix} \quad (62)$$

где V_1-объем ограниченной внутренней поверхности ПА;

V_2-объем пространства, занимаемый наружной поверхностью;

Однако, такое выражение не удобно для представления и использования, следовательно, можно упростить, полагая, при этом, что, матрица кинематических параметров содержит элементы, которые можно принять, в качестве линейных и угловых скоростей, тогда, можно преобразовать:

$$W_A = 0.5[v^T{}'\Omega^T]I\begin{bmatrix} v \\ {}'\Omega \end{bmatrix} + 0.5[v^T{}'\Omega^T]I_B\begin{bmatrix} v \\ {}'\Omega \end{bmatrix} \quad (63)$$

3.3 Математическая модель управляемого движения подводного аппарата

Пространственное движение подводных аппаратов, обычно описывается в 6-ти степенях свободы [26], включая независимые координаты, необходимые для описания расположения и ориентации. Они записываются в виде системы нелинейных векторно-матричных дифференциальных уравнений, и имеют следующий вид:

$$f(x(t))\, e[c_1, c_2]x(t) = M_1(t) \cdot c_1x(t) + M_2(t) \cdot c_2x(t) \quad (65)$$

Для составления математической модели управляемого движения подводного аппарата можно использовать несколько методик анализа и синтеза [8]. Для большинства подводных аппаратов траекторию движения можно представить, как совокупность отдельных участков его движения в горизонтальной и вертикальных плоскостях. Для создания математической модели движения необходимо рационально воспользоваться различными формами кинематических условий движения для конкретно выбранной плоскости и крена равного 0 [6]. Для вертикальной плоскости справедлива форма:

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ w_z \\ v_x cos\theta - v_y sin\theta \\ v_x sin\theta - v_y cos\theta \end{cases} \quad (66)$$

Для горизонтальной плоскости:

$$f(x, \delta, t) = \begin{cases} D^{-1}(F - BDq); \\ w_y \\ v_x cos\Psi - v_y sin\Psi \\ v_x sin\Psi - v_y cos\Psi \end{cases} \quad (67)$$

где x – вектор состояния;

δ – Вектор управляющих воздействий;

q – Вектор обобщённых скоростей;

F – Вектор внешних сил и моментов;

D – Матрица присоединённых масс;

B – Матрица обобщённых скоростей;

V_x, V_y, V_z – линейные скорости движения;

ω_y, ω_z – угловые скорости движения;

ψ – Угол курса;

θ – Угол дифферента.

На основе данных моделей, в дальнейшем при построении системы контроля выполняется слияние управляющих функций. Система автоматического контроля движения подводного аппарата должна обеспечивать хорошие маневровые способности при обследовании различных объектов, в процессе осмотра которых выполняются необходимые работы. При задавании различных функций контроля, будет строиться нужная траектория, позволяющая маневрировать подводному аппарату, для исследования подводных объектов.

При решении подобных задач, выставляются высокие требования, к качественному управлению и маневрированию, а именно:

- обеспечение точного приведения робототехнического комплекса, в заданное место.
- оптимизация траектории движения, уменьшение отклонения от заданного маршрута по точкам.
- динамическое позиционирование во время выполнения рабочих задач.

Современные требования, к точности движения и наличие нелинейных составляющих принадлежащих объекту управления соответствуют, так называемому принципу несовместимости. Данный принцип состоит в том, что при увеличении точности динамических процессов управляемого движения подводного робота существенно увеличивается неточность и неопределенность самой модели движения, а также описание водной среды, и усложняется процесс математического моделирования.

Проблемы высокоточного управления подводными аппаратами суммарно обнаруживают сильные трудности, из-за нелинейной динамики систем, наличия внешних возмущений и шумов в измерении. В связи с этим, целесообразно применять методы нечеткой логики. Сами же исследования, основанные на данном принципе актуальны, поскольку конкретные прикладные задачи имеют различные условия и параметры, и невозможно создать какую-либо универсальную модель для их решения, которая бы показала одинаковую эффективность при решении отдельно взятой задачи.

Для построения нелинейных систем контроля подводного телеуправляемого аппарата, в нашем случае, необходимо воспользоваться нечеткой моделью TS-типа.

Решение в общем виде можно представить следующим образом. Если предположить, что интересующий нас нелинейный параметр можно описать конкретной функцией вида: x’(t)=f(x(t)), находящийся в некотором «секторе нелинейности». В общем виде данная система описывается матричной формой вида:

$$x'(t)=A\cdot x(t)+D\cdot u(t) \quad (68)$$

где x(t) – вектор параметров нелинейной системы;

u(t) – вектор, характеризующий параметры управления;

A и D – матрицы коэффициентов и параметров этой системы.

В случае, если трудно или крайне проблемно определить общий сектор нелинейности для всей системы, то ее целесообразно разделить на отдельные секторы, и в дальнейшем уже объединить в единое решение.

Нам необходимо найти x’(t)=f(x(t)) c$[c_1, c_2]$ x(t). Из сектора нелинейности рисунка 35. можно определить:

$$f(x(t)) \in [c_1, c_2]\ x(t) = M_1(t)\cdot c_1x(t) + M_2(t)\cdot c_2x(t) \quad (69)$$

uде a(t) – исследуемый нами параметр;

$M_1(t)$ и $M_2(t)$ – нечеткие значения.

При этом, 2 линейных уравнения $c_1x(t)$ и $c_2x(t)$ линеаризуют данную нелинейную функцию рисунок 36.

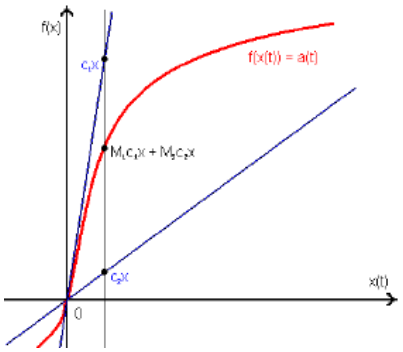


Рисунок 36 – Геометрическое представление локального сектора нелинейности

Таким образом получаем, что $M_1(t)$ и $M_2(t)$, имеют следующий вид:

$$M_1(t) = \frac{a(t)-c_2x(t)}{c_1x(t)-c_2x(t)} \text{ и } M_2(t) = \frac{c_1x(t)-a(t)}{c_1x(t)-c_2x(t)} \quad (70)$$

$M_1(t), M_2(t) \geq 0$ и $M_1(t) + M_2(t) = 1$ (71)

Если говорить о функции принадлежности, a(t), то при использовании выражений (5) и (6) можно получить рисунок 37:

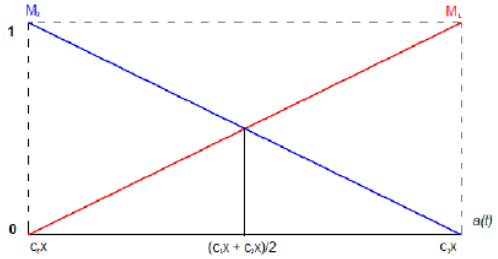


Рисунок 37 – Функция принадлежность a(t)

В дальнейшем, рассматриваемую нелинейную систему, необходимо представить в виде TS – модели. Ее можно представить, как совокупность линейных уравнений, и имеющих вид «ЕСЛИ… , ТО…», они зависят от функциональной принадлежности. Пример:

ЕСЛИ: $a_1(t)$ – является M_{i1} , и … и $a_p(t)$ соответствует M_{ip}

ТО: $x'(t) = A_i x(t) + D_i u(t)$, i=1,2,3…, q.

где $a_p(t)$ – вектор, содержащий некоторые из переменных, где p – их число;

i – количество правил;

M_{ip} – нелинейный набор значений.

Теперь мы можем вывести окончательный результат для данной нелинейной системы:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{q} h_1\left(a(t)\right)[A_i x(t) + D_i u(t)] \quad (72)$$

где $h_1\left(a(t)\right) = \sum_{i=1}^{q}[A_i x(t) + D_i u(t)]$ является весомой функцией для i-числа.

Для примера подставим в выражение (60) новую нелинейную модель, которая компенсировала бы ошибки изменения вектора состояния подводного робота – неопределенность измерения угловой и линейной скоростей, при маневрировании на глубине.

Тогда, получаем в этом случае:

$$x(t) = [V_x, V_y, \omega_z, \theta, \xi, \eta]\ T, \quad (73)$$

Где V_x и V_y – линейная скорость по осям x и y,

ω_z – угловая скорость,

θ – угол дифферента,

ξ и η – координаты центра тяжести;

Далее составим равенство вида:

$$u(t) = f(\tau), \tag{74}$$

где $\tau = \delta(t)$ – некоторое управляющие воздействия, зависящее от приложения различных сил, а также влияние перекладки рулей.

Теперь нам необходимо произвести ряд математических преобразований, а затем и упрощений. Если записать модель движения подводного аппарата, то она будет применять следующий вид:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{m_{11}} & 0 & \frac{m_{22}}{m_{11}} \cdot V_Y & \frac{a_2}{m_{11}} & 0 & 0 \\ -\frac{m_{11}}{m_{22}} \cdot \omega_Z & 0 & \frac{a_5}{m_{22}} & \frac{a_6}{m_{22}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_{10}}{m_{66}} & \frac{a_{11}}{m_{66}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_8}{m_{22}} \\ \frac{a_{13}}{m_{66}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) \tag{75}$$

Где *m* и *a* – массовые и гидродинамические коэффициенты подводного аппарата.

Теперь, мы можем создать модель движения, и предположить, что параметры V_y и ω_z не линейны и находятся в пределах V_y при ε[-0.2; 0.2] и ω_z при ε[-0.1; 0.1].

Теперь, если учитывать выражения (64) (65) и (66), то можно получить функцию следующего вида:

$$V_y(t) = M_{11}(V_y(t))\cdot 0{,}2 + M_{12}(V_y(t))\cdot(-0{,}2) \tag{76}$$

Где $M_{11}(V_y(t)) + M_{12}(V_y(t)) = 1$

Тогда, получаем значения следующего вида:

$$M_{11}(t) = \frac{0.2+V_y(t)}{0.4} \text{ и } M_{12}(t) = \frac{0.2+V_y(t)}{0.4} \tag{77}$$

$\omega_z(t) = M_{21}(\omega_z(t)) \cdot 0.1 + M_{22}(\omega_z(t)) \cdot (-0.1)$,

$$M_{21}(\omega_z(t)) + M_{22}(\omega_z(t)) = 1 \tag{78}$$

Тогда получаем:

$$M_{21}(t) = \frac{0.1+\omega_z(t)}{0.2} \text{ и } M_{12}(t) = \frac{0.1-\omega_z(t)}{0.2} \quad (79)$$

Теперь можно воспользоваться TS-моделью и сформулировать правила, которые линеаризуют исследуемую нелинейную модель (69) [1,2]:

1) ЕСЛИ: $V_y(t)=M_{11}$ и $\omega_z(t) = M_{21}$,

ТО: $x'(t) = A_1 \cdot x(t) + D_1 \cdot u(t)$.

2) ЕСЛИ: $V_y(t) = M_{11}$ и $\omega_z(t) = M_{22}$;

ТО: $x'(t) = A_2 \cdot x(t) + D_2 \cdot u(t)$

3) ЕСЛИ: $V_y(t) = M_{12}$ и $\omega_z(t) = M_{21}$,

ТО: $x'(t) = A_3 \cdot x(t) + D_3 \cdot u(t)$

4) ЕСЛИ: $V_y(t) = M_{12}$ и $\omega_z(t) = M_{22}$,

ТО: $x'(t) = A_4 \cdot x(t) + D_4 \cdot u(t)$.

При этом матрицы A и D – элементы, которые вычисляются, учитывая формулы (71) и (73). Таким образом получаем, что нелинейная модель движения подводного аппарата при маневрировании по глубине с двумя различными параметрами – V_y и w_z в пространстве e [-0,2; 0,2] * [-0,1; 0,1] полностью описывается следующим выражением:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{4} h_1\left(a(t)\right)[A_i x(t) + D_i u(t)] \quad (80)$$

где $h_1(x(t)) = M_{11}(V_Y(t)) \cdot M_{21}(w_Z(t))$;

$h_2(x(t)) = M_{11}(V_Y(t)) \cdot M_{22}(w_Z(t))$;

$h_3(x(t)) = M_{12}(V_Y(t)) \cdot M_{21}(w_Z(t))$;

$h_4(x(t)) = M_{12}(V_Y(t)) \cdot M_{22}(w_Z(t))$;

По итогу получаем нелинейную модель движения, основанную на TS-модели, с изменяющимися параметрами, и являющейся совокупностью простых линейных уравнений, которые используют простой набор правил «ЕСЛИ, ТО», они представляют локальные выражения нечетко заданных параметров заданной модели.

3.4 Выбор регулятора

Для того, чтобы осуществить точное управление, необходим качественный регулятор. Мною был выбран ПИД – регулятор. Если говорить о классическом ПИД регуляторе, то его

основой являются 3 элемента: пропорциональный, интегральный и дифференциальный модуль, с собственными коэффициентами, отвечающими за его настройку: K, T_i, T_d.

$$U = K\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (81)$$

Если говорить о непрерывных переменных, то их удобно использовать для анализа и синтеза ПИД – регулятора. Если же говорить о техническом воплощении, то необходимо перейти к дискретной форме управления, так как, основой всех регуляторов, в том числе и ПИД, являются: микроконтроллер, компьютер, и прочие вычислительные модули, которые работают с переменными, которые получены из аналоговых сигналов, после их дискретизации по времени.

Если говорить о переходе к дискретным переменным в уравнении аналогового регулятора, то это выполняется путем замены производных и интегралов их дискретными аналогами. Так же существует множество способов аппроксимации производных, и интегралов, их различными дискретными аналогами, которые рассматриваются в курсах численных методов при решении дифференциальных уравнений. В ПИД – регуляторах, наибольшее распространение получили простейшие аппроксимации производных, с конечной разностью и интеграл конечной суммы. Если подробно рассмотреть интегральную составляющую, то:

$$I(t) = \frac{K}{T}\int_0^i e(t)dt; \quad (82)$$

Продифференцировав обе части по времени, мы получим:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{K}{T_i}e(t) \quad (83)$$

Если заменить дифференциалы в этом выражении конечными разностями, то получим:

$$\frac{I_i - I_{i-1}}{\Delta t} = \frac{K}{T_i}e_i(t) \quad (84)$$

В данном выражении, индекс i обозначает, то, что конкретная величина взята, в момент времени Ti , в данном случае, индекс i в T не обозначает номер временного шага, а обозначает интегральный коэффициент ПИД – регулятора. Далее из уравнения (84), получим:

$$I_i = I_{i-1} + \frac{K*\Delta t}{T_i}e_i \quad (85)$$

Далее, по аналогии получим дифференциальные элементы ПИД – регулятора в конечных разностях:

$$D(t) = KD_t \frac{de(t)}{dt}; \quad (86)$$

$$D_i = \frac{KD_t}{\Delta t}(e_i - e_{i-1}); \quad (87)$$

Теперь необходимо определить начальные параметры регулятора, а именно, его коэффициенты: K_p – пропорциональный коэффициент; T_i – постоянная интегрирования: T_d – постоянная дифференцирования; Определять будем по методу Зиглера-Никольса с транспортным запаздыванием, по формулам:

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau} \quad (88)$$

где T – постоянная времени передаточной функции = 0.5;

K – Коэффициент усиления ШИМ = 1,578;

τ – транспортная задержка = 0.4.

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau} = \frac{1{,}2*0{,}5}{1{,}578*0{,}4} = 0{,}95 \quad (89)$$

$$T_i = 2\tau = 2 * 0.04 = 0.08 \quad (90)$$

$$T_d = T\tau = 0.5 * 0.04 \quad (91)$$

3.5 Моделирование

Для реализации полученной модели управления, необходимо составить блок схему [7], составленную в среде Mat LAB Simulink, рисунок 38.

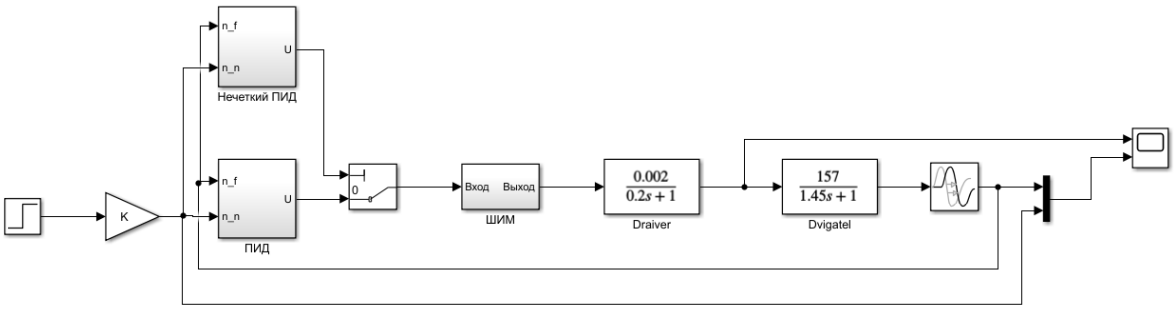


Рисунок 38 – Модель объекта управления

Модель блока ШИМ, представляет из себя подсистему. Работающую следующим

образом: входной постоянный сигнал преобразуется интегратором в линейно изменяющийся. После этого происходит выработка логического сигнала, по которому происходит сброс выходного сигнала, до начального значения, равного нулю. В результате на выходе интегратора формируется пилообразный сигнал, изменяющийся от 0 до 2000, с частотой в 100 Гц. Этот сигнал вычисляется из непрерывного входного сигнала. Если же значение отрицательно, то на блок ШИМа идет значение 10, иначе 0.

В данной модели ПИД регулятора, рисунок 39, присутствует элемент, отвечающий за дискретизацию входных параметров с требуемой частотой. Если описывать это физически это можно представить, как интервал времени, с которым система управления опрашивает датчики. Так же следует заметить, что частота дискретизации, в настройках программы, по которой рассчитывается дифференциальные уравнения, отличается это от той частоты, которую мы задаем.

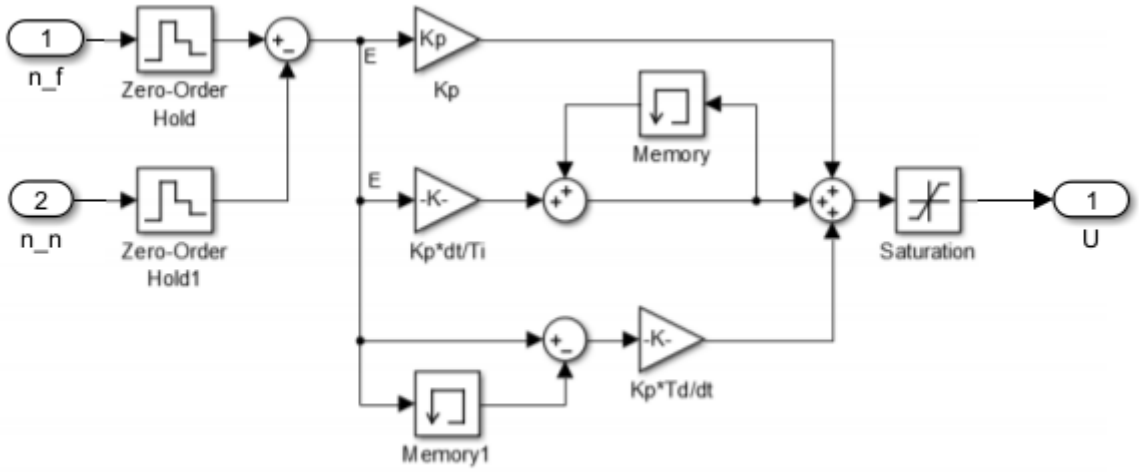


Рисунок 39 – Внутренняя структура ПИД регулятора

Если говорить о границах выхода регулятора, то верхняя граница U=2500, а нижняя U=100 об/мин, которые соответствуют минимально, допустимым скоростям вращения лопастей моторов соответственно. Говоря о периоде дискретизации всей системы, она равна 0.1 с. А опрос датчиков зависит от скорости переходных процессов в объекте – чем он меньше, тем чаще необходимо опрашивать датчики.

Рассматривая Рисунок 40, пунктиром показана величина, которая задается нами, и непосредственно величина, которой регулятор должен привести объект управления. Как видно из рисунка, процесс далек от идеального, или даже приемлемого. Для этого необходимо разобраться в причинах такого поведения.

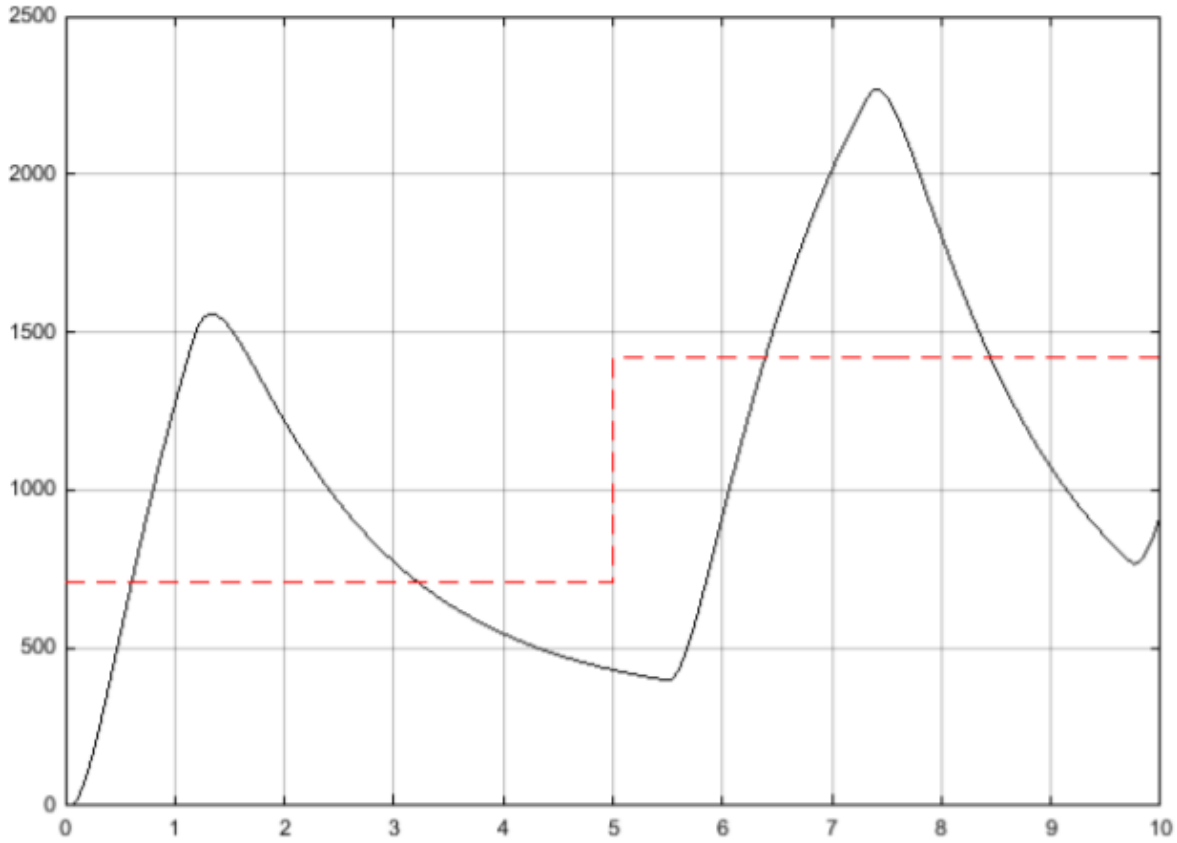


Рисунок 40 – Переходный процесс по частоте вращения ротора двигателя

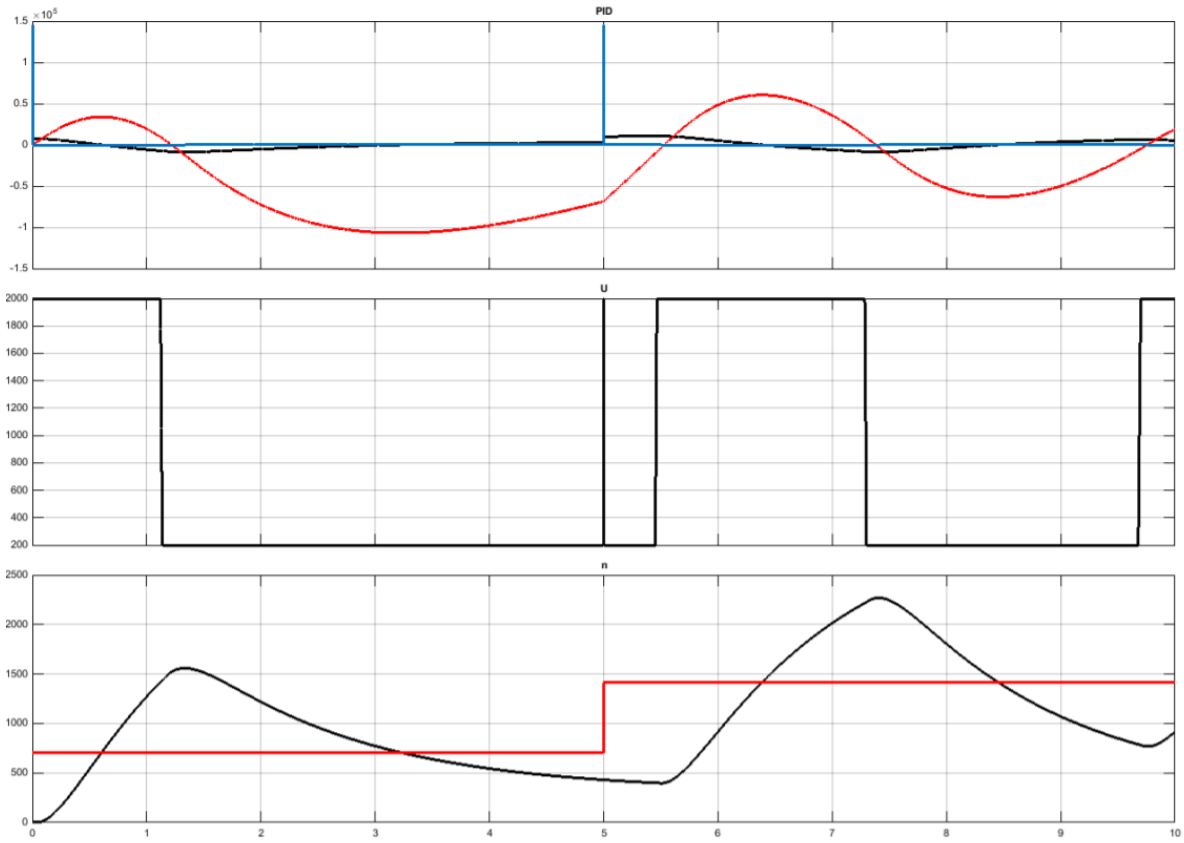


Рисунок 41 – Отклик системы на возмущения

На рисунке 41 рассматривая верхний график приведены переходные процессы, для каждого из элементов ПИД – регулятора. Черным показан пропорциональный коэффициент, красным – интегральный, и синим – дифференциальный. Рассматривая же средний график, на котором представлено значение выходной величины регулятора, с учетом ограничений на выходе. На нижнем же графике приведена частота вращения ротора двигателя. Если исходить из среднего графика, то видно, что основную часть выходного сигнала ПИД – регулятора составляет интегральная составляющая.

При рассмотрении установившегося режима работы, а также при малых возмущениях большинство систем с ПИД – регулятором являются линейными. Но процесс выхода на режим практически всегда требует учета линейности типа «ограничение». Данная нелинейность связана с естественными ограничениями на мощность, так же скорость и частоту вращения, углы вращения и многое другое. Контур же регулирования в системе, находящейся в насыщении, оказывается разомкнутым, так как, при изменении переменной на вход звена с ограничением, его выходная переменная остается без изменений.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Технико-экономическое обоснование

На сегодняшний день подводные телеуправляемые подводные аппараты (ТНПА) оснащаются дополнительным оборудованием, при необходимости. Данное оборудование так же погружается под воду, вместе с аппаратом и управляется либо оператором, осуществляющим контроль самим аппаратом, или же другим пилотом. Подводное обследование с помощью ТНПА, позволяет получить качественные данные со дна, а также при необходимости записать весь процесс, с дальнейшим анализом.

Дополнительное оборудование может быть: дополнительные датчики, манипуляторы, дополнительные камеры, дополнительные фонари, различные локаторы, ультразвуковые маяки.

Для коммерциализации данного аппарата, в идеале можно предположить следующий план: доработка и создание данного робототехнического комплекса, написание и отладка кода его программы, написание приложения для «удобного» управления, настройка интерфейса, пилотные испытания, выставления на докладах, выступление на грантовых конкурсах, поиски спонсоров, пилотные испытания на базе нефтегазовых компаний астраханской области. При успешном завершении каждого из пунктов, в дальнейшем данный робототехнический аппарат займет свой малый процент на рынке, тем самым сможет себя показать и продвинуть. В дальнейшем планируется использовать рабочее название данного продукта, как «SMELCOM ROV».

В данном комплексе применяются довольно интересные узлы конструкций, и дизайн аппарата, получился достойным. В дальнейшем, будут пробы с изменением цветовой палитры аппарата, и по возможности создания 2ух или 3ёх цветовой палитры аппарата, с последующем применением.

Касаемо технических параметров, то для успешной коммерциализации необходимо доработать и увеличить автономность работы аппарата, до 2-ух часов, как минимум в режиме полной работы – работают сразу 8 двигателей, т.е. аппарат может двигаться вперёд и погружаться. На сегодняшний день, получилось лишь обеспечить аппарату минимальный

срок работы в 1 час и 10 минут, что на мой взгляд, кажется недостаточным. Так же необходимо разработать дополнительное навесное об оборудование, которое могло бы идти в комплекте, или закупаться дополнительно с аппаратом.

Так же хотелось бы выставить основные параметры аппарата, для этого была составлена Таблица 4.

Таблица 4 – Основные параметры ТНПА

№	Наименование характеристики	Величина
1	Максимальная глубина погружения	150 м.
2	Скорость передвижения	0,1-1 м/с
3	Число степеней свободы	6 степеней
4	Время автономной работы	До 4 часов.
5	Длина кабеля управления	До 150 м.
6	Оценочная стоимость (изготовления)	150 000 руб.
7	Оценочная стоимость (продажи)	250 000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данный работы, был спроектирован телеуправляемый необитаемый подводный аппарата легкого класса, который способен погружаться на глубины до 150 м, перемещаться со скоростью от 0.1 до 1 м/с, обладает высокими динамическими характеристиками, реализованные с помощью 8 движительных модулей, и пилотного джойстика.

Был спроектирован движительный узел аппарата, состоящий из 4 основных частей, изготавливаемых на 3д принтере, основными элементами которого являются мотор, и гребной винт. Эти 2 основных модуля, были рассчитаны и по итогу был спроектирован гребной винт в программе КОМПАС 3D, а электромотор был подобран, исходя из полученных значений.

На сегодняшний день, данный проект, успел поучаствовать в различных грантовых конкурсах, а также выставлялся для различный акселерационных программ. По итогу, во время участия, многие из экспертов, выразили свою заинтересованность в данном робототехническом комплексе, а также дали ряд значимых советов, в плане его развития. В дальнейшем планируется реализация данного проекта на практике, и интеграция его в различные компании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1) Этапы разработки и внедрения информационно-аналитической системы // Корпоративные хранилища данных. Интеграция систем. Проектная документация. [Электронный ресурс] - Режим доступа https://www.prj-exp.ru/dwh/dwh_stages_of_development.php
2) Рыбаков, А.В. Методические рекомендации по написанию выпускной квалификационной работы для студентов направления подготовки бакалавров. / А.В. Рыбаков, Е.А. Ефимова, В.В. Смирнов, Д.А. Жолобов, 2017.
3) Лопота, А.В. Морские робототехнические комплексы военного и специального назначения / Лопота А.В. Николаев А.Б. –М.: Изд-во Системы управления, связи и безопасности, 2016.
4) Исследование и разработка необитаемых подводных робототехнических систем и комплексов // Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.imtp.febras.ru/podvodnaya-robototexnika.html
5) Матрица поворота в трёхмерном пространстве / Wikipedia [Электронный ресурс] – Режим доступа:https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B0
6) Павловский, В.А. Вывод уравнений движений подводного аппарата /В.А. Павловский Д.В.Никущенко –М.: Изд-во Вестник СПБГУ, 2005. - 62 с.
7) Трунов, А.Н. Математическая модель подводного аппарата –М.: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2017. -23
8) Пшихопов В.Х. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами. / В.Х.Пшихопов, М.Ю.Медведев, Б.В.Гуренко. –М.: Изд-во МКПУ, 2015. – 68 с.
9) Лямина, Е.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона / Е.А. Лямина, С.А. Егоров. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 4 с.

10) Расчет ходкости корабля. Определение параметров гребного винта. // Студенческий архив работ [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://vuzlit.ru/1031489/opredelenie_parametrov_grebnogo_vinta

11) Принцип работы гребного винта // Инженерно-технический центр ЗАО "МОТОРСЕРВИС" [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.motolodka.ru/vint.htm

12) Шаньгин, Е.С. Управление роботами и робототехническими системами –М.: Из-во УГФТУ, 2005, -120 с.

13) Сила тяги винта аэросаней // Stroitelstvo-new [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.stroitelstvo-new.ru/aerosani/sila-tyagi-vozdushnogo-vinta.shtml

14) Технические регламенты // Фонд правовой и нормативной документации «Техэксперт» [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/gost-8054-81 ГОСТ-8054-81

15) Революция «Управляемых подводных аппаратов» // Offshore technology [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://www.offshore-technology.com/features/feature105597/

16) Телеуправляемые подводные аппараты. Общие сведения // ОАО «ТетрисПро» // [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.tetis-pro.ru/faq/8028/

17) Телеуправляемый подводный аппарат BlueROV2 // BLUEROBOTICS OFFICIAL [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/

18) Телеуправляемый подводный аппарат DEEP TREKKER // DEEP TREKKER OFFICIAL [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://www.deeptrekker.com/shop/products/revolution-x-rov

19) Домидов, М.Н. Покорение глубин. // А.Н. Дмитриев, М.Н. Домидов. –М.: Изд-во Ленинград: Судостроение, 1974. -324 с.

20) Усилитель сигнала VE02 // Videoglaz [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://videoglaz.ru/raspredeliteli-video-i-audiosignala/sct/sct-vd102-ve02

21) Онлайн словарь // «Академик» // [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/82256

22) Проскурина, Н. Б. Инженерная методика определения упора гребного винта / Н. С. Сенюшкин, А. В. Суханов, Р. Р. Ямалиев . –М.: Изд-во УГАТУ, 2011. -44 с.

23) Плавучесть // Wikipedia [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Плавучесть

24) Надёжность и ремонтопригодность оборудования износ оборудования // РМТО [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/278444/mod_resource/content/1/Лекции%205-7%20PMTO.pdf

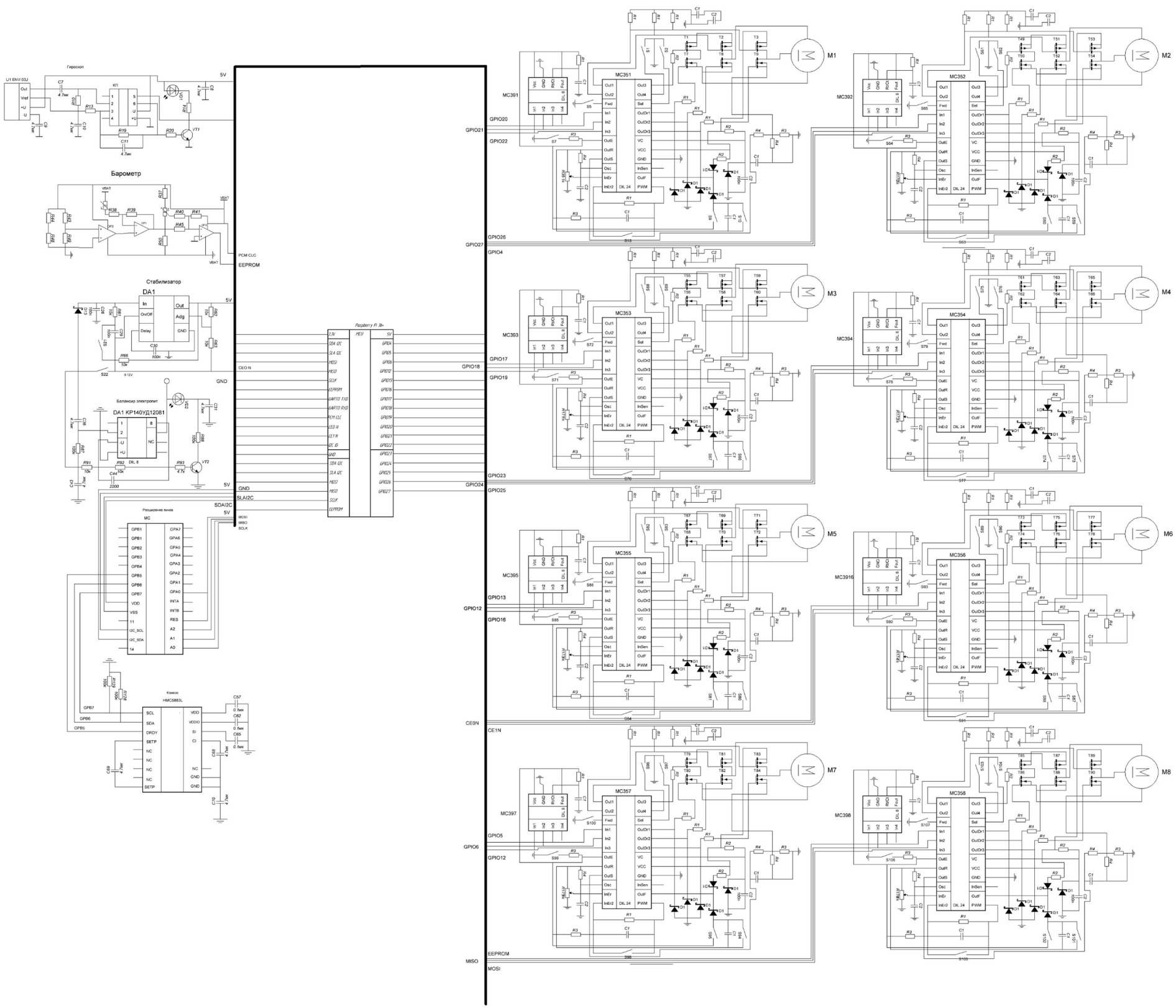
25) Малыгин, Г.И. Математическое моделирование движения подводного робота на основе нечеткой логики / Г.И. Малыгин, Ю.Л. Сиек –М.: Изд-во СПГМТУ, 2012. -2 с.

26) Кузнецов, А.В. Синтез нечёткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы MATLAB / А.В. Кузнецов, Г.М. Макарьянц –М.: Изд-во СНИУ им. Академика с.п. Королёва, 2016. -4 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Подводный телеуправляемый аппарат. Схема электрическая принципиальная

					БР.15.03.06.02.2020.ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Гладышев М.Д.			ПРИЛОЖЕНИЕ А	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Выборнов Н.А.				У	72	
						АГУ ДРТ-41		
Н. Контр.		Козлова И.А.						
Утверд.		Ключарев А.Ю.						



Поз.	Обозначение	Наименование	Кол
		Детали	
		Микроконтроллер	
Rasp		Paspberry Pi 3b+	1
		Микросхемы	
MC35		MC33035	8
MC39		MC33039	8
КП		КП140УД	1
DA		DA1 К157ХП2	1
MC		MCP22037	1
HM		HMC5883L	1
		Резистор	
R1		Резистор СF-1 (С1-4) 1 Вт, 1 кОм, 5%	64
R2		Резистор СF-470 (С1-4) 1 Вт, 470 кОм, 5%	24
R3		Резистор СF-5 (С1-4) 1 Вт, 5 кОм, 5%	24
R4		Резистор СF-0001 (С1-4) 1 Вт, 33 кОм, 5%	32
		Конденсаторы	
C1		Конденсатор МБМ 0,01мкФ 24В ±20%	32
C2		Конденсатор МБМ 750мкФ 24В ±20%	32
		Диоды	
D1		Диод Ш IN5819	48
		Транзисторы	
T1		Транзистор FDP75N08A	48

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Разраб.		Гладышев М.Д.			
Пров.		Рыбаков А.В.			
Т.контр.		Рыбаков А.В.			
Н.контр.		Козлова И.А.			
Утв.		Ключарев А.Ю.			

БР15.03.06.02.2020 ЭЗ

Подводный телеуправляемый аппарат. Схема электрическая принципиальная.

Лит.	Масса	Масштаб
У		Б/М
Лист	Листов 1	

АГУ ДРТ41

Копировал

Формат А1

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

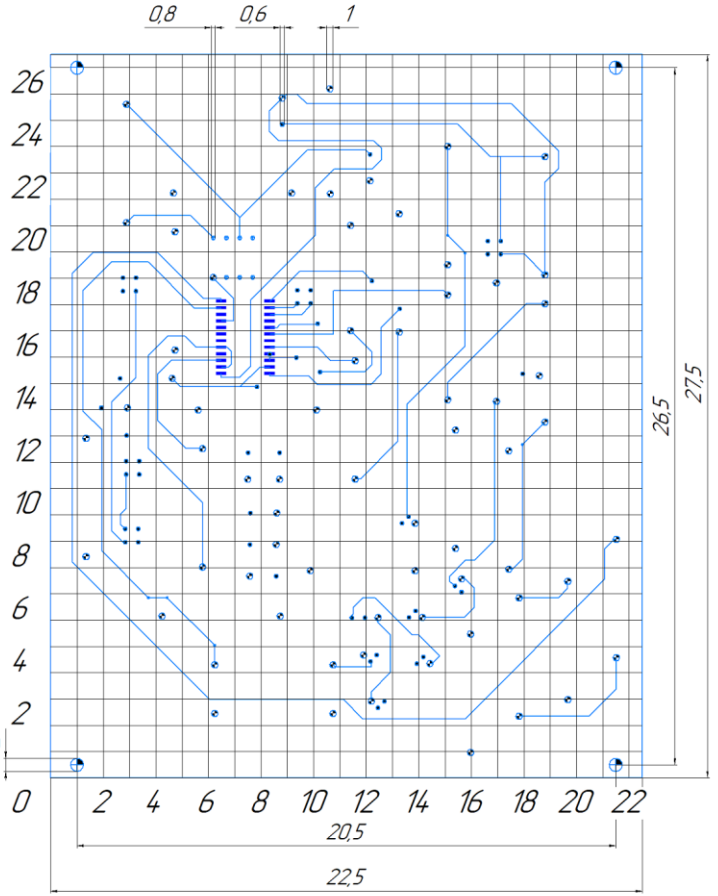
Инв. № подл.

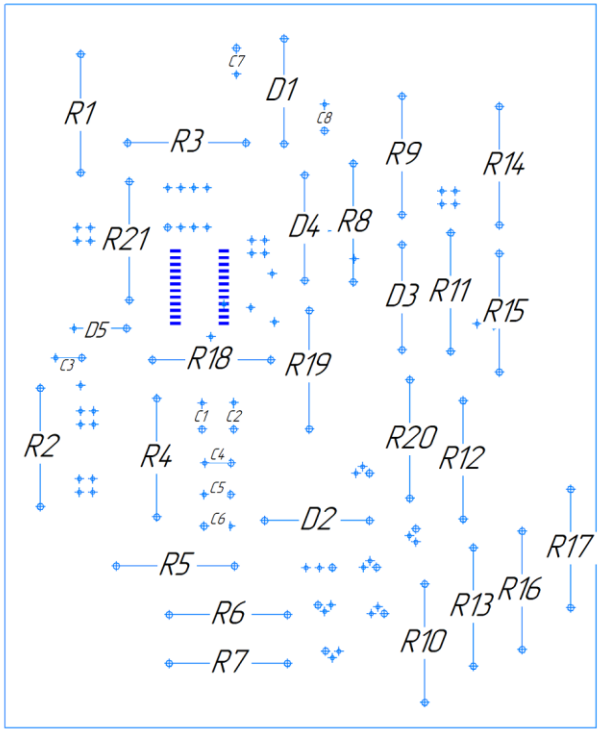
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Печатная плата драйвера

БР15.03.06.02.2020

Обозначение	Диаметр отверстий мм.	Диаметр контрактной площадки	Кол-во отверстий
⊕	2	4.0 мм	4
⊕	1,0	2,0 мм	43
⊕	0,8	1,6 мм	7
⊕	0,6	1,2 мм	55





1. Плату изготовить механическим способом.
2. Плата должна соответствовать ОСТ4.077.000.
3. Шаг координатной сетки 2 мм.
4. Линии координатной сетки. нанесены через одну..
5. Минимальная ширина проводников 1 мм.
6. Минимальное расстояние между проводниками 3 мм, в узких местах. 1 мм, на длине 10 мм.
7. Маркировать краской ТНПФТУ 29-02-359-70, шрифт 3, по НО 01007.

					БР15.03.06.02.2020	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.		Гладышев М.Д.			Печатная плата драйвера	Лит. У / Масса / Масштаб 5 : 1
Пров.		Рыбаков А.В.				Лист / Листов 1
Т.контр.		Рыбаков А.В.				
Н.контр.		Козлова И.А.			Стеклотекстолит СТ ВС-1.5 ГОСТ 12652-74	АГУ ДРТ41
Утв.		Ключарев А.Ю.				

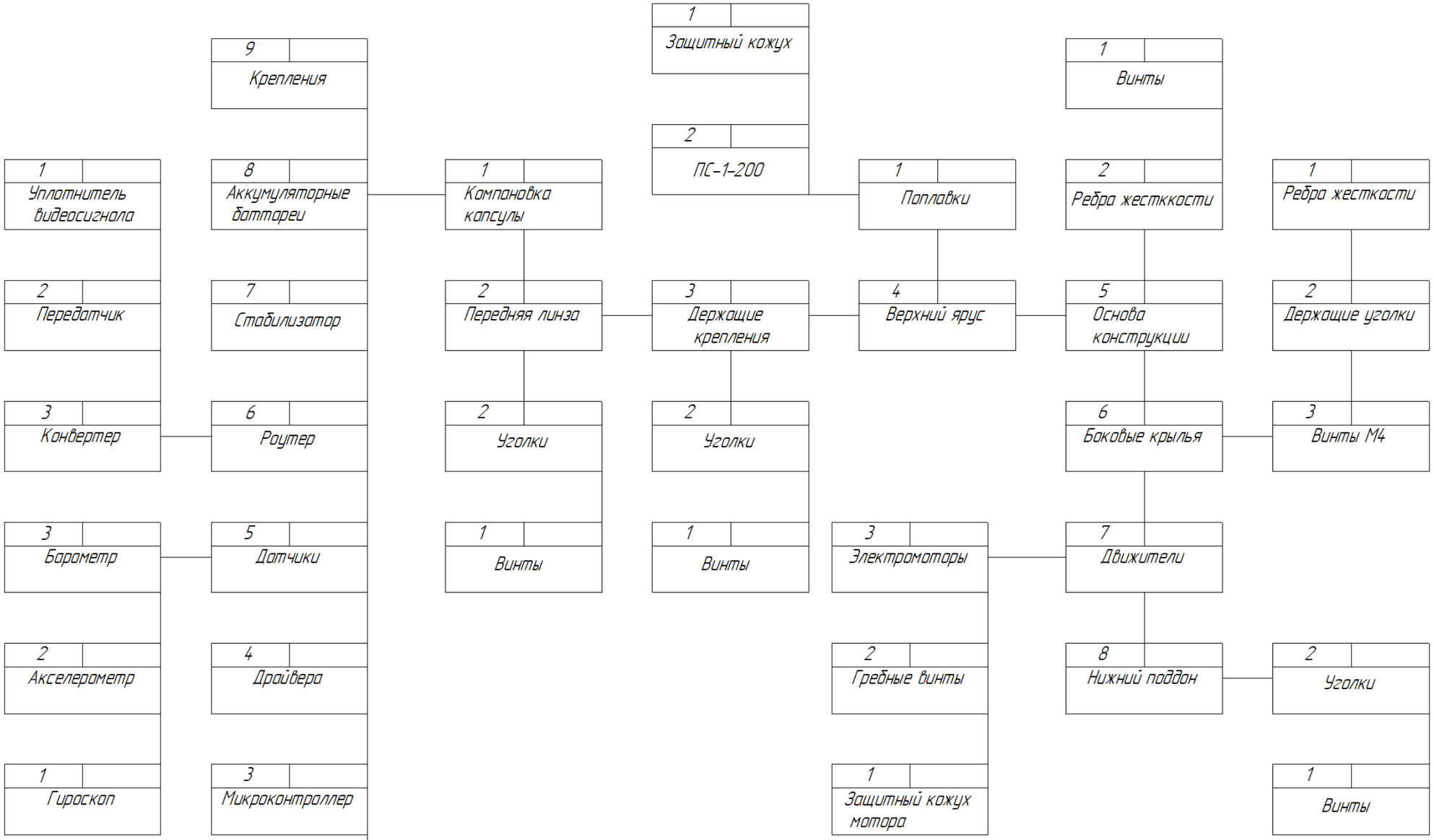
Копировал Формат А2

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технологическая карта сборки подводного телеуправляемого аппарата

БР15.03.06.02.2020 МК



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР15.03.06.02.2020 МК	
Разраб.		Гладышев М.Д.			Технологическая карта сборки подводного телеуправляемого аппарата	Лит. / Масса / Масштаб: У
Пров.		Рыбаков А.В.				Лист / Листов: 1
Т.контр.		Рыбаков. А.В.				
Н.контр.		Козлова И.А.			АГУ ДРТ 41	
Утв.		Ключарев А.Ю.				

Копировал Формат А2

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

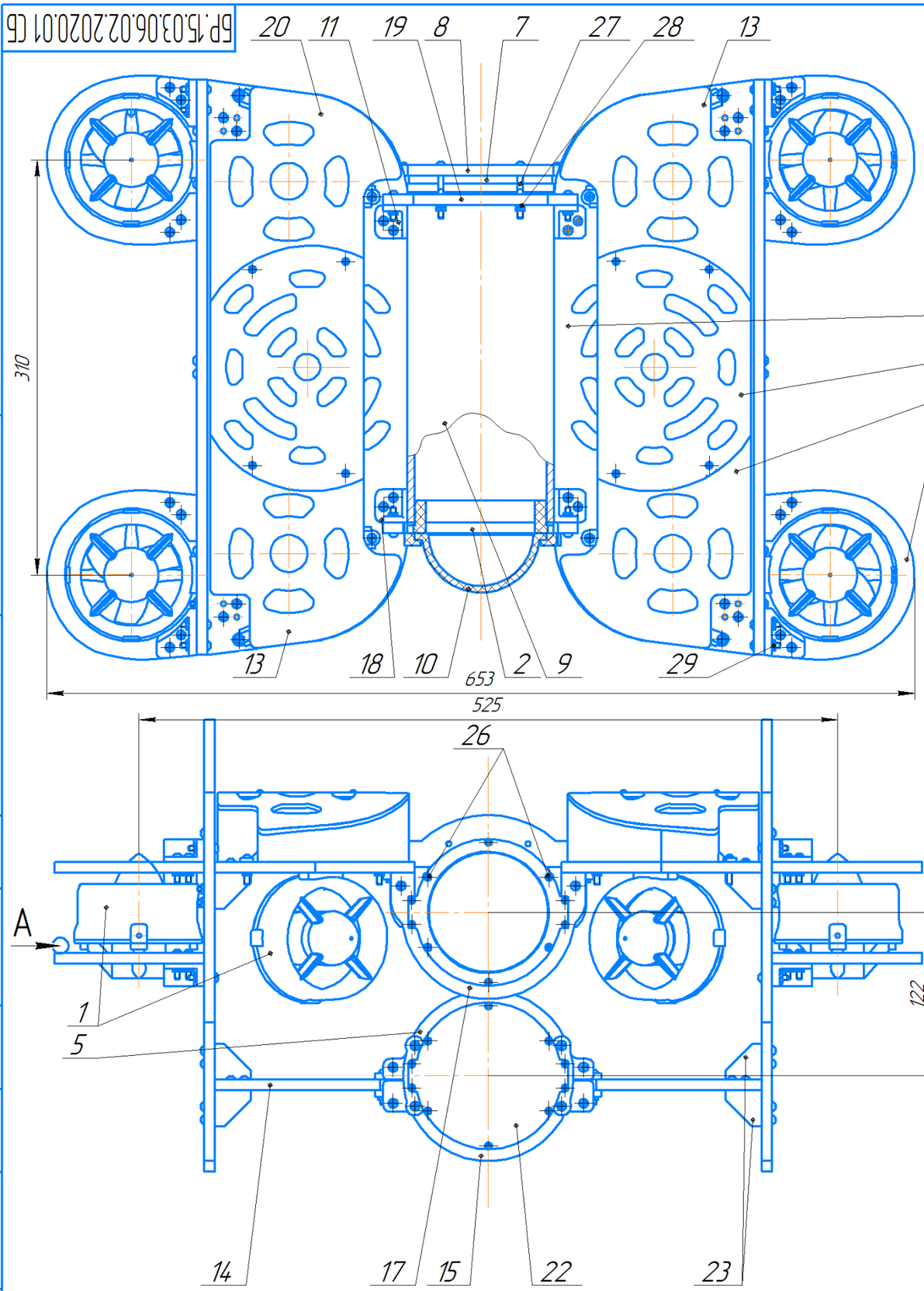
Инв. № подл.

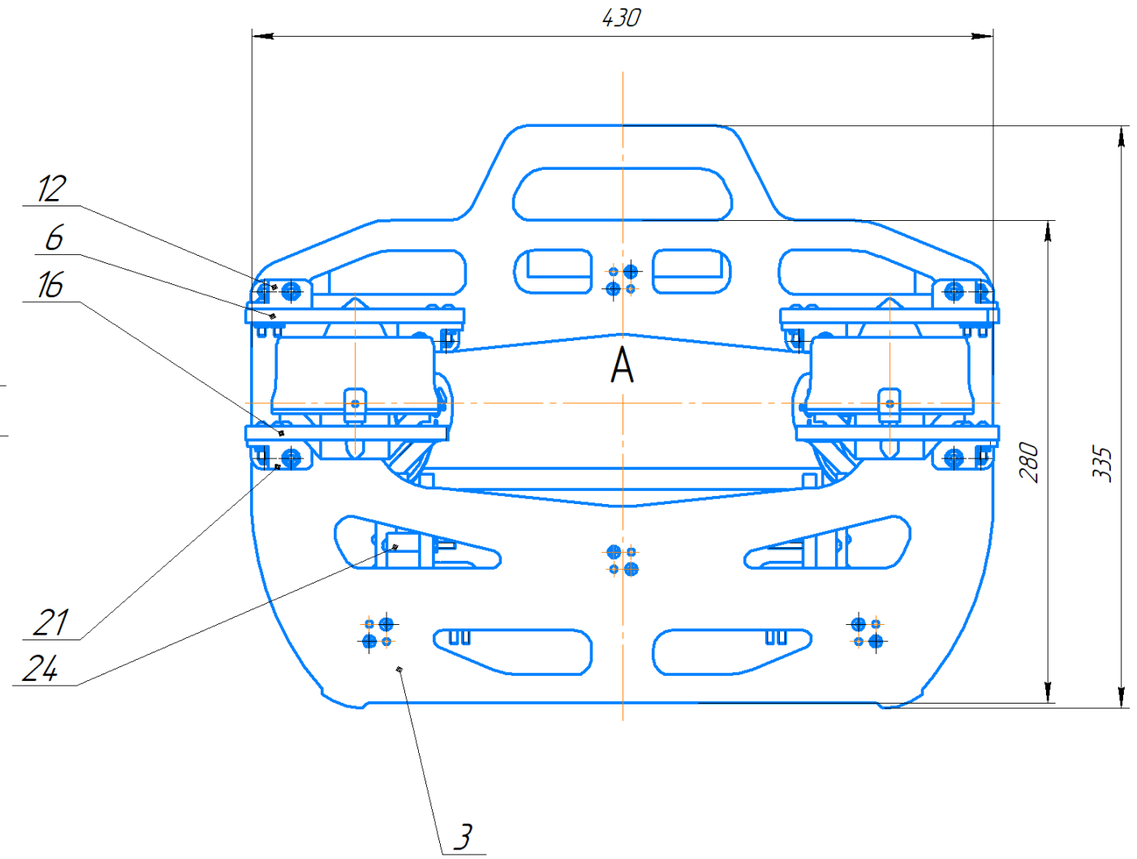
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Подводный телеуправляемый аппарат сборочный чертеж

					БР.15.03.06.02.2020.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Гладышев М.Д.			ПРИЛОЖЕНИЕ Г	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Выборнов Н.А.				У	78	
						АГУ ДРТ-41		
Н. Контр.		Козлова И.А.						
Утверд.		Ключарев А.Ю.						

БР.15.03.06.02.2020.01 СБ





						БР.15.03.06.02.2020.01 СБ	
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Гладышев М.Д.			Подводный телеуправляемый аппарат	Лит.	Масса / Масштаб
Пров.		Рыбаков А.В.				У	1:1
Т.контр.		Рыбаков А.В.				Лист	Листов 1
Н.контр.		Козлова И.А.				АГУ ДРТ41	
Утв.		Ключарев А.Ю.					

Копировал

Формат А2

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Спецификация сборочного чертежа подводного телеуправляемого аппарата БР.15.03.06.02.2020.01

					БР.15.03.06.02.2020.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Гладышев М.Д.			ПРИЛОЖЕНИЕ Д	Лит.	Лист 80 / Листов
Провер.		Выборнов Н.А.					
Н. Контр.		Козлова И.А.				У АГУ ДРТ-41	
Утверд.		Ключарев А.Ю.					

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
				Документация		
A4			БР15.03.06.02.2020.02 СБ	Сборочный чертеж	1	
				Детали		
		1		Защитный кожух	1	
		2		Гребной винт	1	
		3		Бесколлекторный мотор	1	
		4		Стойка поддержки	1	

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гладышев М.Д.		
Пров.		Рыбаков А.В.		
Н.контр.		Козвлова И.А.		
Утв.		Ключарев А.Ю.		

БР15.03.06.02.2020.02

Движительный узел

Лит.	Лист	Листов
У		1

АГУ ДРТ41

Копировал

Формат А4

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
		15		Нижние держатели колбы	2	
		16		Нижние защитные ушки	4	
		17		Полипропиленовые поддержки	2	
		18		Правые печатные уголки	8	
		19		Полипропиленовые крепления поддержек	2	
		20		Правый отсек поплавка	2	
		21		Правые крепеления ушек	6	
		22		Передняя заглушка	1	
		23		Укрепленые уголки поддержки	12	
		24		Уплотнительные ушки	2	
		25		Центральный отсек попловка	2	
				Стандартные изделия		
		26		Винт В2.М3-6gх20 ГОСТ 17473-80	20	
		27		Винт В2.М4-6gх20 ГОСТ 17473-80	131	
		28		Гайка М3-6Н ГОСТ 5916-70	30	
		29		Гайка М4-6Н ГОСТ 5916-70	135	

Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата | Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР15.03.06.02.2020.01	Лист 2

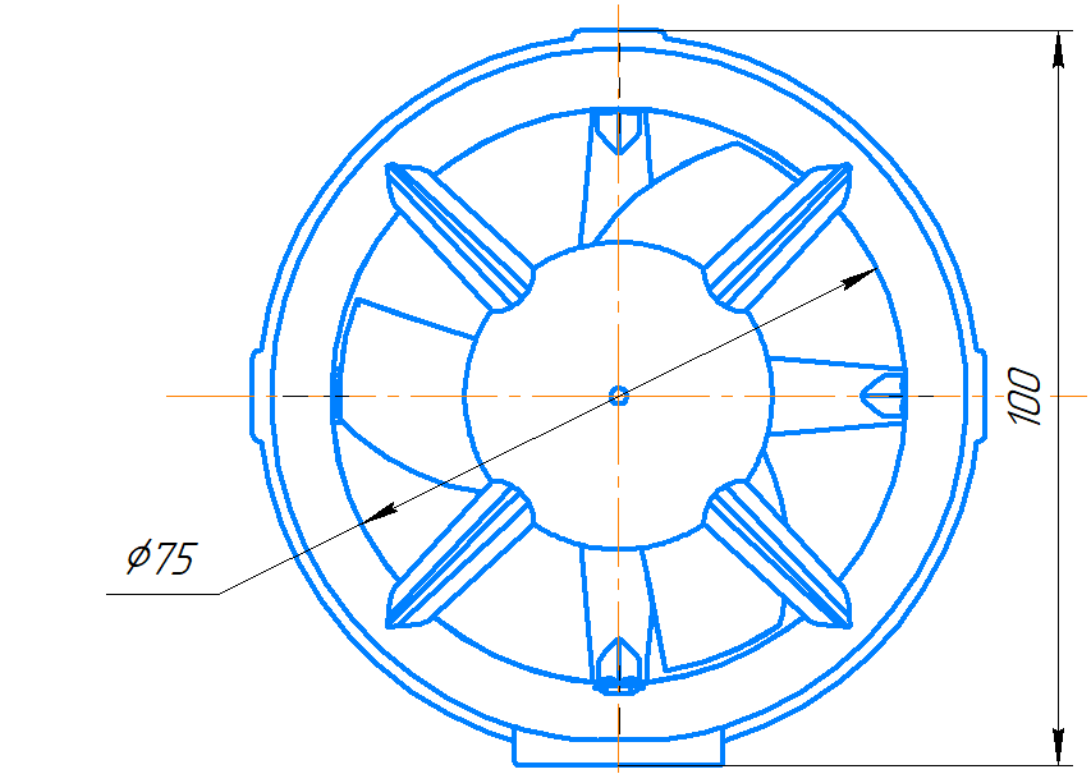
Копировал Формат А4

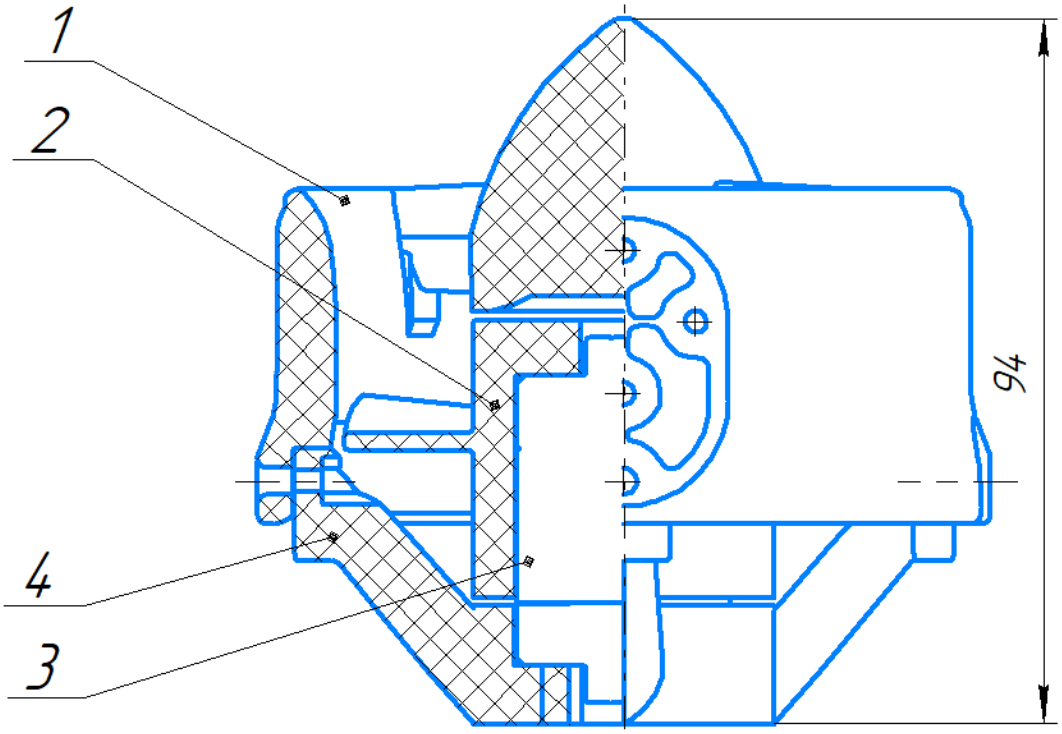
ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Движительный узел СБ

					БР.15.03.06.02.2020.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Гладышев М.Д.			ПРИЛОЖЕНИЕ Е	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Выборнов Н.А.				У	83	
						АГУ ДРТ-41		
Н. Контр.		Козлова И.А.						
Утверд.		Ключарев А.Ю.						

БР15.03.06.02.2020.02 СБ





Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гладышев М.Д.		
Пров.		Рыбаков А.В.		
Т.контр.		Рыбаков. А.В.		
Н.контр.		Козлова И.А.		
Утв.		Ключарев А.Ю.		

БР15.03.06.02.2020.02 СБ

Движительный узел

Лит.	Масса	Масштаб
У	0,34	1:1
Лист	Листов 1	

АГУ ДРТ41

Копировал

Формат А4

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Спецификация чертежа движительный узел.

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание
				Документация		
А4			БР15.03.06.02.2020.02 СБ			
				Сборочные единицы		
				Движительный узел	1	
				Детали		
		1		Защитный кожух	1	
		2		Гребной винт		
		3		Бесколлекторный мотор		
		4		Стойка поддержки		

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Инв. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Гладышев М.Д.		
Пров.		Рыбаков А.В.		
Н.контр.		Козвлова И.А.		
Утв.		Ключарев А.Ю.		

БР15.03.06.02.2020.02

Движительный узел

Лит.	Лист	Листов
У		1

АГУ ДРТ41

Копировал

Формат А4