

**ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
ПО ПРОФИЛЮ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО»**

регистрационный номер

Секция: многоцелевые роботы и летательный аппараты(СМ4, СМ6, СМ9,
СМ10, СМ11)

название секции

Проектирование двухсредного дрона для автономного выполнения
обследовательских задач в труднодоступных районах

название работы

Автор:

Шабанов Глеб Михайлович

фамилия, имя, отчество

ГБОУ города Москвы Школа №1517, 11И

наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель:

Смирнов Иван Алексеевич

фамилия, имя, отчество

ФГУП ЦНИИХМ

место работы

Научный сотрудник

звание, должность

подпись научного руководителя

Москва - 2024

АННОТАЦИЯ

Цель проекта - разработка автономного двухсредного дрона, как средства решения исследовательских задач.

В рамках эскизного проекта в работе было создано несколько прототипов, произведен их анализ и выбран тип конфигурации аппарата.

На этапе технического проекта утвержденный тип конфигурации был реализован в виде трехмерной твердотельной модели, проведены натурные испытания сконструированных узлов в воде и на воздухе.

Таким образом в результате работы над проектом был разработан, спроектирован и создан работоспособный прототип автономного двухсредного дрона, проведены все типы испытаний, проверена и подтверждена его работоспособность в реальных условиях.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	5
Анализ существующих аналогов	5
Описание разработанного решения	10
Герметизация	12

Монтаж компонентов	14
Натурные и полунатурные испытания	14
Дорожная карта	16
Чертежи и 3Д модели	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	19
ПРИЛОЖЕНИЕ А	20
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	20

ВВЕДЕНИЕ

Океанологические исследования не представляются возможными без использования подводных аппаратов. Однако аппараты каждого класса имеют ряд недостатков, которые существенно ограничивают область их применения. В подводной робототехнике отмечается тенденция проектирования гибридных

подводных роботизированных комплексов, состоящих из двух аппаратов различных классов.

Беспилотные системы находят свое применение в большом количестве областей нашей жизни. Доставка и транспортировка, геодезия, съёмка медиа-материалов - всё это те задачи, которые выполняют беспилотные летательные аппараты. Особо актуальными направлениями развития беспилотных летательных аппаратов являются повышение степени их автономности и переход к работе в различных средах.

Разработка аппарата способного к двухсредному перемещению, является значительным шагом в области автономных носителей, предназначенных для исследования и мониторинга окружающей среды. Он имеет потенциал для применения в таких областях, как научные исследования, спасательные операции, обслуживание подводных структур и экологический мониторинг, обеспечение морской безопасности. Выполнения таких миссий как проведение анализа отдаленных акваторий и обследование труднодоступных водоёмов — это те задачи, для которых гибридные аппараты подходят лучше всего.

Целью проекта является разработка автономного двухсредного дрона, как средства решения исследовательских задач.

К разрабатываемому изделию предъявляются следующие основные требования:

1. Глубина погружения до 10 метров.
2. Автономная навигация в воздухе на расстояние до 10 км от станции.
3. Способность автономной работы в течение 30 минут.
4. Стабильность и устойчивость аппарата в водной среде.

Поставленная в проекте цель достигается путем выполнением следующих задач:

1. Проведения современного уровня разработки двухсредных аппаратов.
2. Определение конфигурации и концепта устройства.
3. Разработка и создание прототипа.
4. Проведение полунатурных и натурных испытаний.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Анализ существующих аналогов

На данный момент в мире практически нет аналогичных двухсредных устройств, поэтому рассмотрим некоторые из них:

1. Loon Copter.

Дрон представляет собой квадрокоптер, все двигатели бесколлекторные. Для погружения в воду дрон использует блоки плавучести. При приводнении с помощью насоса блоки плавучести заполняются водой, увеличивая массу дрона, что приводит к его погружению. Для передвижения используются обычные бесколлекторные двигатели с возможностью поворота, для изменения функций, выполняемых ими в воде. Управление осуществляется за счет контроллера, расположенного на суше. Напряжение 14,6 В. Скорость под водой без течения 0,5 м/с. Скорость в воздухе 3,6 м/с. Средняя скорость при гибридном испытании 1,0 м/с. Время работы исключительно под водой 22

минуты. Время исключительно полета 11 минут. Гибридное испытание 15 минут, из которых 8 минут полета. Максимальное расстояние подключения 3 метра в глубину и 10 метров в длину. Вес - 2,7 кг.

Использование гидравлического насоса и поршневого бака, облегчает переход воздух-вода и вода-воздух. Эта система погружения достаточно удобна для установки на раму дрона, а также дает нам возможность поворота на 90 градусов по дифференту и контроля глубины погружения. Сама система состоит из нескольких деталей: корпус транспортного средства, водяной цилиндр, подвижный поршень (раньше упоминается как поршневой бак), двухходовой клапан и водяной насос. Водяные цилиндры могут содержать в себе до 150 мл. воды. Для погружения используется только 100мл. остальное используется для утяжеления устройства, для увеличения устойчивости устройства и облегчения управления. Двусторонний клапан необходим для удержания воды в водяном цилиндре, поскольку сжатый воздух внутри корпуса будет пытаться вытеснить воду из цилиндра, когда он находится под водой.

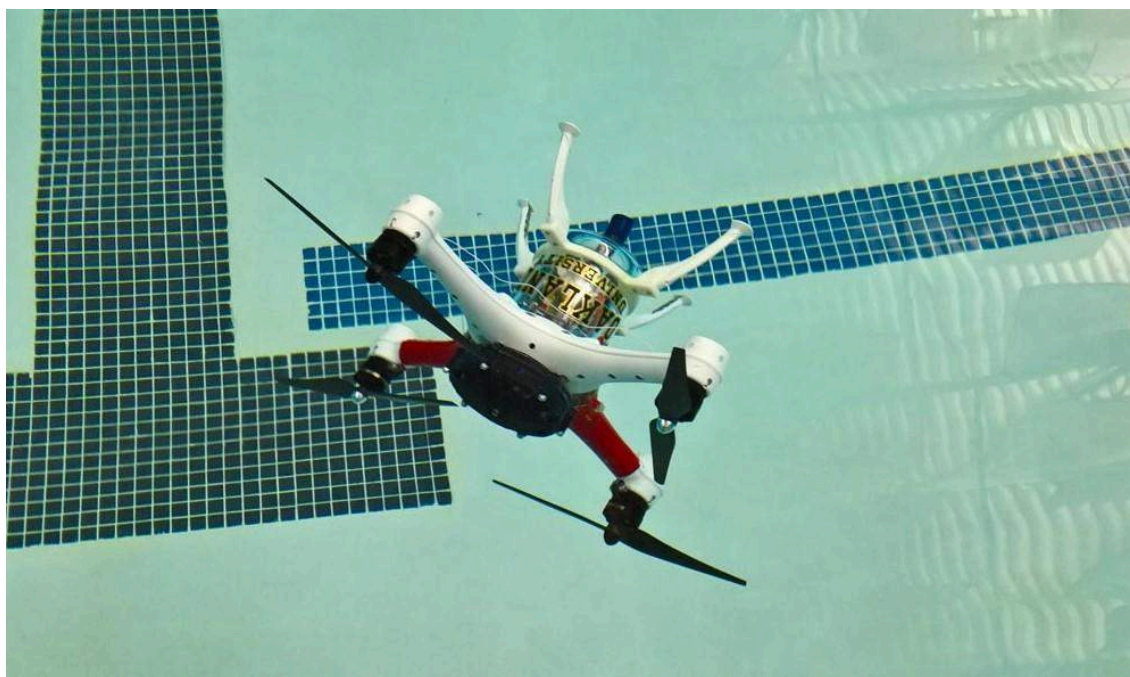


рис. № 1 - Loon Copter под водой.

Использование блоков плавучести, заполненных водой, вызывает некоторые проблемы с определением центра тяжести. К тому же центр тяжести при неправильном расположении не совпадает с центром плавучести, решение этой проблемы в виде фотографий и схем с расписанными силами можно увидеть в документации, ссылка к которой будет приложена в конце.

Использование бесколлекторных двигателей для гибридного движения помогает облегчить вес устройства в отличие от других устройств (они упоминают существование гибридных аналогов фразой *aerial/aquatic vehicles* как таковых, однако не прикрепляют название и ссылки на них или на исследование, возможно имеются в виду такие виды дронов по отдельности). Для контроля всех двигателей имеются драйверы, в свою очередь управление которыми происходит с помощью Arduino.

Помимо драйверов для работы бесколлекторных двигателей, аппарат также оснащен драйвером гидравлического насоса и низкочастотным передатчиком (72Mhz), который используется для общения дрона с землей. Контроль происходит с помощью контроллера полета Multiwii pro с открытым исходным кодом. Аппаратное обеспечение Multiwii состоит из одного микроконтроллера ATmega2560 и блока инерциальных измерений.

Критика технической реализации устройства:

Скорость устройства крайне мала, в воде она составляет 1,8 км/ч, что в 7 раз медленнее скорости в воздухе, сама же скорость в воздухе лишь в 2 раза превышает человеческую и заметно проигрывает в скоростных характеристиках другим дронам (Качественный дрон легко может достичь скорости 10 м/с, что почти в 3 раза быстрее). Дрон имеет проблемы с автономностью, из-за отсутствующей системы самостоятельного управления, квадрокоптер не может удаляться на большое расстояние от источника команд. Блоки плавучести и насосы значительно утяжеляют конструкцию, а также уменьшают ее маневренность (с другой стороны, дополнительная масса придает стабильности положению дрона в воде). Сама по себе система слишком сильно зависит от

работы водяных насосов, работа которых навряд-ли может быть легко оптимизирована. Внешний вид дрона (хоть это и наименьшая из проблем) является его слабой стороной, несмотря на грамотное расположения центра масс и плавучести во всех его положениях, слабая обтекаемость не является плюсом устройства.

2. EagleRay

EagleRay представляет собой дрон с жестким крылом. Благодаря особой конструкции, EagleRay способен летать, нырять в воду, плавать по поверхности воды и проводить подводную разведку. EagleRay, помимо всего прочего, имеет на поверхности солнечные панели, которые позволяют ему подзаряжаться, пока он плавает по поверхности воды или летает в воздухе. Перед тем, как нырнуть, дрон не складывает крылья, как большинство существующих аналогов. Размах крыльев дрона составляет 150 сантиметров, а длина дрона равняется 140 сантиметрам. Пропеллер в носовой части летательного аппарата позволяет дрону без проблем перемещаться как в воде, так и в воздухе. Двигатель расположен на носу, имеет возможность совершать посадку на водную поверхность и покоится на ней.

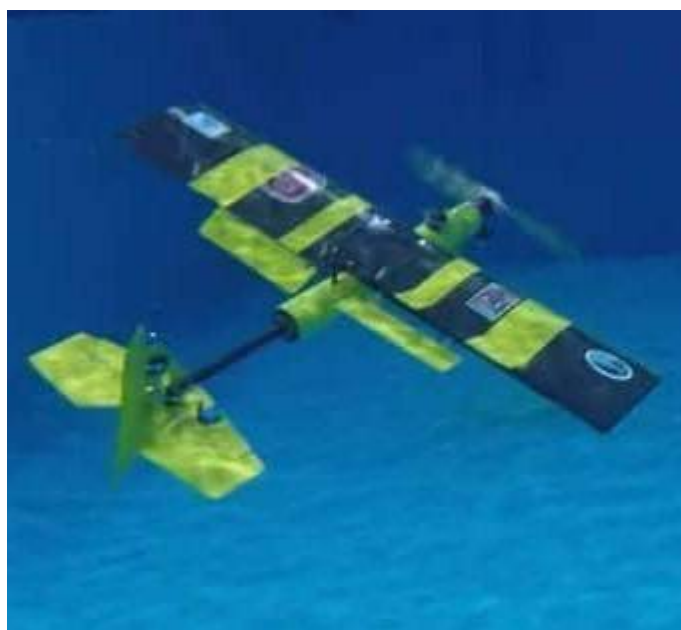


рис. № 2 - EagleRay под водой.

Критика технической реализации устройства:

У устройства достаточно ограничены поворотные степени свободы. Дрон не может останавливаться под водой, так же, как и замедляться, следовательно работоспособность такого дрона осуществить гораздо сложнее. Такое устройство крайне трудно в реализации со стороны конструкции, так как требуется проводить большое количество дополнительных, чтобы получить нужную обтекаемость дрона, с которой он не имеет шанса утонуть, а также такую конструкцию при которой его центр тяжести не будет смещен (для глайдера, смещенный центр масс более опасная проблема, чем для коптера, у второго мощность работы двигателей можно отрегулировать за счет калибровки).

3. TJ-FlyingFish

На данным момент не имеет официальной документации и каких-либо характеристик. Аналогично первому устройству, под водой дрон передвигается за счет изменения положения двигателей. Устройство имеет положительную плавучесть за счет блоков плавучести, закрепленных вокруг корпуса, поэтому погружение под воду происходит за счёт тяги от винтов. Однако, проблема медленного передвижения и сложности управления, остаётся такой же.



рис. № 3 - TJ-FlyingFish под водой.

Вывод: Ни одно из представленных устройств не удовлетворяет требованию устойчивости и стабильности работы, так как они или изменяют свое положение для перемещения под водой и соответственно имеют малую скорость (Loon Copter и TJ-FlyingFish), что делает их менее приспособленными для подводного перемещения при длительных миссиях (например для обследования протяженных подводных объектов), или недостаточно маневренные для подводных исследований в небольших по размерам акваториях (EagleRaY). Исходя из этого сравнения можно сделать вывод о необходимости разработки собственного варианта устройства.

Описание разработанного решения

Рассмотрим конструкцию третьего прототипа – последней реализации аппарата. Устройство состоит из следующих элементов: рама, собранная из семи деталей: четыре лучевых элемента для двигателей, детали основания, к которой они присоединяются и двух креплений подводных двигателей; два

прочных корпуса: сверху - с микроконтроллером и другой электроникой, снизу - с аккумуляторами и преобразователем питания.

Рендер 3D-модели третьего прототипа можно увидеть на рисунке №4. 3D-модели частей, из которых состоит сборная рама, представлены на рисунке №5.



рис. № 4 - рендер общей 3D-модели устройства.



рис. № 5 - 3D-модели элементов конструкции.

Рассмотрим сценарий работы устройства. Оператор, находясь на суше, управляет дроном, как обычным квадрокоптером, в ручном режиме или задает миссию полета по GPS так, чтобы аппарат долетел до труднодоступной точки исследования. Далее устройство опускается на воду, переходит в режим работы под водой за счет тех же четырех подводно-воздушных двигателей, работающих на погружение. Аппарат имеет около нейтральную плавучесть, поэтому под водой эти двигатели должны лишь немного выравнивать положение устройства. В водной среде перемещение происходит задействуя все двигатели: подводные отвечают за маршевое движение и смену курса, подводно-воздушные – за изменение глубины (также у такой конфигурации двигателей есть возможность перемещаться, используя крен и дифферент). Из-за отсутствия доступа к беспроводной связи под водой конструкция предусматривает использование автономной навигации. Затем устройство поднимается к поверхности, взлетает за счет подводно-воздушных двигателей и возвращается к оператору.

Фотография устройства на одном из этапов разработки представлена на рисунке №6.



рис. № 6 - Фотография устройства

Герметизация

Важной особенностью разработанного двухсредного аппарата является его герметичность, поскольку без неё он не сможет работать в воде.. Методов герметизации электроники и механизмов существует достаточно много, ввиду сложности разрабатываемой конструкции было использовано сразу несколько. Два прочных корпуса, в которых находится электроника, является герметичными при погружении на глубину в пределах 10 метров за счет резиновых колец. Соединения полетного контроллера и аккумулятора происходит за счет гермовводов. Для прочного герметичного крепления их к прочным корпусам были разработаны и напечатаны с применением фотополимерных SLA технологий детали особой формы (фотография приведена на рисунке №8). При сборке аппарата они приклеиваются без засоров на эпоксидный клей, что обеспечивает герметичное соединение с корпусом. Рассмотрим принцип работы гермоввода. Он представляет собой напечатанную на 3D-принтере деталь (она изображена на рисунке №7), на которую дополнительно надеваются два уплотнительных кольца.

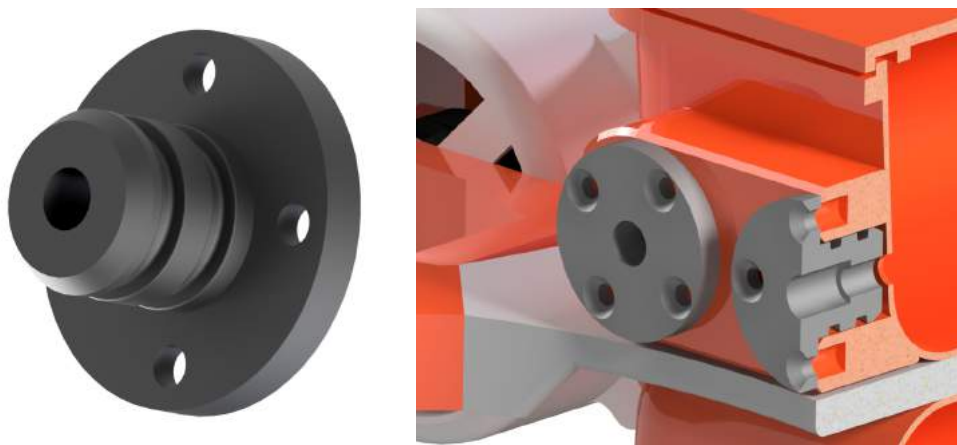


рис. №7 - Гермовводы

В соединительную деталь вклеиваются втулки, к которым на винты присоединяется сам гермоввод. При погружении под воду внешнее давление дополнительно прижимает его внутрь, что обеспечивает достаточную

герметичность. В центральное отверстие вставляются все необходимые провода и оно аналогично заклеивается эпоксидной смолой.



рис. №8 - Крепление гермовводов

Бесколлекторные двигатели сами по себе не нуждаются в герметизации, но покрытие их обмоток электроизоляционным лаком помогает предотвратить окисление и какие-либо замыкания. Драйверы всех двигателей находятся вне прочных корпусов (это сделано во избежание помех), поэтому они заливаются эпоксидной смолой и закрываются термоусаживаемой трубкой.

Таким образом обеспечивается полная герметизация устройства для того диапазона глубин, на которые оно рассчитано.

Монтаж компонентов

Прочные корпуса, в которых располагаются все электронные компоненты, были подобраны таких размеров, чтобы в них оптимально помещалась электроника. В нижнем прочном корпусе располагается только аккумулятор и преобразователь напряжения. Схему расположения электроники в верхнем прочном корпусе можно рассмотреть в приложение Б.

Для питания бесколлекторных моторов и полетного контроллера, а также для передачи сигнала с регуляторов скорости была разработана схема подключения проводов, которая обеспечивала удобство подключения, а также минимальное количество необходимых проводов.

Поскольку полетный контроллер, используемый в аппарате, обладает встроенным акселерометром и гироскопом, существует необходимость его

жесткого крепления, в случае если его не надёжно установить, датчики могут возвращать неправильные значения, что отрицательно повлияет на работу устройства.

Натурные и полунатурные испытания

В ходе разработки двухсредного аппарата, было проведено несколько испытаний, направленных на определение возможностей устройства, в частности тестирование работы бесколлекторных двигателей в водной среде и проверка лётных способностей второго прототипа.

Испытания маршевых двигателей проводились на специальном стенде, с помощью которого можно было определить их тягу под водой. Также на этом стенде было проведено тестирование насадков на двигатели различных форм, они изображены на рисунке №9. Так как полностью рассчитать оптимальную форму насадка достаточно трудно, было принято решение провести испытания нескольких различных насадков на специальном стенде, после чего выбрать оптимальный вариант. Крепление подводного двигателя для испытаний насадков и тяги представлено на рисунке 10.



рис. № 9 - Насадки для подводных двигателей

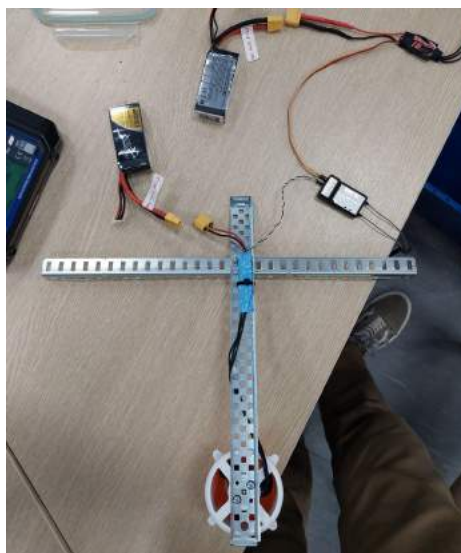


рис. № 10 - Крепление двигателя для испытаний

После сборки второго прототипа, были проведены тесты, направленные на выявление лётных способностей устройства. В специально подготовленной зоне, аппарат был запущен в воздух и совершил небольшой полёт, в результате дальнейшей калибровки, устройство стало абсолютно стабильным в воздухе и было готово к воздушной эксплуатации.

Дорожная карта

На стадии технического проекта было разработано 3 прототипа, каждый из которых являлся конструктивной модификацией и интеллектуальной модернизацией предыдущего. На рисунке №11 представлен внешний вид всех трех прототипов.

Работа над проектом ведется от одного контрольного этапа до другого, этими этапами являются рабочие прототипы - с первого по четвертый. Первый прототип представляет собой H-образную раму с электроникой. Он был нужен для определения списка необходимых электронных компонентов и вариантов их расположения, а также формы рамы и вариантов размещения прочных корпусов.



Рис. № 11 - Прототипы: А - первый прототип, Б - второй прототип, В - третий прототип

Второй прототип выглядит как квадрокоптер, он способен летать, управляется с пульта, использовался для тестирования программного кода и проверки устойчивости конструкции в воздухе.

Третий прототип является модифицированной версией второго, подразумевает полную герметизацию и возможность автономного перемещения под водой, то есть представляет собой полностью рабочее устройство, которое отвечает всем поставленным в работе задачам.

Чертежи и 3D модели

Все чертежи 3D-модели, которые не были помещены в основную часть находятся в приложении Б, эскизы аппаратов различных конфигураций, созданные на этапе эскизного проекта находятся в приложении В. 3D-модели всех необходимых компонентов были спроектированы в программе Autodesk Inventor Professional 2022.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был разработан первый и второй рабочие прототипы, показавшие возможность существования гибридного аппарата, способного на перемещение сразу в двух средах. Также была проделана работа по подготовке к созданию третьего прототипа.

Также были выполнены и другие поставленные в начале проекта задачи:

1. Был проведен анализ существующих решений.
2. Разработаны 3D-модели устройства.
3. Была проведена серия натурных испытаний.
4. Был проведён монтаж компонентов.

Исходя из всего вышеперечисленного можно сказать, что первоочередной задачей является сборка третьего прототипа и тестирование его возможностей в

двух средах. В случае успешного испытания будет начата работа по созданию четвертого прототипа, конструктивное отличие которого от третьего прототипа будет значительно больше чем между третьим и вторым.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников

Betaflight wiki // Betaflight URL: <https://betaflight.com/docs/wiki> (дата обращения: 02.09.2023).

iNavFlight // GitHub URL: <https://github.com/iNavFlight/inav> (дата обращения: 02.09.2023).

Ardupilot Documentation // Ardupilot URL: <https://ardupilot.org/ardupilot/> (дата обращения: 02.09.2023).

Двухсредные беспилотные летательные аппараты // cyberleninka.ru URL:
Макаров Ю. В. Летательные аппараты МАИ. - МАИ, 1994

Полтавский А.В., Семенов С.С., Бурба А.А., Нгуен З.Ф.
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ:

Информационные процессы в технике. Моделирование систем и объектов многофункциональных робототехнических комплексов беспилотной авиации. - 2019

Двухсредные летательные аппараты: что это и как они работают // v28.wdzd.ru URL: <https://v28.wdzd.ru/dvuxsrednye-letatelnye-apparaty-cto-eto-i-kak-oni-rabotayut/> (дата обращения: 11.09.2023).

Loon Copter: Implementation of a Hybrid Unmanned Aquatic-Aerial Quadcopter with Active Buoyancy Control // onlinelibrary.wiley URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/am-pdf/10.1002/rob.21777> (дата обращения: 24.08.2023).

EagleRay: дрон, способный одинаково хорошо и плавать под водой, и летать в воздухе // hi-news URL: <https://hi--news-ru.turbopages.org/hi-news.ru/s/technology/eagleray-dron-sposobnyj-odinakovo-xorosho-i-plavat-pod-vodoj-i-letat-v-vozduxe.html> (дата обращения: 24.08.2023).

<https://cyberleninka.ru/article/n/dvuxsrednye-bespilotnye-letatelnye-apparaty/viewer> (дата обращения: 11.09.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Ссылка на Google Drive с папкой проекта -

<https://drive.google.com/drive/folders/1iMQbMfY4f0jK6E9OjBQHn9n4d3v9E8Ho>



рис. № 12 - QR-код на Google Drive.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

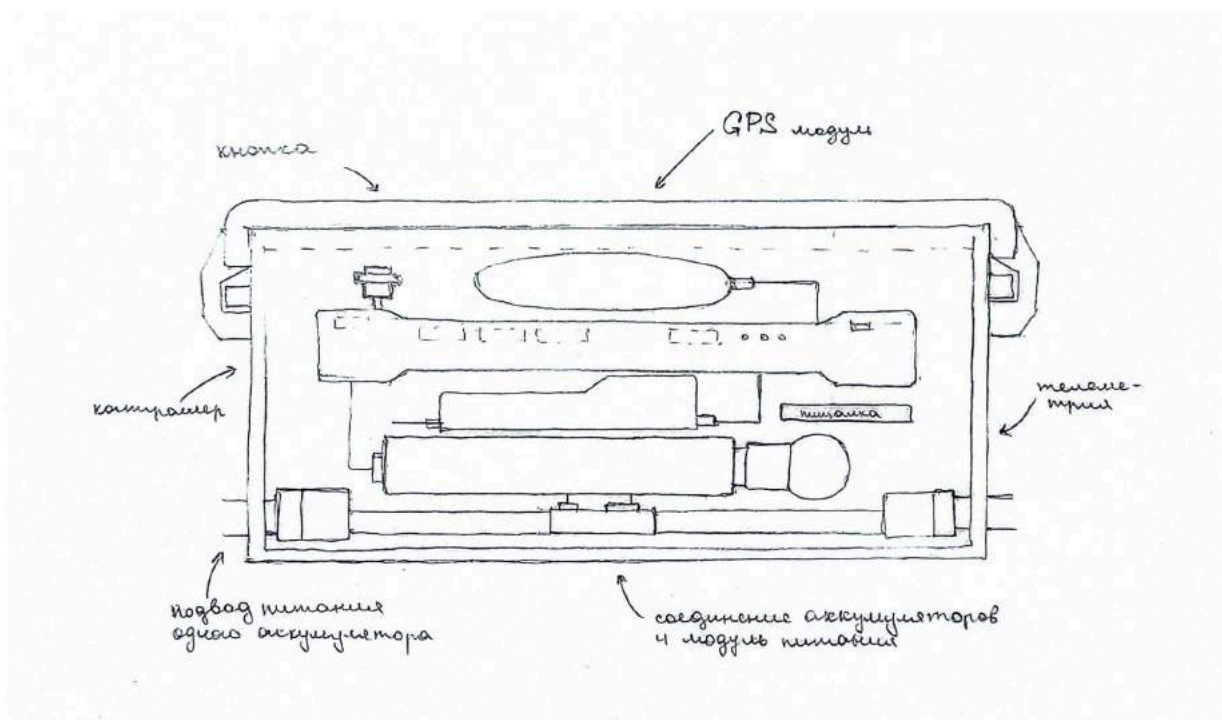


рис. № 13 - Компоновка электроники в верхнем прочном корпусе.

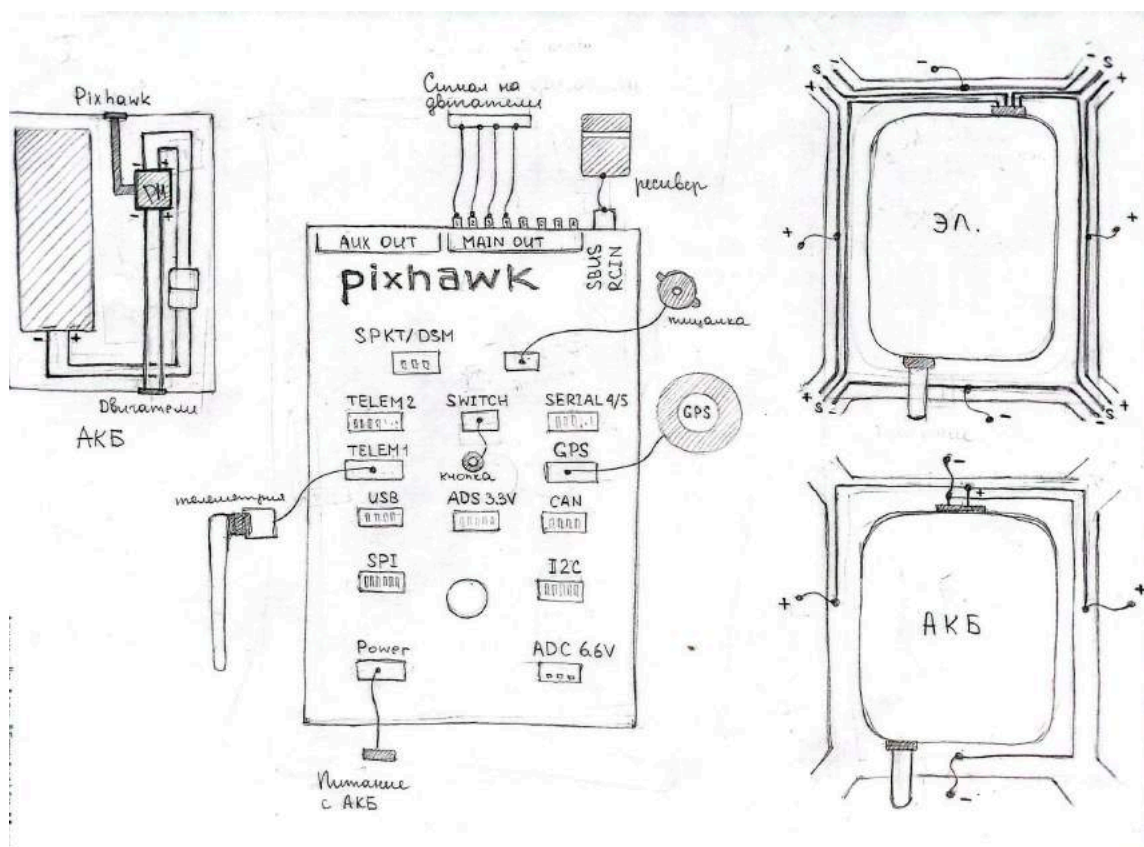


рис. № 14 - Схема подключений электронных компонентов к полетному контроллеру, расположение проводов питания и сигнала.



рис. № 15 - 3D-модель одного из насадков на двигатель

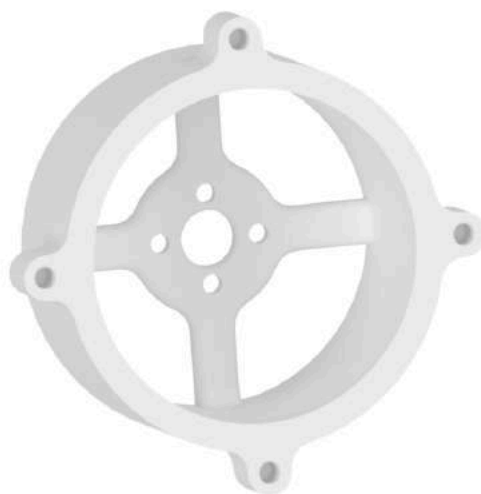


рис. № 16 - 3D-модель крепления для насадок.

Приложение В

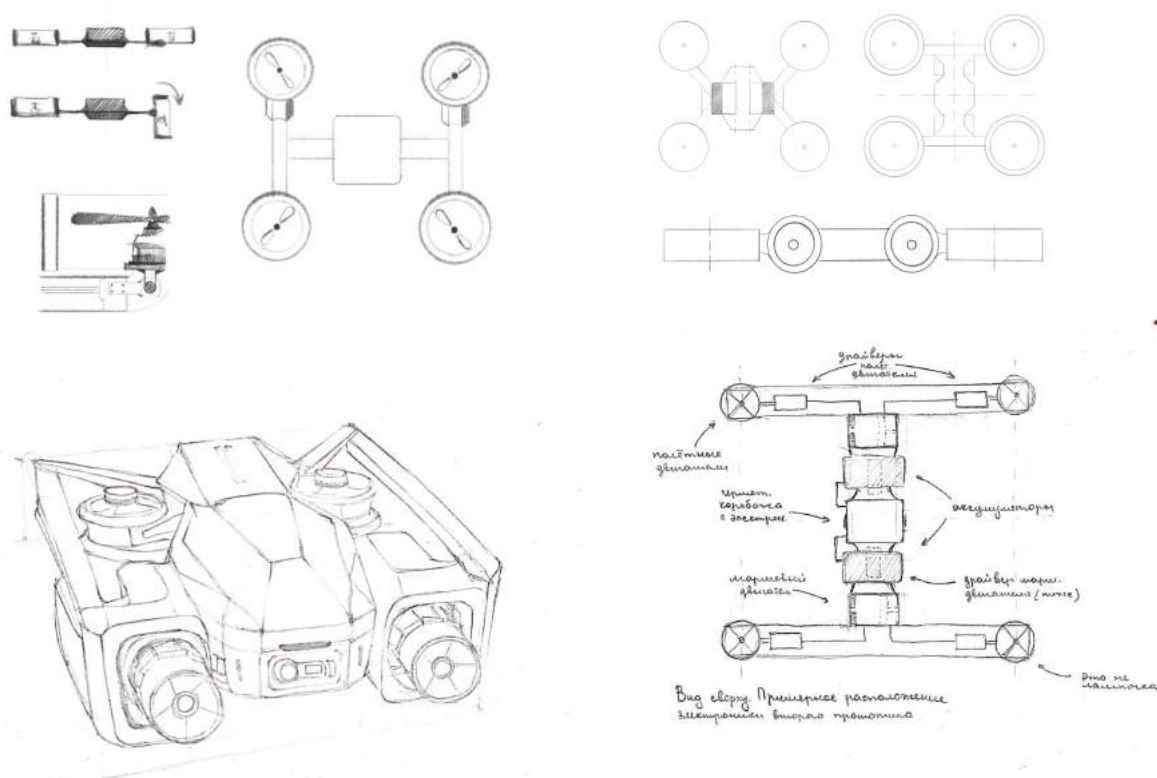


рис. № 17 - Эскизы, созданные на этапе эскизного проекта (на них показаны некоторые идеи реализации двухсредних аппаратов, которые рассматривались в ходе работы над проектом)