

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Розроблення комп'ютерної моделі морського багатофункціонального дрону  
(тема)

Виконав: здобувач 2 року навчання,  
групи КТРСМ-24-2

Владислав АЛЕКСАНДРОВ  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та  
робототехнічні системи  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Євгеній РАЗУМОВ-ФРИЗЮК  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка \_\_\_\_\_

(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи \_\_\_\_\_

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві \_\_\_\_\_ Александрову Владиславу Олексійовичу \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення комп'ютерної моделі морського  
багатофункціонального дрону \_\_\_\_\_

затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1018Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 18.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Тип управління – ручне та автопілот; \_\_\_\_\_

3.2 Напруга акумулятор – 24 В; \_\_\_\_\_

3.3 Повна маса – 200 кг; \_\_\_\_\_

3.4 Габаритні розміри – 2000мм×900мм×450мм; \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ; \_\_\_\_\_

4.2 Аналіз літератури за темою; \_\_\_\_\_

4.3 Розробка електричної частини конструкції; \_\_\_\_\_

4.4 Розробка конструкції корпусу морського багатофункціонального дрону; \_\_\_\_\_

4.5 Охорона праці; \_\_\_\_\_

4.6 Висновки. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

*Демонстраційний матеріал у вигляді презентації 15 с;* \_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою	02.09 – 01.10.2025	Виконано
2	Розробка структурної схеми керування	02.10 – 06.10.2025	Виконано
3	Вибір електронних компонентів	07.10 – 13.10.2025	Виконано
4	Проведення розрахунків корпусу	14.10 – 18.10.2025	Виконано
5	Розробка 3D моделі дрону	19.10 – 03.12 2025	Виконано
6	Симуляція статичного навантаження	04.12 – 06.12.2025	Виконано
7	Подання роботи на перевірку на плагіат	10.12 – 11.12.2025	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	12.12 – 13.12.2025	Виконано
	Подання роботи на рецензію	14.12 – 15.12.2025	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	16.12 – 17.12.2025	Виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	18.12.2025	Виконано

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_ Владислав АЛЕКСАНДРОВ

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Євгеній РАЗУМОВ-ФРИЗЮК  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

Я, Александров Владислав Олексійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"3" грудня 2025 р.



Александров В.О.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 4 табл., 50 рис., 1 дод., 40 джерел.

### МОРСЬКИЙ ДРОН, БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, ПЛАВУЧИСТЬ, СИСТЕМА.

Мета даної роботи – покращення конструкції багатофункціональної морської безпілотної системи.

Об’єкт дослідження – процес експлуатації морських безпілотних систем.

Предмет дослідження – комп’ютерна модель, яка дозволяє зробити процес експлуатації універсальним.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було виконано аналіз літератури за темою безпілотних апаратів, які існують в обраній галузі, виконано розрахунки параметрів дрона та навантажень які діють на нього, виконано 3D моделювання та проведено серію експериментальних симуляцій розроблюваної моделі. Усі параметри виконано згідно наданого ТЗ.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

## ABSTRACT

Explanatory note: 81 p., 4 tabl., 50 fig., 1 app., 40 sources.

MARINE DRONE, MULTIFUNCTIONALITY, MODELING, BUOYANCY, SYSTEM.

The purpose of this work is improving the design of a multifunctional maritime unmanned system.

The object of research is the process of operating marine unmanned systems.

The subject of research is a computer model that allows making the operation process universal.

During the qualification work, an analysis of the literature on the topic of unmanned vehicles that exist in the selected industry was performed, calculations of the parameters of the drone and the loads acting on it were performed, 3D modeling was performed and a series of experimental simulations of the developed model were conducted. All parameters were performed according to the provided technical specifications.

Also, the results of the work can be attributed to the Sustainable Development Goal "Industry, Innovation and Infrastructure", namely item 9.4 "Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the "education - science - production" chains and a cluster approach in the following areas: development of an innovation ecosystem; development of information and telecommunications technologies (ICT); application of ICT in agro-industrial complex, energy, transport and industry; high-tech mechanical engineering; creation of new materials; development of pharmaceutical and bioengineering industries."

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	4
1 Аналіз літератури за темою.....	6
1.1 Види сучасних дронів.....	6
1.2 Приклади використання дронів.....	8
1.3 Огляд аналогів.....	13
2 Розробка електричної частини конструкції.....	23
2.1 Розробка структурної схеми керування .....	23
2.2 Вибір електронних компонентів .....	26
2.3 Створення схеми підключення компонентів.....	37
2.4 Перевірка стійкості системи за критеріями ТАУ.....	42
3 Розробка конструкції корпусу морського багатофункціонального дрону..	46
3.1 Розрахунок корпусу дрона.....	46
3.2 Розробка 3D моделі дрону.....	60
3.2.1 Розробка корпусу дрону.....	60
3.2.2 Розташування електроніки.....	65
4 Симуляція навантажень на корпус дрона.....	68
4.1 Симуляція статичного навантаження.....	68
4.2 Охорона праці.....	75
Висновки.....	77
Перелік джерел посилання.....	78
Додаток А Апробація матеріалів у формі доповіді на конференції.....	83
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	84

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БА – безпілотний апарат;

БМД – безпілотний морський дрон;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ВМС – військово-морські сили;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ТАУ – теорія автоматичного управління;

ХНУРЕ – харківський національний університет радіоелектроніки;

ВЕС – блок виключення батареї;

ESC – електронний регулятор швидкості;

GPS – глобальна система позиціонування;

PWM – широтно-імпульсна модуляція.

## ВСТУП

Впровадження систем автоматизації за останні 10 років має наростаючу тенденцію і на сьогоднішній день лише збільшує свої темпи. Технологічна складність систем, що розробляються і впроваджуються, так само як і їх кількість та сумісність встановлюють перед інженерами та розробниками нові, більш високі стандарти та вимоги до створення, оптимізації та покращення рішень, які пов'язані зі сферою комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки. На тлі постійно зростаючого темпу технологічного прогресу виникають нові проблеми та завдання, які інженери, розробники, технологи та аналітики в рамках своєї кваліфікації мають бути здатними розуміти та знаходити до них відповідні рішення. Одним із подібних найважливіших факторів при роботі з комплексними системами є не лише їх створення, впровадження та обслуговування, а й стандартизація та ергономізація. Економічні, політичні, соціальні та інші фактори та очікування ставлять перед сферою науки нові вимоги, серед яких одним з найважливіших є не тільки виконувати подібними системами функції, а й їх здатність бути універсальними, багатозадачними, оптимізованими та ефективними.

Мета даної роботи – покращення конструкції багатофункціональної морської безпілотної системи.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації морських безпілотних систем.

Предмет дослідження – комп'ютерна модель, яка дозволяє зробити процес експлуатації універсальним.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз літератури за темою;
- вибрати компоненти та знайти актуальні рішення для створення моделі;
- розробити модель та провести її експериментальну перевірку;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи [2].

## 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ

### 1.1 Види сучасних дронів

Для подальшої розробки та симуляції комп'ютерної моделі дрону необхідним є первинний аналіз існуючої інформації на цю тему. Ознайомлення з науковою літературою таким чином виступає як систематизуючий засіб для тієї бази знань, що була накопичена за всі роки досліджень та класифікації технології безпілотних апаратів (дронів). Згідно із статтею «An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys» термін «безпілотний надводний апарат» визначається як [3]: водний корабельний (або човновий) апарат, здатний самостійно або дистанційно керуватися без постійного знаходження на борту людини-оператора, та призначений для виконання завдань на поверхні води (океани, моря, річки, озера).

Безпілотні апарати можуть використовуватися не лише на воді але й на землі та в повітрі. Прикладом розподілу саме безпілотних літальних апаратів може бути робота "Узагальнена класифікація безпілотних літальних апаратів" авторів О.Г. Корченко, О.С. Ілляш, яка зокрема розробляє та пропонує наступну класифікацію за 16 ознаковими признаками [4]:

- використання;
- тип системи управління;
- правила польоту;
- клас ПП;
- тип ЛА;
- тип крила;
- напрям зльоту/посадки;

- тип зльоту/посадки;
- тип двигуна;
- паливна система;
- тип паливного бака;
- кількість використань;
- категорія (з урахуванням маси та максимальної дальності дії);
- радіус дії;
- висота;
- функціональне призначення.

Розвиток технології надводних апаратів (дронів) є високоефективним з огляду на те, що морське середовище несе певний ризик для життя людини при проведенні як надводних так і особливо підводних досліджень або операцій. До таких пристроїв (в залежності від виконуваних задач) застосовуються терміни «безпілотний надводний апарат» або «безпілотний підводний апарат». Безпілотні морські апарати можуть застосовуватися в [5]–[7]:

- цивільній галузі;
- науковій галузі;
- військовій галузі.

Класифікувати морські дрони можна не тільки за сферою застосування, але також і за конструкційними особливостями. Надводні апарати можуть мати форму катера або платформи, що плаває. Підводні у свою чергу матимуть форму підводного човна і головною відмінністю від класичного підводного човна у такому разі буде відсутність внутрішнього простору для знаходження там екіпажу.

Так само як повітряне і водне середовище схильні до застосування безпілотних апаратів, що діють автономно або за принципом дистанційного керування, також і наземне середовище є сферою застосування безпілотних

апаратів. Такі дрони можуть мати різну організацію конструкції та ходової частини. Виділити можна три основні платформи для наземних дронів:

- гусенична платформа;
- колісна платформа;
- шнекова платформа.

Найпоширенішими на сьогоднішній день є саме гусенична та колісна платформи. Такі дрони можуть використовуватися як у цивільних, так і військових цілях. Громадянський сектор застосовує наземні дрони в агрокультурній галузі для доставки корисних вантажів, моніторингу полів та розпилення добрив. Застосування у військовому секторі виражається у використанні наземних дронів для дистанційного розмінування місцевості, евакуації поранених або проведення військових операцій шляхом обладнання таких дронів системами озброєнь, що у свою чергу знижує ризик для життя людини, замінюючи його на дрона.

У зв'язку з темою даної роботи саме безпілотні надводні апарати надалі розглядатимуться детальніше.

## 1.2 Приклади використання дронів

Розглянувши вище приклад класифікації БА за широким переліком критеріїв і параметрів доцільним є приведення прикладів використання конкретних класів і детальний розгляд типових представників кожного з них.

Розглянемо конкретні приклади використання в кожному з класів: цивільному, науковому, військовому.

Військові дрони можуть виконувати різні завдання як по моніторингу водних просторів так і по ураженню цілей: мостів, кораблів, мін, підводних човнів. Застосування морських дронів у військовій сфері є високотехнологічним і вигідним рішенням, оскільки знижує чисельність особового складу та дозволяє військам, задіяним у морських операціях діяти дистанційно без ризику для

життя. Морські дрони також є платформою, яка дозволяє використовувати різні модулі та змінювати компонування обладнання в залежності від поставленого завдання, виконувати широкий спектр завдань. Таким чином дрони можуть використовуватися як для патрулювання узбережжя або спостереження за певним сектором так і для проведення ударних операцій з метою знищення засобів протидії та морської техніки. Яскравим прикладом застосування такого виду дронів є удар дронами-камікадзе Magura V5 які перебувають на озброєнні ВМС України по кораблям Чорноморського флоту [8]. Дрон є одноразовим, несе в носі бойову частину з вибуховою речовиною і по досягненню цілі здійснює підрив бойової частини з подальшим знищенням цілі та самого дрона.

Зовнішній вигляд дрону приведено на рис. 1.1 [9]:



Рисунок 1.1 — Зовнішній вигляд Magura V5

Технічні характеристики дрона наведені у таблиці 1.1 [10]:

Таблиця 1.1 — Технічні характеристики дрону

Характеристика	Значення
Довжина	5,5 м
Повна вага	до 1000 кг

Продовження таблиці 1.1

Характеристика	Значення
Операційний радіус дії	до 400 км
Дальність ходу	до 800 км
Автономність	до 60 годин
Бойове навантаження	до 200 кг
Максимальна швидкість	80 км/год
Способи навігації	автоматична GNSS, інерційна, візуальна
Передача відео інформації	до трьох відеопотоків HD
Криптозахист шифрування	256 біт

Безпілотні надводні апарати у науковій галузі також використовуються. Примітним є той факт, що такі апарати не обов'язково мають форму безекіпажного катера, човна або корабля. Прикладом цього може бути Autonomous spaceport drone ship (автономний безпілотний корабель-космопорт) компанії SpaceX. Даний пристрій являє собою плавучу платформу яка використовується як посадковий майданчик для керуваної посадки першого ступеня ракети-носія Falcon 9, з метою її подальшого відновлення та повторного використання. Використання такої платформи значно підвищує ефективність проведення космічних польотів і знижує їх вартість через можливість багаторазового використання прискорювачів першого ступеня ракети Falcon 9. Платформу розміщують на зазначеному місці заздалегідь за допомогою буксира. Дальність базування плавучої платформи відносно місця запуску ракети становить 300-400 км. Надалі платформа працює в автономному режимі, але є можливість дистанційного керування платформою наприклад для ручного коригування положення в просторі.

На сьогоднішній день компанія SpaceX має у своєму розпорядженні три такі платформи: на Атлантичному океані – «Just Read the Instructions» та «A Shortfall of Gravitas», на Тихому океані – «Of Course I Still Love You». Назви платформ дано на основі творів письменника-фантаста Іена Бенкса.

На рисунку 1.2 приведено зовнішній вигляд платформи [11]:

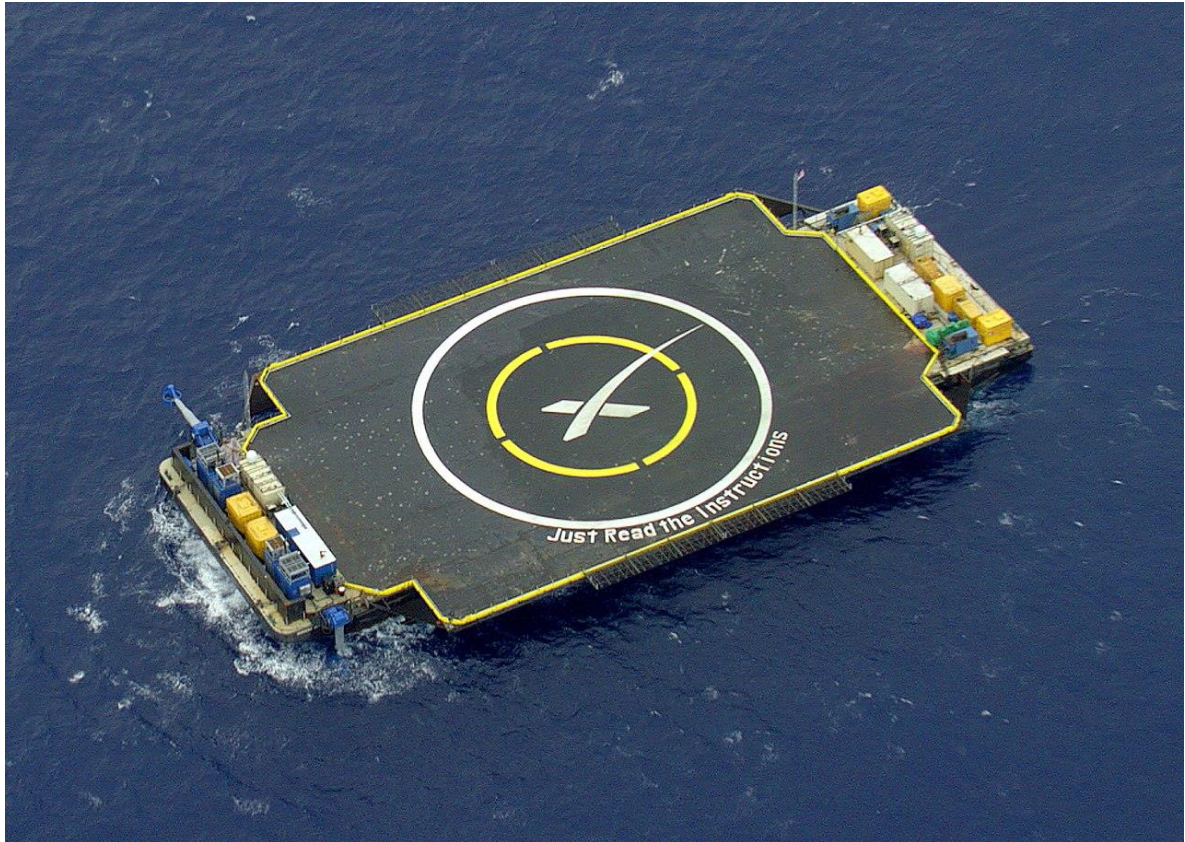


Рисунок 1.2 — Плавуча платформа «Just Read the Instructions»

Технічні характеристики платформи приведено в таблиці 1.2 [12]:

Таблиця 1.2 — Технічні характеристики плавучої платформи

Характеристика	Значення
Довжина	87,8 м
Ширина	30,5 м
Висота	6 м
Точність утримання положення	$\pm 3$ м
Двигун	4 дизельні азимутальні двигуни Thrustmaster
Способи навігації	GPS

Морські дрони також можуть ефективно застосовуватися в галузі збору інформації про навколишнє середовище, океанографії, екосистемі морів. Прикладом є безпілотні надводні апарати компанії Sairdrone. Дрони даного типу

мають назву аналогічну назві компанії: вітрильні дрони. Вітрильний дрон - це тип безпілотного надводного транспортного засобу, що використовується в основному в океанах для збору даних. Вітрильні дрони працюють на енергії вітру та сонця та оснащені набором наукових датчиків та навігаційних інструментів. Вітрильні дрони використовувалися вченими та дослідницькими організаціями, такими як Національне управління океанічних та атмосферних досліджень (NOAA), для дослідження морської екосистеми, рибних ресурсів та погоди [13]. У січні 2019 року було запущено невеликий флот вітрильних дронів для спроби першого автономного навколосвітнього плавання над Антарктидою. Один із вітрильних дронів завершив місію, подолавши 20 100 км за сім місяців подорожі, одночасно збираючи докладний набір даних за допомогою бортових приладів для моніторингу навколишнього середовища [14]. Saildrone та NOAA розмістили п'ять модифікованих суден класу «Ураган» у ключових точках Атлантичного океану перед початком сезону ураганів у Червні 2021 року. У вересні дрон SD 1045 знаходився на місці, щоб отримати відео та дані зсередини урагану Сем. Це був перший дослідний дрон, який опинився в центрі сильного урагану [15]. Конфігурація дрона SD 1045 включала наступне обладнання:

- відеокамери;
- датчик вітру;
- проблисковий маячок;
- датчик рівня освітленості;
- датчик температури та вологості повітря;
- датчик температури та солоності води;
- барометр;
- датчик висоти та періодичності хвиль;
- датчик океанських течій.

Зовнішній вигляд дрону приведено на рисунку 1.3 [16]:



Рисунок 1.3 — Зовнішній вигляд Saildrone

### 1.3 Огляд аналогів

Розглянемо переваги та недоліки кожної можливої моделі у контексті порівняння їх між собою. Головними визначальними параметрами катера як плавального засобу є мореплавство та маневреність, швидкість. Вони в свою чергу визначаються і досягають конкретних значень вибором двох основних чинників: рушій і корпус. Розглянемо та порівняємо детально всі переваги та недоліки матеріалів корпусу а саме:

- склопластик;
- дерево;
- сталь;
- алюміній.

Також необхідним є аналіз і порівняння видів рушіїв, серед яких:

- гвинтовий двигун;
- водомітний двигун;
- двигун із підводними крилами.

Склопластик є сучасним високотехнологічним композитним матеріалом, що складається зі скляних або кварцових волокон і сполучного матеріалу на основі термореактивних та термопластичних полімерів.

Безумовними плюсами такого матеріалу є його міцність та довговічність. В основі цих якостей лежить той факт, що даний матеріал не сприйнятливий до корозії та впливу ультрафіолетових променів. Щільність склопластику, який отримано шляхом пресування чи намотування, становить приблизно від  $1,8 \text{ г/см}^3$  до  $2,0 \text{ г/см}^3$ , що робить його легким відносно інших матеріалів. При цьому варто відзначити, що міцність такого матеріалу є достатньою для його використання у створенні корпусу та окремих його структурних елементів. Висока міцність, несприйнятливості до корозії та інших факторів, довговічність даного матеріалу роблять його невибагливим до догляду та ремонту під час експлуатації. Високотехнологічність склопластику також тягне за собою той факт, що на стадії його створення стає можливим надання йому практично будь-якої форми, переходів, вигинів шляхом використання заготівельних форм, на які накладають шари матеріалу вручну або методом напилення. Гладкість поверхні склопластику також є безумовним плюсом у контексті використання його для створення корпусу надводного безпілотного апарату.

Як і будь-який матеріал, склопластик має низку недоліків. Будучи композитним матеріалом, він вимагає наявності дорогого обладнання та кваліфікованого робочого персоналу, що загалом підвищує труднощі його створення. Хоча сам матеріал на сьогоднішній день добре освоєний у виробництві та застосуванні, а його власна ціна є відносно невеликою, первинні витрати на створення виробничих потужностей ускладнюють процес. Будучи шаруватим композитом склопластик схильний до розколювання при сильних

ударах, що є недоліком у порівнянні з іншими матеріалами, які здатні до амортизації та деформації із збереженням своєї структури. Смола яка використовується для зв'язування між собою скловолокна не є повністю водонепроникною, що робить склопластик схильним до водонасичення з часом. Цей фактор може порушувати структуру матеріалу і змінювати його форму.

Деревина є одним із найдавніших матеріалів які використовуються у створенні кораблів та інших плавальних засобів. Її плюси в контексті використання як матеріал корпусу добре вивчені і багаторазово підтверджені на практиці, але ряд недоліків робить деревину недоцільною для використання в окремих випадках.

Безумовними плюсом цього матеріалу є його природна плавучість. Деревина має щільність меншої щільності води, що дозволяє їй знаходитися на поверхні, а при достатньому обсязі навіть перевозити на собі корисне навантаження. Даний фактор був визначальним для кораблебудування в минулому, так як деревина була широко поширена і була добре податливою до обробки. Волокниста структура дерева та його щільність надають цьому матеріалу гнучкість і можливість до деформації без розколювання, що у свою чергу підвищує удароміцність і в цілому робить деревину здатною переносити та амортизувати удари. До того ж даний матеріал має малу теплопровідність, що дозволяє ізолювати внутрішній простір корпусу від впливу температури води як у спекотному так і в холодному кліматі.

Ряд недоліків все ж таки обмежує застосування деревини в якості матеріалу для створення корпусу. Так наприклад можна виділити вимогливість даного матеріалу до первинної обробки та постійного обслуговування. Для використання деревини у створенні корпусів морських апаратів необхідне її покриття спеціальними водовідштовхувальними та консервуючими засобами з метою запобігання гниття та руйнування структури. У ході експлуатації необхідний постійний догляд та регулярне оновлення покриття деревини, що робить її більш трудомістким матеріалом у порівнянні з іншими. Зважаючи на

дані фактори деревина є менш довговічною ніж композитні матеріали та метали, має менший термін служби. До того ж вага в окремих випадках і конструкціях може бути навіть більшою ніж у металів і значно більше ніж у композитних матеріалів.

Алюміній є одним із найпоширеніших металів і знаходиться у великих запасах у земному ґрунті. За своїми характеристиками ваги, міцності, щільності добре підходить для застосування в широкому спектрі інженерних споруд та пристроїв, та активно застосовується як у будівництві, машинобудуванні, літакобудуванні так і в морській галузі.

Великим плюсом є фізичні та хімічні властивості даного металу в контексті використання його як матеріалу для корпусів морських апаратів. Алюміній є легким металом, при цьому досить міцним і гнучким, що ставить його в більш вигідне положення щодо сталі або інших металів. До того ж важливим у контексті морської галузі є природна стійкість до корозії, характерна для алюмінію. Така характеристика пояснюється здатністю алюмінію утворювати на своїй поверхні оксидну плівку, яка захищає структуру матеріалу від впливу зовнішнього середовища (в даному випадку прісної та солоної води). Ремонтнопридатність алюмінію полягає у простоті його зварювання у разі утворення тріщин або пробоїн. Така характеристика властива більшості металів, але по ряду інших переваг даний матеріал є кращим до використання. Загалом весь перелік переваг даного матеріалу робить його термін служби більшим, а експлуатацію невибагливою. Корпуси з алюмінію довговічні.

Головним мінусом алюмінію є його ціна. Залежно від якості та товщини листа алюміній може бути значно дорожчим за сталь. Варто також зазначити фактор шуму. Звукові хвилі дуже швидко поширюються в металі і при ударах об хвилі алюмінієвий корпус може резонувати, доставляючи дискомфорт у тому випадку, якщо поблизу є люди. Важливим фактором є обмежена в порівнянні з композитними матеріалами можливість до надання форми алюмінію. Формування алюмінію можливе і здійснюється в умовах сьогодення

технологічного розвитку, але не може зрівнятися з можливостями формування, наприклад склопластику. Дані недоліки не є критичними, але все ж таки вносять обмеження у повсюдне використання даного матеріалу.

Сталь є одним із найпоширеніших сплавів, виробляється із заліза та вуглецю, вміст якого чітко регламентується й лежить в показниках від 0,02 % до 2,14 %. Широко застосовується практично у всіх сферах промисловості (як легкої так і важкої), інфраструктурі, медицині, енергетиці, при виробництві побутових виробів, в оборонній промисловості.

Головною перевагою сталі як матеріал є її невибагливість до експлуатації. Сталеві вироби можуть десятками років перебувати в експлуатації без зниження характеристик самого матеріалу. Прикладом цього можуть стати сталеві мости. З-за своєї щільності лежить в межах від 7,7 г/см до 7,9 г/см сталь є дуже міцним матеріалом, здатним переносити тривалі навантаження, різні температурні режими, удари, вібронавантаженість. У суднобудівництві сталь використовується як для будівництва малих катерів так і великих вантажних кораблів для міжнародної торгівлі. Сталеві корпуси та конструкційні елементи давно використовуються в цій сфері, добре вивчені їх властивості, поведінка під час експлуатації, вимоги до ремонту, термін служби та зносостійкість. Ремонтопридатність сталі навіть вища ніж у алюмінію, адже для зварювання алюмінію потрібне спеціальне зварювання з використанням аргону. Сталь у свою чергу піддається звичайному електродуговому зварюванню. Для проведення ремонту потрібен невеликий спектр інструментів та обладнання, а витрати за часом та працею не такі великі як у випадку з деревом чи алюмінієм.

Серед всіх матеріалів у сталі найвища щільність, що позитивно позначається на її міцності але прямо впливає на вагу. Сталеві конструкції та корпуси можуть важити значно більше ніж алюмінієві, дерев'яні або композитні корпуси при тих самих розмірах та формі. На відміну від алюмінію сталь не має стійкості до корозії і у разі сферою морських апаратів на прикладах торгових кораблів можна чітко простежити, що сталеві корпуси вимагають фарбування

для захисту від корозії, до того ж виникає необхідність регулярного зняття окисленого шару методом шліфування та частого оновлення шару. Виникає необхідність регулярного дрібного ремонту або використання в якості альтернативи нержавіючої сталі: сплаву, що має у своєму складі хром.

При побудові моделі безпілотного надводного апарату варто уважно віднестись до вибору рушія. З цією метою нижче наведено аналіз та порівняння різних варіантів двигунів.

Гребний гвинт є найпоширенішим сучасним рушієм на морських апаратах усіх класів. Будь-який сучасний гребний гвинт є лопатевим. Складається з лопатей та маточини. Лопаті встановлені на ступиці радіально, на однаковій відстані один від одного, повернені на однаковий кут щодо площини обертання.

Плюсом такого рушія є його простота у виготовленні та масовість. Гребні гвинти можуть бути виготовлені як єдина деталь методом виливка металу у форму з подальшою чистовою обробкою. Широке поширення робить цю конфігурацію ремонтно-придатною і у разі пошкодження гвинта легко здійснити повну його заміну на новий. Застосовуватися можуть як двох так і трилопатевої конфігурації. На високих швидкостях такі двигуни працюють стабільно і тим самим створюють високу паливну ефективність роботи. Такі гвинти забезпечують гарне зчеплення з водою, що сприяє активному набору швидкості та маневрування.

Серед недоліків можна виділити незахищеність та вразливість гребних гвинтів від пошкоджень у вигляді каменів, водоростей чи сміття. Вплив даного фактора знижується шляхом встановлення імпеллерів, але не прибирає проблему повністю. Ефективність гребних гвинтів спостерігається тільки при наборі швидкості та її підтримці. У разі є гвинт зупинений він працює як перешкода водному потоку, тим самим виступаючи як активне гальмо. Маневрування є ефективним лише на високій швидкості, здатність до активного маневру значно знижується зі зниженням швидкості руху. Гребні гвинти схильні до негативного впливу ефекту кавітації при тривалому терміні експлуатації. Під час роботи

гребні гвинти створюють значний шум і вібрацію, яка може негативно позначатися на навколишньому середовищі, або у випадку з військовими кораблями може бути використана противником для виявлення та наведення озброєнь на корабель. Також гребний гвинт під час роботи може нести серйозну небезпеку, якщо поруч у воді або під водою знаходиться людина.

Водометний рушій – тип рушія, у якого сила, що рушить судно, створюється за допомогою струменя води, що виштовхується з нього, тобто за допомогою реактивної тяги. Конструкційно є водяний насос, що працює під водою. Складається з імпелера, водометної труби та реверсивного пристрою для руху назад.

Перевагами такого рушія є висока маневреність плавального засобу, можливість переднього і заднього ходу, в окремих випадках можливість ходу боком. Сам гвинт усередині водомета працює фактично в ідеальних умовах і не схильний до впливу водних потоків і течій ззовні. Така конфігурація рушія дозволяє ефективно маневрувати на малих швидкостях та у вузьких отворах. З'являється можливість розвороту дома. У порівнянні з гребним гвинтом водометний рушій є безпечним через те, що у нього відсутні виступаючі частини, а імпелери розміщені всередині водометної труби. Так само з'являється можливість проходження по мілководді або в місцях де дно засмічене, тому що весь механізм рушія захищений, що в порівнянні зі звичайним гребним гвинтом є значною перевагою. Під час руху катери обладнані таким рушієм більш стійкі через те, що рушій "притягує" апарат до води, з'являється можливість здійснювати різкі маневри. Також у порівнянні з гребними гвинтами знижується гідродинамічний шум, що особливо важливо для підводних човнів та військових кораблів.

Недоліком є менший у порівнянні з гребними гвинтами ККД на малих швидкостях через те, що крім корисного навантаження доводиться перевозити ще й вага води, що знаходиться всередині водометної труби, є втрати потужності через тертя води об стінки трубопроводу і втрати потужності через турбулентні

завихрення потоку води в каналах водомета. Більш складна конструкція вимагає більше часу і витрат на ремонт у разі виходу з ладу, що в свою чергу підвищує вартість ремонту. На вартість також впливає вища ціна на комплектуючі, а перелік комплектуючих може бути обмежений і не вироблятися масово. В цілому управління апаратом обладнаним водометним рушієм на малих швидкостях є складнішим і своєрідним.

Двигун у вигляді підводних крил працює наступним чином: Підводні крила, що знаходяться під корпусом, створюють підйомну силу і частково або повністю піднімають корпус судна над поверхнею води, що призводить до значного зменшення опору руху крізь воду і дозволяє розвивати високу швидкість. На стоянці та при ході на малій швидкості апарат на підводних крилах утримується на воді за рахунок сили Архімеда, як і звичайний плавальний засіб. При виході на високу швидкість за рахунок створюваної цими крилами підйомної сили апарат піднімається над водою. При цьому значно зменшується площа контакту з водою та гідродинамічний та лобовий опір води, що дозволяє розвивати більш високу швидкість. Управління підводними крилами здійснюється як шляхом зміни кута атаки (повороту всього крила) так і за допомогою закрилків. При цьому існує два типи підводних крил: частково занурене крило (U-подібне) і повністю занурене крило (крило у формі перевернутої букви T).

Головною перевагою такої конфігурації є висока швидкість ходу, яка перевищує швидкість ходу при використанні гребного винта або водомета. Час подолання відстані до пункту призначення значно знижується. При русі на крилах опір навколишнього середовища значно нижчий, що дозволяє легко підтримувати високу швидкість. Хороші морехідні якості пов'язані з тим, що при достатній довжині стійок крил такий апарат може стати несприйнятливим до хитання і хвилювання.

Головним мінусом таких апаратів є низька економічність у порівнянні з класичними типами. При великому хвилюванні хвиля може ударити об корпус

плавального засобу, збиваючи його з курсу або дестабілізуючи, або оголювати крила при проходженні найвищої точки хвилі. Неможливість підходу апаратів такого типу до берега або до звичайних стоянок через глибоке осідання крил. Також існує необхідність наявності двигунів (бензинових або дизельних) достатньої потужності, які можуть забезпечити виведення апарату зі звичайного положення в положення ходу на крилах, за недостатньої потужності вся концепція руху на підводних крилах втрачає сенс.

#### 1.4 Формулювання вимог до морського багатфункціонального дрону

Морська поверхня дозволяє використовувати технічні та плавальні засоби широкого спектру завдань, у зв'язку з чим є сприятливим середовищем для формування, тестування та експлуатації плавальних засобів практично в будь-якій сфері. Попередньо можна сформулювати наступний список можливих варіантів використання багатфункціональних морських дронів:

а) наукові та дослідні завдання:

- 1) океанографічні виміри (температура, солоність, перебіг, хвильова активність);
- 2) моніторинг екосистем та морської біоти;
- 3) збирання проб води, донних відкладень, планктону.

б) охорона навколишнього середовища:

- 1) контроль рівня забруднення та нафтових розливів;
- 2) моніторинг викидів та стоків у прибережній зоні;
- 3) виявлення та локалізація джерел забруднення.

в) військово-морські та оборонні застосування:

- 1) розвідка та патрулювання акваторій;
- 2) протимінні операції;
- 3) забезпечення зв'язку та ретрансляція даних між підрозділами;
- 4) супровід кораблів та охорона портів.

г) комерційне та промислове використання:

- 1) інспекція морських платформ, кабелів, трубопроводів та вітряних електростанцій;
- 2) забезпечення безпеки судноплавства та маршрутів;
- 3) логістичні місії – доставка невеликих вантажів чи обладнання.

д) рятувальні та гуманітарні операції:

- 1) пошук людей та судів (SAR-місії);
- 2) доставка рятувальних засобів чи засобів зв'язку;
- 3) моніторинг погодних умов при штормах та цунамі.

е) навігаційні та комунікаційні функції:

- 1) картографування дна та навігаційних небезпек;
- 2) ретрансляція сигналів зв'язку між суднами, безпілотниками та берегом.

ж) освітні та експериментальні проекти:

- 1) випробування нових систем управління та сенсорів;
- 2) дослідження взаємодії робототехнічних систем у морському середовищі.

Виходячи з вищенаведених потенційних спектрів виконуваних дроном завдань можна сформулювати попередні умови та аспекти його конструкції. В даному випадку морський надводний дрон внаслідок своєї багатофункціональності повинен мати достатні морехідні якості стійкості, плавучості, швидкості ходу, зв'язку та управління і потенційно мати універсальну конструкцію яка дозволила б застосовувати модульність або багатозадачність виконуваних функцій і комплектуючих.

## 2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ КОНСТРУКЦІЇ

### 2.1 Розробка структурної схеми керування

Для подальшого розвитку та побудови моделі дрона необхідно сформулювати системи, необхідні для його роботи. Перш за все, такий морський дрон потребує системи керування.

Специфіка подібної системи управління полягає у широкому використанні сучасних систем зв'язку та аналізу даних та вимагає використання різних протоколів та стандартів під різні завдання залежно від функціонального призначення дрону. У загальному вигляді структурна схема управління морським багатофункціональним дроном може бути поділена на рівні наступним чином:

- фізичний рівень (апаратна платформа);
- серійний/периферійний рівень;
- бортовий обчислювальний рівень (mission computer/autonomy stack);
- комунікаційний рівень;
- операторський рівень (GCS та Cloud).

На фізичному рівні це можуть бути датчики, виконавчі механізми, силова підсистема, платформа корпусу.

На серійному або периферійному рівні можуть використовуватися мікроконтролери для низькорівневого управління двигунами, сенсорами, АЦП/ЦАП, драйверами клапанів.

На бортовому обчислювальному рівні може бути навігація, планування місії, обробка датчиків, злиття даних разом, GUI або логіка.

На комунікаційному рівні це може бути радіолінія, супутник, 4G, мост Ethernet, ретрансляція телеметрії або віддалена станція керування.

На операторському рівні працює людина-оператор (якщо дрон не цілком автоматичний), візуалізація, планування місій, зберігання даних, OTA-оновлення.

У загальному виді взаємозв'язок рівнів всередині структурної схеми управління морським багатофункціональним дроном можна зобразити графічно.

Нижче приведено структурну схему (рис. 2.1).

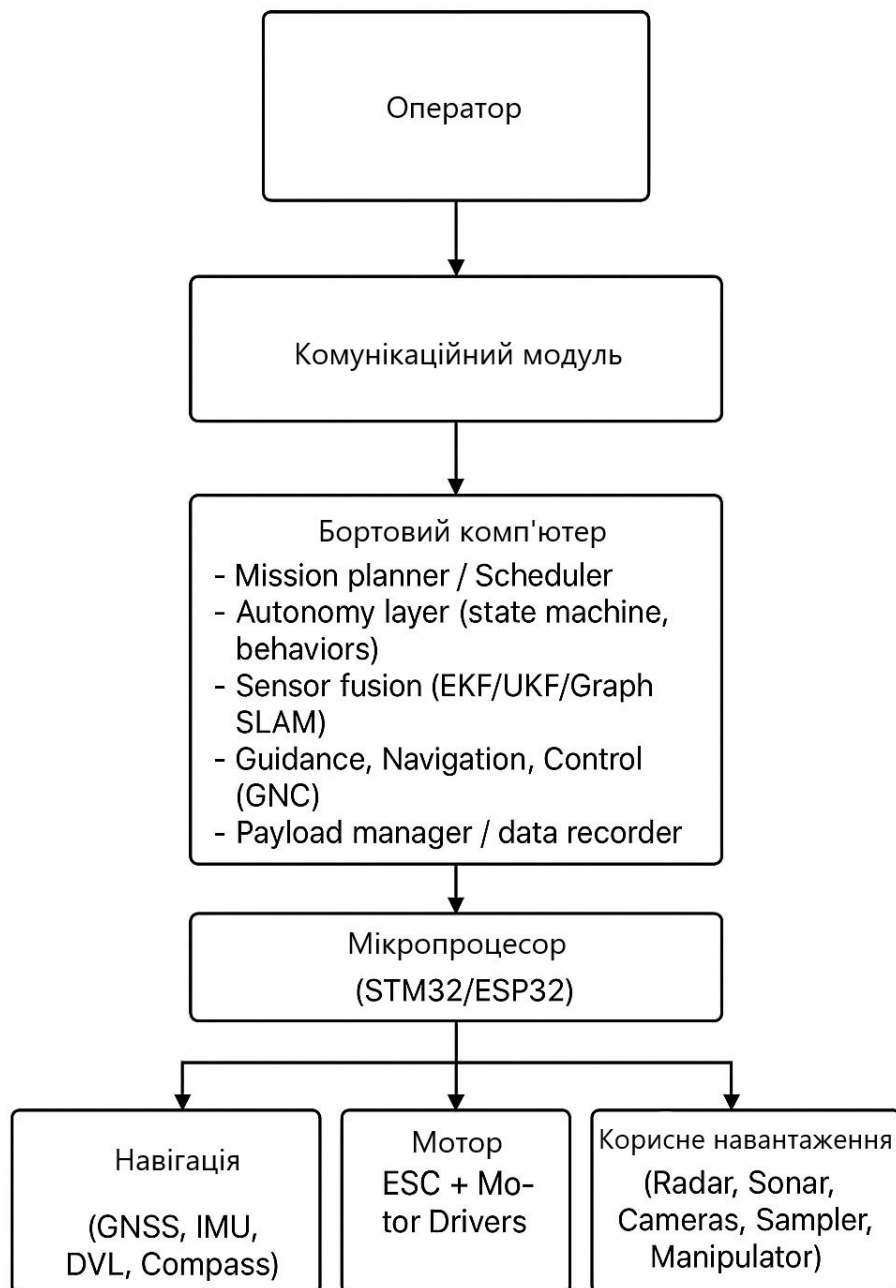


Рисунок 2.1 – Структурна схема в загальному вигляді

При інших рівних характеристиках і вступних параметрах у існуючих на сьогоднішній день морських дронів і платформ є певна обмеженість у гнучкості і спектрі завдань, що пов'язана зі специфікою розроблених для них систем і комплектуючих, які у свою чергу утворюють системи, які найчастіше спеціалізовані на виконання одного певного завдання. У зв'язку з цим з'являється проблема для експлуатантів, адже якщо виникають завдання, що виходять за рамки виконуваних завдань одним конкретним дроном, з'являється необхідність його глибокої модернізації або модифікації з подальшою оптимізацією під нове поставлене завдання, або створення нового морського дрона або покупка такого у виробників у даній сфері.

У цьому відношенні подальша розробка структурної схеми управління морським дроном, вибір комплектуючих для електричної схеми, розрахунки корпусу, двигуна та електроніки, а також побудова комп'ютерної моделі та проведення симуляції робочих навантажень необхідно проводити, виходячи з цієї думки. Розроблений дрон повинен бути багатофункціональним, універсальним, і однаково ефективно справлятися з різними завданнями з переліку тих, що теоретично можуть бути поставлені до виконання. Ефективність систем дрона, що розробляється, у свою чергу повинна перевершувати існуючі аналоги не тільки за фактором універсальності, але й за конкретними показниками та характеристиками, які застосовуються для оцінки та типізації технічних засобів, що експлуатуються у водному середовищі.

В результаті проведеного дослідження було розроблено блок-схему підключення елементів (рис. 2.2).

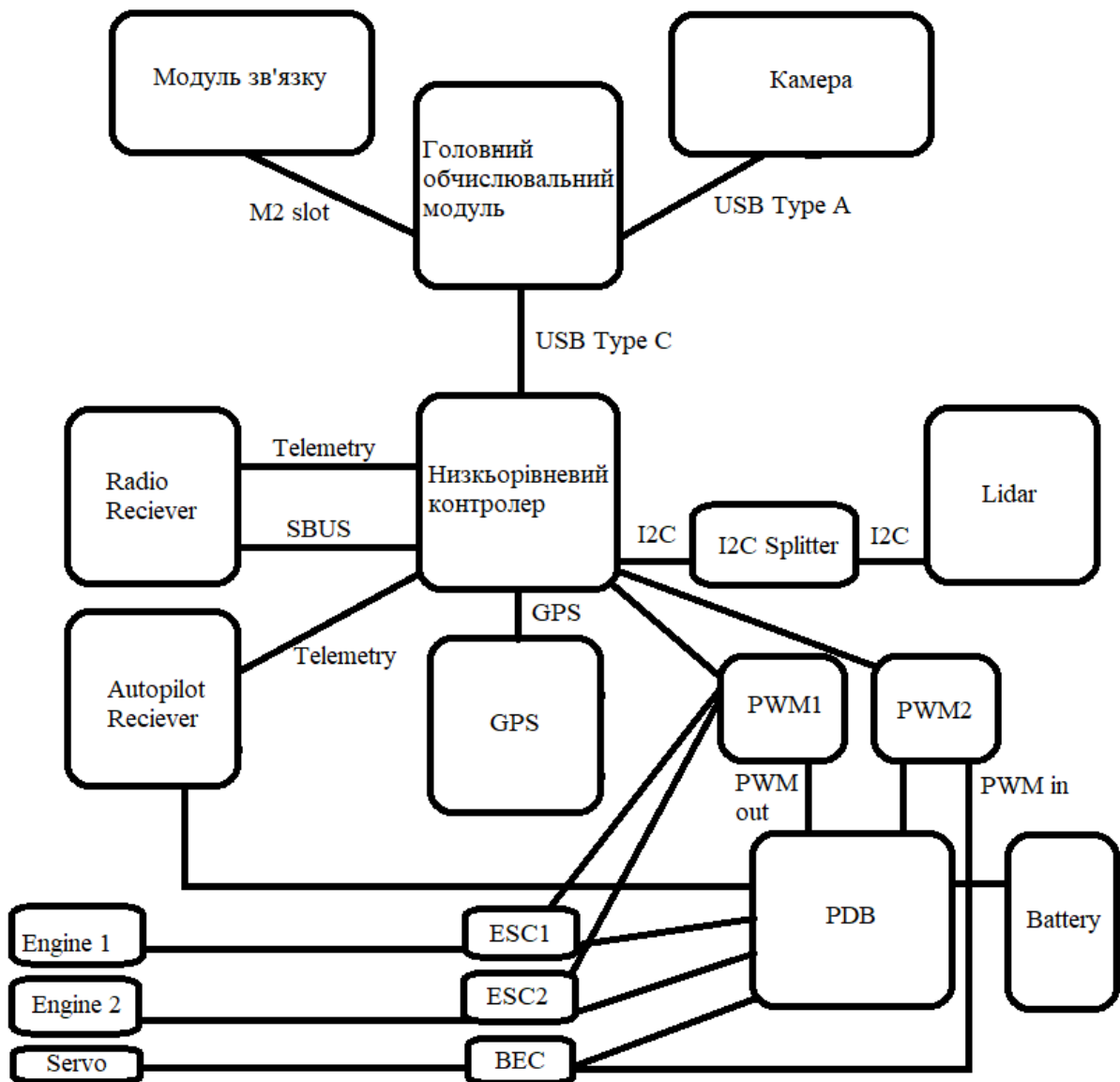


Рисунок 2.2 – Блок схема підключення елементів

## 2.2 Вибір електронних компонентів

При побудові моделі, що розглядається в даній роботі, наступним логічним етапом після формулювання загальної структурної схеми рівнів задіяних у морському багатофункціональному дроні є перехід до вибору конкретних електронних компонентів, які будуть задіяні в моделі, що симулюється, і задовольняють поставленим вимогам, функціям і завданням.

Виходячи з проведеної раніше аналітичної роботи стає можливим формулювання обов'язкових електронних компонентів дрона, що моделюється:

- головний обчислювальний модуль;
- низькорівневий контролер;
- елементи руху та управління;
- елементи електроживлення;
- навігація та датчики;
- камера та відеосистема;
- засоби зв'язку.

В якості головного обчислювального модуля було обрано Jetson nano від компанії NVIDIA. За своїми характеристиками даний контролер цілком задовільняє поставленим попередньо завданням, та підходить для використання. Офіційно компанія NVIDIA визначає даний контролер наступним чином : «Jetson Nano — це невеликий, потужний комп'ютер для вбудованих програм та штучного інтелекту в Інтернеті речей, який забезпечує можливості сучасного штучного інтелекту» [17].

На рисунку 2.3 приведено зовнішній вигляд контролера [18].

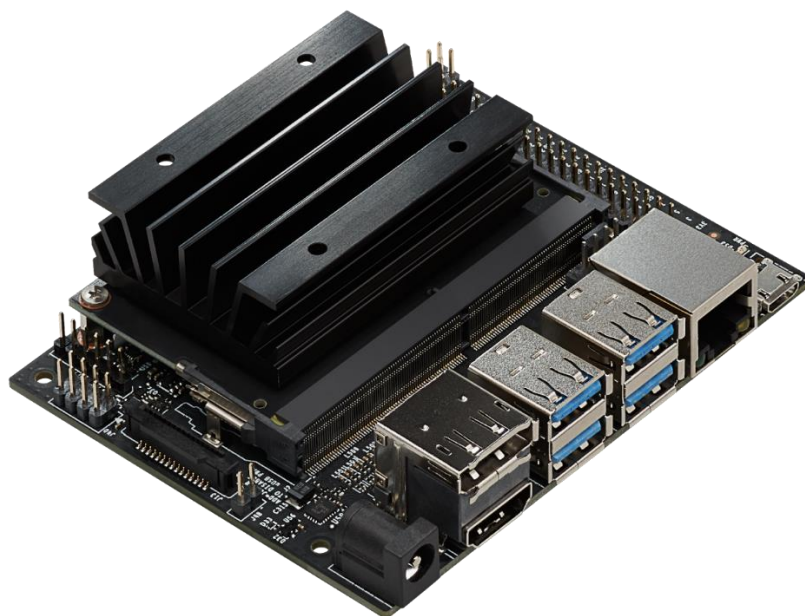


Рисунок 2.3 – Jetson nano

Технічні характеристики контролера приведені в таблиці 2.1 [19].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Jetson nano

Параметр	Значення
Центральний процесор	64-bit Quad-core ARM A57 1.43GHz
Графічний процесор	128-core NVIDIA Maxwell 921MHz
Оперативна пам'ять	4GB 64-bit LPDDR4 1600MHz, 25.6 GB/s
USB	4x USB 3.0 A (Host) або USB 2.0 Micro B (Device)
Вихід відео	HDMI або DisplayPort
Вхід для камери	MIPI CSI-2 x2 (15-position Flex Connector)
Інтернет інтерфейс	Gigabit Ethernet (RJ45)
Бездротовий зв'язок	M.2 Key-E with PCIe x1
Сховище	MicroSD
Інші інтерфейси	(3x) I2C або (2x) SPI або UART або I2S або GPIOs

В якості низькорівневого контролера було обрано Pixhawk 6C. Контролер широко застосовується в побудові безпілотних літальних апаратів, але за своїми характеристиками підходить й для побудови морського дрона.

Розробник описує даний модуль наступним чином : «Pixhawk 6C – це останнє оновлення успішної родини контролерів польоту Pixhawk, заснованих на відкритому стандарті Pixhawk FMUV6C та стандарті Connector. Він постачається з попередньо встановленим PX4. Усередині Pixhawk 6C ви можете знайти STM32H743 на базі STMicroelectronics у поєднанні з сенсорною технологією від Bosch та InvenSense, що забезпечує вам гнучкість та надійність керування будь-яким автономним транспортним засобом, що підходить як для академічних, так і для комерційних застосувань» [20].

На рисунку 2.4 приведено зовнішній вигляд контролера [21].



Рисунок 2.4 – Pixhawk 6C

Виробник даного польотного контролера також виробляє широкий спектр різних додаткових модулів зв'язку, телеметрії та управління комплектуючими дрона і в документації пропонує схему підключення всіх додаткових модулів до даного контролера.

На рисунку 2.5 приведено схему підключення додаткових модулів [22].



Наступним кроком було обрано необхідні комплектуючі які відповідають за рух та управління дрона.

В якості двигуна було обрано T500 thruster від виробника BlueRobotics в кількості двох штук. Дані двигуни розроблялися для широкого діапазону можливих використань та спеціалізовані для встановлення на морські дрони надводного або підводного руху.

На рисунку 2.6 зображено зовнішній вигляд двигуна [23].



Рисунок 2.6 – Двигун T500 thruster

Для контролю швидкістю обертів двигунів необхідно встановити силові контролери. В технічній документації до вищевказаних двигунів виробник пропонує готове рішення щодо використання силових контролерів їхнього виробництва. Таким чином було обрано силові контролери Basic ESC 500 в кількості двох штук з приводу їхньої сумісності з обраними двигунами та попередньо проведеними розрахунками робочих навантажень та тестів.

Зовнішній вигляд силового контролера приведено на рисунку 2.7 [24].

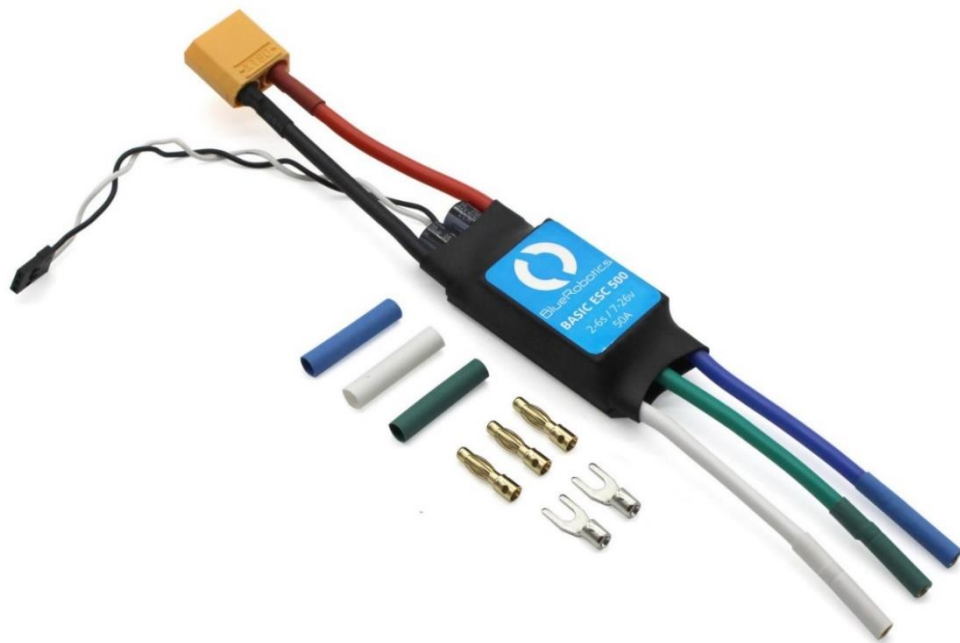


Рисунок 2.7 – Силовий контролер

Для управління поворотом дрона необхідно направляти потік води, що створюється двигунами. Існують різні варіанти управління за цим методом і серед них у даній роботі було обрано управління за рахунок крила, яке приводиться в рух за допомогою сервопривода. Враховуючи інші параметри розроблюваного дрона було обрано сервопривод Savox SW-1210SG. Обраний сервопривод має зусилля рівне 32 кг, а також є цілком водонепроникним, що цілком задовільняє умовам експлуатації дрона.

На рисунку 2.8 приведено зовнішній вигляд сервопривода [25].



Рисунок 2.8 – Сервопривод Savox SW-1210SG

У питанні електроживлення для електронних комплектуючих морського багатофункціонального дрона, що розробляється, головним питанням крім достатніх показників напруги, сили струму і ємності обраного джерела живлення також є питання підвищеної безпеки самої акумуляторної батареї та її технологія. Найбільш поширені акумулятори, що використовують технологію літій-іонної передачі заряду, повністю відповідають вимогам до електроживлення ланцюга елементів дрону, але з огляду на специфіку використовуваної технології є пожежонебезпечними, що в свою чергу стає особливо критичним фактором в умовах експлуатації у водному середовищі. Коротке замикання подібного типу акумуляторів спричиняє пожежу та потенційно тягне за собою повне знищення всієї одиниці техніки. У зв'язку з цим замість літій іонного акумулятора в даному випадку було ухвалено рішення використовувати акумулятор, що працює на технології літій-залізо-фосфатного перенесення заряду.

Даний вид акумуляторів є різновидом літій іонний акумуляторів, але на відміну від них не спалахує при виході з ладу, що є безумовним і необхідним плюсом у питанні ремонтпридатності та збереження дрона у випадках поломки або виходу з ладу головного бортового джерела живлення.

Для цього було обрано літій-залізо-фосфатний акумулятор від виробника Victron energy. Даний акумулятор (рис. 2.9) має напругу 12 вольт та ємність 200 ампер/год [26]. Для розроблюваного дрона необхідно зробити послідовне з'єднання двох таких акумуляторів щоб отримати робочу напругу для двигунів та інших комплектуючих.



Рисунок 2.9 – Акумуляторна батарея

Для орієнтації дрона у просторі було обрано модуль позиціонування Holybro M10 GPS (рис. 2.10) [27]. Вибір був зроблений у зв'язку з його прямою сумісністю з головним контролером, те саме стосується всіх інших обраних модулів телеметрії, зв'язку і контролю навколишнього простору.



Рисунок 2.10 – Модуль GPS

Для додаткового картування навколишнього простору в реальному часі в контексті створення багатофункціональності дрона, що розробляється, актуальним рішенням є використання датчика lidar.

Lidar – це лазерний локатор, який використовує технологію відправлення лазером хвиль оптичного діапазону з подальшою реєстрацією лазерних імпульсів, розсіяних об'єктами.

Як робоче рішення для схеми, що розробляється, був обраний датчик Holybro ST VL53L1X (рис. 2.11) [28].

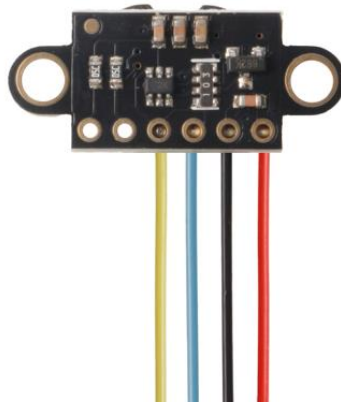


Рисунок 2.11 – Датчик lidar

В якості камери було обрано робоче рішення від BlueRobotics у вигляді моделі під назвою Low-Light HD USB Camera (рис. 2.12) [29]. Обрана камера позиціонується виробником як спеціалізована для підводної зйомки, що повністю задовольняє завданням, що поставлені в даній роботі. Робочий температурний діапазон камери лежить в межах від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимальна роздільна здатність зйомки дорівнює 1080р при частоті кадрів, що дорівнює 30.

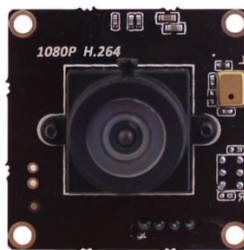


Рисунок 2.12 – Відеокамера

Для забезпечення зв'язку з дроном необхідно вибрати оптимальний канал зв'язку. З урахуванням потенційної багатофункціональності застосування дрону протокол зв'язку має бути універсальним і задовільняти як завдання умовах ближнього радіусу роботи (прямої видимості) і завдання далеких операцій на відстані до 10 кілометрів.

Найкращим і раціональним рішенням питання зв'язку буде використання протоколів 4G чи 5G. Така зв'язка дозволить бортовому комп'ютеру через інтернет зв'язуватися з наземною контрольною станцією (GCS), дасть можливість передачі телеметрії даних, управління в ручному режимі та планування маршруту для роботи дрона в автоматичному режимі.

Як модуль зв'язку був обраний Quectel EC25 (рис. 2.13) [30]. Вибраний модуль забезпечує зв'язок за протоколом 4G/LTE що цілком задовольняємо поставленим завданням.



Рисунок 2.13 – Модуль зв'язку

### 2.3 Створення схеми підключення компонентів

Після розробки загальної схеми елементів та побудови їх логіки взаємозв'язків по рівням, а також вибору всіх необхідних компонентів морського

багатофункціонального дрона наступним етапом проектування є створення схеми підключення комплектуючих.

Модуль зв'язку Quectel EC25 підключається до Jetson nano шляхом приєднання даного модуля до роз'єму M2 на платі контролера. Камера Low-Light HD USB Camera підключається до плати дротом (рис. 2.14) за допомогою інтерфейсу USB [31].



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд дрота для підключення камери

Для складання електричної схеми навколо польотного контролера Pixhawk 6s та всіх вибраних комплектуючих необхідно використовувати в ланцюзі додаткові елементи.

Таким чином у ланцюг також включено Holybro Power Distribution Board PDB01 (рис. 2.15) [32]. Ця плата використовується для розподілу живлення та сигналів керування між акумуляторами, двигунами та іншими елементами.



Рисунок 2.15 – Power distribution board

Для керування ШИМ сигналом необхідно використовувати додатковий модуль PM02 у кількості двох штук (рис. 2.16) [33].



Рисунок 2.16 – Модулі керування ШИМ сигналом

Для підключення lidar використано i2c splitter (рис. 2.17) [34]. Використання цього компонента дозволяє залишити в ланцюзі можливість підключення інших пристроїв, що використовують подібний роз'єм, з огляду на

універсальність та багатозадачність модулів, що можуть бути потенційно підключені. Порт I2C – це шина I2C (міжінтегральна шина), двопровідний комунікаційний інтерфейс для підключення кількох інтегральних схем (IC) на коротких відстанях. Він використовує послідовну лінію передачі даних (SDA) та послідовну лінію тактової частоти (SCL), щоб «контролер» (раніше «головний») міг взаємодіяти з «периферійними» (раніше «підлеглими») пристроями, кожен з яких має унікальну адресу.

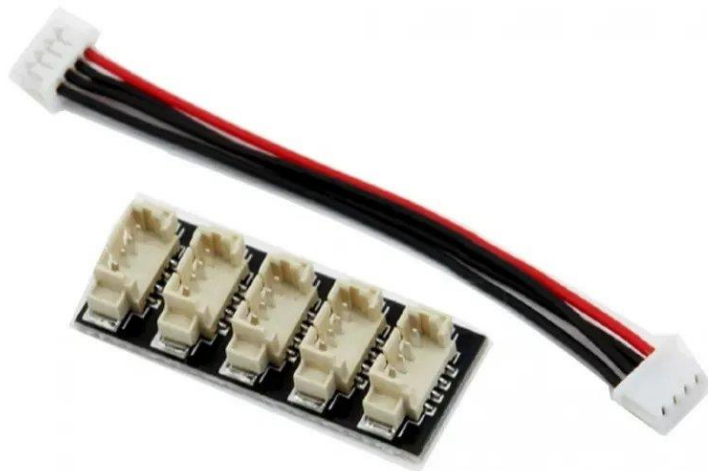


Рисунок 2.17 – I2C splitter

Для передачі телеметрії на ground control station крім основної антени буде підключений модуль microhard p900 (рис. 2.18), який забезпечує зв'язок протоколу MAVlink і виступає сполучною ланкою між автопілотом морського багатофункціонального дрона і ground control station [35].



Рисунок 2.18 – Holybro Microhard P900 Radio

Після додавання всіх необхідних додаткових елементів системи стає можливим складання всього ланцюга.

Акумуляторна батарея підключається до power distribution board. Від PDB через ESC підключаються двигуни, BEC для сервоприводу та радіомодуль, що передає телеметрію. Від кожного з ESC йде підключення до блоку керування ШИМ сигналами, відповідно до другого блоку йде підключення від BEC і до сервоприводу.

Lidar підключається до роз'єму I2C через спліттер. Модуль GPS, модуль ресивера радіоуправління, модуль передачі телеметрії підключаються до відповідних роз'ємів на головному контролері. Контролер підключається до Jetson nano за допомогою USB C типу.

В загальному виді (рис. 2.19) отримано кінцеву схему підключення бортових елементів електричного ланцюга морського багатофункціонального дрона.

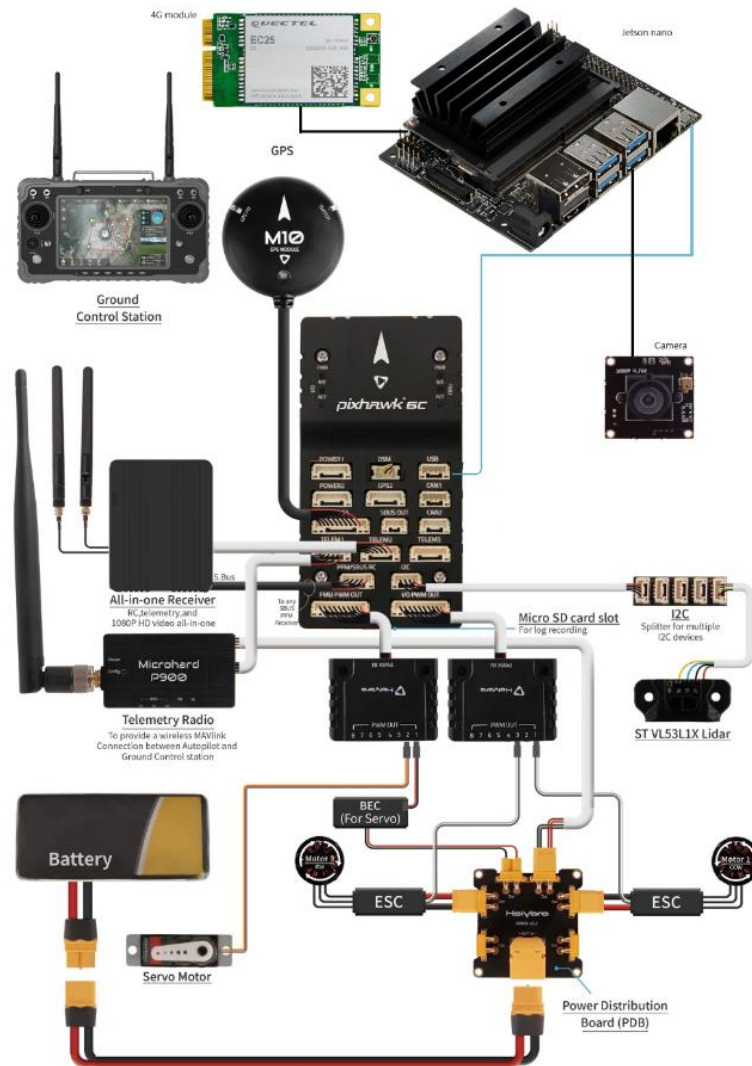


Рисунок 2.19 – Розроблена схема підключення елементів

## 2.4 Перевірка стійкості системи за критеріями ТАУ

При проектуванні морського дрону необхідним і важливим пунктом є використання методів дослідження, розрахунків та створення систем автоматичного управління. Розділ, який займається проблематикою та вирішенням подібних завдань, називається теорія автоматичного управління. Відомо, що проведення розрахунків і моделювання систем автоматичного управління може проводитися як з використанням комп'ютерних технологій моделювання, так і суто в математичному вигляді. Теорія автоматичного

управління пропонує широкий спектр методів перевірки систем автоматичного управління різного ступеня складності (одноконтурних/багатоконтурних) та великий перелік варіантів їх вирішення за різними критеріями. В даному випадку необхідно визначити об'єкт який виступає як така система. З погляду визначення відповідного елемента (комплектуючого) щодо критерію важливості у структурі системи найбільше підходить електромотор. Такий вибір обумовлений тим фактом, що найголовнішою характеристикою для морського дрона є його здатність переміщатися в просторі. Таким чином, виходячи з вищенаписаного, необхідно перевірити стійкість електромотора як головної ланки, представивши його у вигляді окремої системи. Скласти передавальну функцію, вибрати відповідний критерій стійкості та зробити зіставлення. Зробити всі необхідні для поставленого завдання розрахунки.

Для створення передавальної функції необхідними параметрами є опір обмотки електродвигуна, константа крутного моменту, константа проти-ЕРС, момент інерції ротора, коефіцієнт в'язкого тертя, коефіцієнт корисної дії.

Параметри електродвигуна що розглядається наступні:

- опір обмотки (  $R = 0,187$  ), Ом;
- константа крутного моменту (  $k_t = 0,0555$  ), Н·м/А;
- константа проти-ЕРС (  $k_b = 0,06$  ), В·с/рад;
- момент інерції ротора (  $J = 0,02$  ), кг·м<sup>2</sup>;
- коефіцієнт в'язкого тертя (  $b = 0,025$  ), Н·м·с/рад;
- коефіцієнт корисної дії (  $\eta = 0,9$  ).

Ці значення підставлено у передавальну функцію наступного виду:

$$G(s) = \frac{k_t}{s(J+b)(R+k_b s)+\eta}. \quad (2.1)$$

При підстановці отримано наступне рівняння:

$$G(s) = \frac{0,0555}{s(0,02+0,025s)(0,187+0,06s)+0,9}$$

Та спрощено його до виду:

$$G(s) = \frac{0,0555}{0,0027s^2+0,008415s+0,9}$$

Під стійкістю системи мається на увазі її здатність повертатися у вихідний стан після дії зовнішніх сил. Необхідно, щоб система була стійка, інакше вона не є працездатною. Відомо, що розрахунок стійкості системи можна зробити виходячи з її алгебраїчних критеріїв. Для систем порядок яких вищий або дорівнює трьом необхідно використовувати один із відомих критеріїв стійкості (Гурвіца, Рауса або Ляпунова-Шипара). В даному випадку система є системою другого порядку і для перевірки її стійкості достатньо щоб всі коефіцієнти характеристичного рівняння мали однаковий знак:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, \dots, a_n > 0. \quad a_0 < 0, a_1 < 0, \dots, a_n < 0. \quad (2.2)$$

Характеристичне рівняння має вид:

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (2.3)$$

При підстановці значень до рівняння (3) отримано:

$$0,0027\lambda^2 + 0,008415\lambda + 0,9 = 0.$$

З цього можна зробити перевірку:

$$0,0027 > 0, 0,008415 > 0, 0,9 > 0.$$

Отже таку систему можна вважати стійкою.

## 3 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСУ МОРСЬКОГО БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДРОНУ

### 3.1 Розрахунок корпусу дрона

Кожне судно має морехідні та експлуатаційні якості [36].

До морехідних відносяться:

- плавучість;
- остійність;
- непотоплюваність;
- морехідність;
- хідкість;
- керованість.

Розглянемо більш детально кожний з термінів.

Плавучість це здатність судна плавати в необхідному положенні щодо поверхні води, при заданому навантаженні.

Остійність це здатність судна, відхиленого дією зовнішніх сил з положення рівноваги повертатися у вихідне положення рівноваги після припинення дії цих сил.

Непотоплюваність це здатність судна зберігати достатню плавучість і стійкість після затоплення одного або кількох відсіків.

Морехідність це здатність судна протистояти впливу морського хвилювання з коливаннями потенційно змінюваними в більшу сторону за частотою та амплітудою.

Хідкість це здатність судна переміщатися за заданою швидкістю.

Керованість це здатність судна утримувати заданий напрямок руху або змінювати його за бажанням судноводія або оператора.

До експлуатаційних якостей відносять:

- вантожопідйомність;
- вантажовмісність;
- швидкість;
- маневреність;
- дальність плавання;
- автономність;
- живучість.

Вантожопідйомність це маса вантажу, що перевозиться і який може бути прийнятий за умови збереження проектної осадки судна.

Вантажовмісність це об'єм приміщень судна, призначених для перевезення вантажів.

Швидкість це забезпечення економічної ефективності.

Маневреність це здатність судна виконувати задані маневри.

Дальність плавання це максимально можлива пройдена відстань без поповнення запасів.

Автономність це час роботи судна без поповнення запасу палива, мастил, води та провізії.

Живучість це здатність судна при отриманні пошкоджень зберегти свої експлуатаційні та морехідні якості.

Концепція багатофункціональності розроблюваного дрону диктує необхідність в забезпеченні його корпусу та комплектуючих можливістю виконувати широкий спектр завдань різної тривалості, характеру та важкості. З цього випливає, що масо-габаритні параметри дрона повинні відповідати найбільш універсальним показникам для розрахунку параметрів судна, з чого в свою чергу випливає, що розроблюваний дрон повинен приблизно відповідати розмірам та формам судна найбільш схожого на гідроцикл. В зв'язку з цим для дрона розглядається розробка в контексті теоретичного креслення (рис. 3.1) [37].

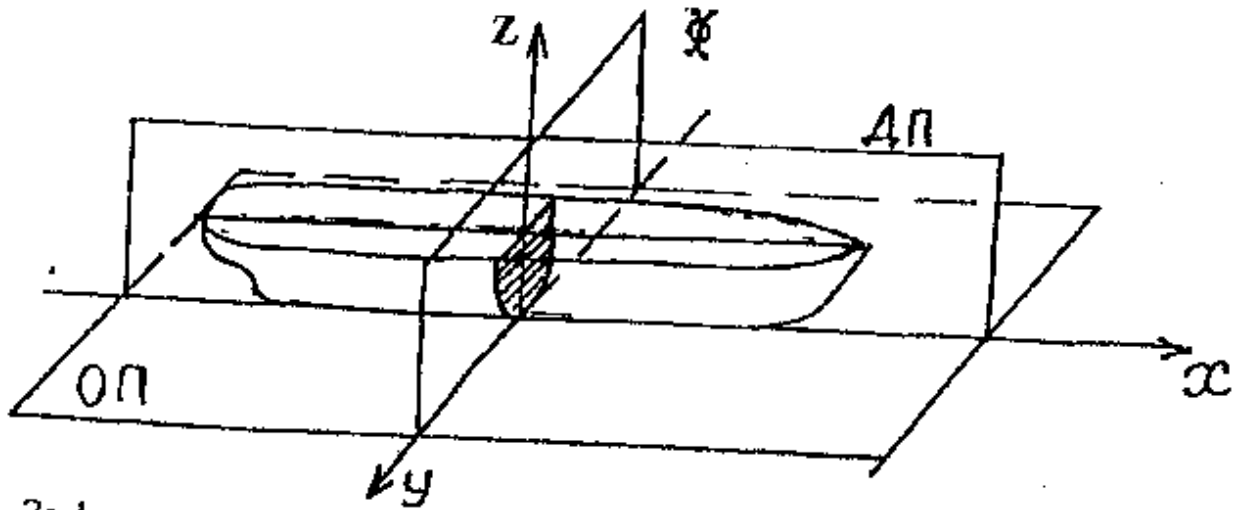


Рисунок 3.1 – Основні площини судна

З міркувань теорії побудови суден з урахуванням можливості встановлення всіх необхідних електронних компонентів та потенційного корисного навантаження наведено наступні просторові параметри дрона:

- висота корпусу 450 мм;
- довжина корпусу 2000 мм;
- ширина 900 мм.

У питанні вибору матеріалу для створення корпусу при врахуванні всіх вступних та змінних необхідно обрати такий матеріал який:

- має достатню міцність;
- має добру захищеність від вібрацій та ударних навантажень;
- є доступним для виготовлення та подальшої обробки;
- має достатній показник плавучості.

З точки зору вищенаведених міркувань, в якості матеріалу було обрано ABS пластик. Обраний матеріал є:

- задовільну ударну міцність;
- задовільну вібраційну захищеність;
- добре піддається обробці, формуванню та зварюванню;
- щільність яка дорівнює  $1,04 \text{ г/см}^3$ .

Для подальших розрахунків всіх морехідних та експлуатаційних якостей розроблюваного дрона, спочатку необхідно провести розрахунок маси корпусу застосовуючи формулу наступного виду:

$$m_{\text{корпус}} = (\rho \cdot S \cdot t) + m_{\text{посилення}}, \quad (3.1)$$

де  $m_{\text{корпус}}$  – маса корпусу, г;

$\rho$  – густина матеріалу, г/см<sup>3</sup>;

$S$  – площа корпусу, м<sup>2</sup>;

$t$  – середня товщина корпусу, мм;

$m_{\text{посилення}}$  – маса елементів посилення корпусу.

При відомих густині, товщині та масі посилень необхідно попередньо розрахувати площу корпусу. З урахуванням особливостей геометрії корпус прийнято розраховувати як усереднене значення усіченого паралелепіпеда з лінійним звуженням до носа судна.

Розрахунок площі виконується за формулою:

$$S = k_s \cdot l(2h + b), \quad (3.2)$$

де  $S$  – площа корпусу, см<sup>2</sup>;

$k_s$  – коефіцієнт форми;

$l$  – довжина корпусу, мм;

$h$  – висота корпусу, мм;

$b$  – ширина корпусу, мм.

Для даної формули коефіцієнт форми прийнято за 0,83. При підстановці значень до формули (3.2) отримано наступний результат:

$$S = 0,85 \cdot 2000(2 \cdot 450 + 900),$$

$$S = 3060000 \text{ мм}^2.$$

Отримане значення необхідно перевести в одиниці вимірювання системи СІ. Таким чином отримано наступне значення :

$$S = 3,06 \text{ м}^2.$$

Отримавши значення площі корпусу наступним чином проведено розрахунок маси корпусу з використанням формули (3.1):

$$m_{\text{корпус}} = 1,04 \cdot 3,06 \cdot 5,$$

$$m_{\text{корпус}} = 15,91 \text{ кг.}$$

Масу посилень прийнято розраховувати як 15% від маси корпусу, таким чином :

$$m_{\text{корпус}} = 15,91 + 2,38,$$

$$m_{\text{корпус}} = 18,29 \text{ кг.}$$

При плаванні на корпус судна діють сили тяжіння судна та його вантажу (рис. 3.2) [38].

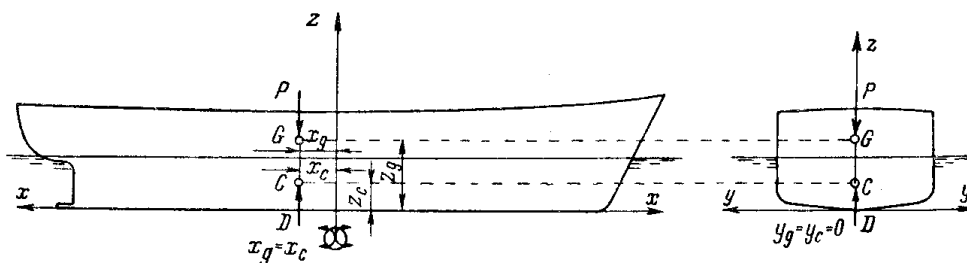


Рисунок 3.2 – Сили, які діють на судно

Сила плавучості, за Архімедом, дорівнює масі витісненої води в обсязі рівному зануреній у рідину частини тіла (корпусу судна). Так як маса плаваючого судна  $P$  завжди дорівнює його масовій водотоннажності  $D$ , а їх рівнодіючі сили спрямовані один проти одного по одній вертикалі, то умови рівноваги плаваючого судна можна сформулювати наступним рівнянням:

$$P = D, \quad (3.3)$$

де  $P$  – маса судна;

$D$  – водотоннажність.

Для знаходження об'єму корпусу необхідно застосувати наступну формулу:

$$V = l \cdot h \cdot b \cdot C_v, \quad (3.4)$$

де  $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;

$l$  – довжина корпусу, м;

$h$  – висота корпусу, м;

$b$  – ширина корпусу, м;

$C_v$  – коефіцієнт об'ємної повноти.

Для розроблюваного корпусу, враховуючи звуження корпусу судна до носа та інших факторів, що впливають на форму та об'єм коефіцієнт об'ємної повноти прийнятий за 0,5.

Підставивши значення до формули (3.4) отримано наступний результат :

$$V = 2 \cdot 0,45 \cdot 0,9 \cdot 0,5,$$

$$V = 0,405 \text{ м}^3 .$$

Припустимо, що повна маса дрона з комплектуючими та акумуляторами дорівнює 80 кг. Дотримуючись закону Архімеда маса витісненої прісної води з густотою рівною  $1000 \text{ кг/м}^3$  дорівнює 80 кг. Загальний внутрішній об'єм дрону становить  $0,405 \text{ м}^3$ . Максимально припустимим осадом в даному випадку буде такий, при якому половина висоти дрону знаходиться під водою. Як приблизне значення граничного зануреного об'єму візьмемо  $0.2 \text{ м}^3$ , що дорівнює 200 кг маси за існуючих форм і розмірів дрону. Враховуючи вже існуючу масу можна зробити висновок про те, що запас плавучості для даного розроблюваного дрону становить 120 кг.

Для подальшого розрахунку остійності дрона необхідно розглянути теоретичні умови остійності судна (рис. 3.3 – 3.4) [39].

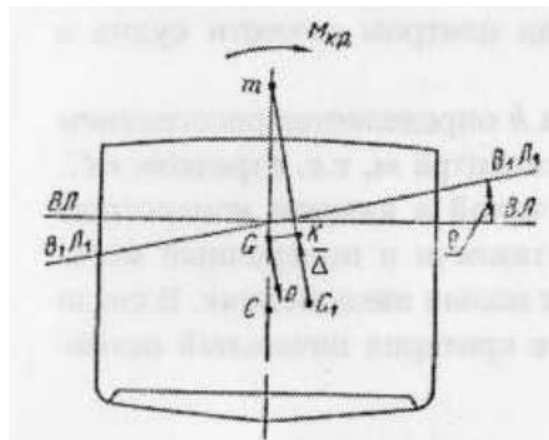


Рисунок 3.3 – Судно остійне

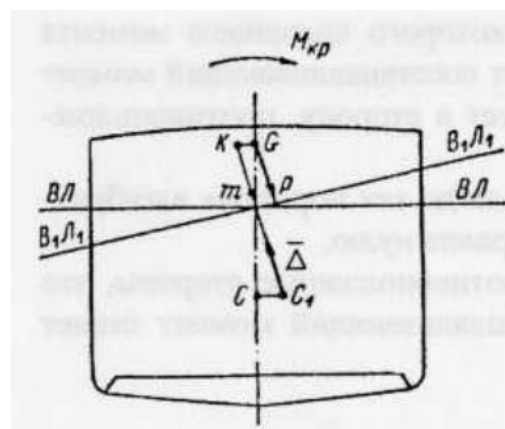


Рисунок 3.4 – Судно неостійне

З наведених вище рисунків видно, що головною умовою остійності судна є таке співвідношення центра маси  $G$  і метацентру  $m$ , при якому останній знаходиться вище, тобто метацентрична висота  $h$  більше нуля, у зв'язку з чим відновлюючий момент  $M_B$  спрямований у бік протилежного напрямку дії моменту  $M_{кр}$ , що нахиляє судно від стану рівноваги.

Таким чином щоб перевірити остійність досліджуваного судна, необхідно знайти його метацентричну висоту  $h$ . Для цього застосовується формула:

$$h = m + BM - G, \quad (3.5)$$

де  $h$  – метацентрична висота, м;

$m$  – розташування метацентру, м;

$BM$  – метацентрична поправка, м;

$G$  – розташування центра маси, м.

Візьмемо усереднене значення  $G$  рівним 0,20 м. Тоді для розрахунку метацентру застосовується наступна формула:

$$m = \frac{T}{2}, \quad (3.6)$$

де  $m$  – розташування метацентру, м;

$T$  – осадка судна, м.

Осадка  $T$  розраховується за формулою :

$$T = \frac{V}{l \cdot b \cdot c_b}, \quad (3.7)$$

де  $T$  – осадка судна, м;

$V$  – об’єм виштовхнутої води, м<sup>3</sup>;

$l$  – довжина корпусу, м;

$b$  – ширина корпусу, м;

$C_b$  – коефіцієнт внутрішнього заповнення.

Таким чином :

$$T = \frac{0,08}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,6},$$

$$T = 0,074 \text{ м.}$$

Отримавши значення осадки, було застосовано формулу (3.6), а саме:

$$m = \frac{0,074}{2},$$

$$m = 0,037 \text{ м.}$$

Метацентрична поправка розраховується за формулою:

$$BM = \frac{I}{V}, \quad (3.8)$$

де  $BM$  – метацентрична поправка, м;

$I$  – коефіцієнт моменту інерції ватерплейна;

$V$  – об’єм виштовхнутої води, м<sup>3</sup>.

Таким чином:

$$BM = \frac{0,0972}{0,08},$$

$$BM = 1,215 \text{ м.}$$

При підстановці отриманих значень в формулу (3.5) було отримано наступний результат:

$$h = 0,037 + 1,215 - 0,2,$$

$$h = 1,052 \text{ м.}$$

Значення отриманої метацентричної висоти виконує умову  $h > 0$ , тобто судно має позитивну остійність.

Наступним кроком необхідно провести розрахунок швидкості. Тяга обраних двигунів в технічній документації виробника вказана в не метричних одиницях вимірювання, тоді першим кроком необхідно виконати переведення в метричні одиниці. Для цього застосовується наступна формула (3.9):

$$T_{\text{двигуна}} = A \cdot G, \quad (3.9)$$

де  $T_{\text{двигуна}}$  – тяга, Н;

$A$  – тяга двигуна, кгс;

$G$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

Тоді при врахуванні того що дрон застосовує два двигуна виконано наступний розрахунок:

$$T_{\text{загальна}} = 2T_{\text{двигуна}} = 2 \cdot (16,1 \cdot 9,81),$$

$$T_{\text{загальна}} = 315,882 \text{ Н.}$$

З технічної документації відомо, що при споживанні 24 вольт напруги на максимальному режимі роботи двигун видає потужність рівну 1044 ватт. Тоді загальна потужність дорівнює 2088 ватт. Відомо, що при передачі потужності від

рушія до до довкілля існує допустима втрата енергії, величина якої описується коефіцієнтом корисної дії. Для електричного мотора ККД з урахуванням особливостей середи та електричної схеми прийнято вважати рівним 0,65. Тоді для розрахунку максимально можливої швидкості можна застосувати формулу (3.10):

$$V_{\text{макс}} = \frac{P \cdot \eta}{T_{\text{загальна}}}, \quad (3.10)$$

де  $V_{\text{макс}}$  – максимальна швидкість, м/с;

$P$  – потужність, ватт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії;

$T_{\text{загальна}}$  – тяга, Н.

Тоді при підстановці значень у формулу (3.10) отримується наступний результат :

$$V_{\text{макс}} = \frac{2088 \cdot 0,65}{315,882},$$

$$V_{\text{макс}} = 4,3 \text{ м/с.}$$

Наступним кроком необхідно розрахувати автономність розроблюваного дрона та дальність його плавання. В якості вхідних даних буде вважатися що максимальна дальність плавання досягається коли дрон йде по спокійній воді і застосовує 50% потужності двигунів. Тоді з урахуванням переводу відстані в кілометри застосовується формула (3.11):

$$D = V_d \cdot t \cdot 3,6, \quad (3.11)$$

де  $D$  – дальність плавання, км;

$V_d$  – швидкість плавання, м/с;

$t$  – час плавання, год.

Попередньо необхідно розрахувати час плавання з урахуванням доступної енергії та додаткового споживання потужності інших електронних компонентів яка буде прийнята за 100 ватт, для цього використовується формула (3.12):

$$t = \frac{E_{\text{доступна}}}{(0,5 \cdot P) + 100}, \quad (3.12)$$

де  $t$  – час плавання, год;

$E_{\text{доступна}}$  – доступна енергія, wh;

$P$  – потужність, ватт.

Варто зазначити що за нормою не можна розряджати акумулятори до повної розрядки, тому доступна енергія буде меншою за повну енергію яку номінально видає акумулятор. Припустимо, що доступна енергія це 80% від номінального показника. Тоді застосовується формула (3.13):

$$E_{\text{доступна}} = E_{\text{ном}} \cdot u, \quad (3.13)$$

де  $E_{\text{доступна}}$  – доступна енергія, wh;

$E_{\text{ном}}$  – номінальна енергія, wh;

$u$  – коефіцієнт доступності.

Відомо, що ємність акумулятора дорівнює 400 ah, а напруга буде становити 24 В. Тоді номінальна напруга дорівнює 9600 wh. Тоді згідно з формулою (3.13):

$$E_{\text{доступна}} = 9600 \cdot 0,8,$$

$$E_{\text{доступна}} = 7680 \text{ wh.}$$

Тоді час плавання дорівнює:

$$t = \frac{7680}{(0,5 \cdot 2188) + 100},$$

$$t = 6,71 \text{ год.}$$

Для того щоб розрахувати реальну швидкість ходу, потрібно урахувати корисну потужність роботи двигунів та загальну тягу. Їх відношення розраховується за формулою (3.14):

$$V_d = \frac{P_{\text{корисна}}}{0,5 \cdot T_{\text{загальна}}}, \quad (3.14)$$

де  $V_d$  – швидкість плавання, м/с;

$P_{\text{корисна}}$  – корисна потужність, ватт;

$T_{\text{загальна}}$  – загальна тяга двигунів, Н.

Корисна потужність розраховується як відношення за формулою (3.15):

$$P_{\text{корисна}} = (0,5 \cdot P) \cdot \eta - 100, \quad (3.15)$$

де  $P_{\text{корисна}}$  – корисна потужність, ватт;

$P$  – потужність, ватт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

При підстановці значень було отримано наступний результат:

$$P_{\text{корисна}} = (0,5 \cdot 2088) \cdot 0,65 - 100,$$

$$P_{\text{корисна}} = 578,6 \text{ ватт.}$$

З цього отримано такий результат:

$$V_d = \frac{578,6}{0,5 \cdot 315,882},$$

$$V_d = 3,7 \text{ м/с.}$$

Таким чином максимальна відстань дорівнює:

$$D = 3,7 \cdot 6,71 \cdot 3,6,$$

$$D = 89,37 \text{ км.}$$

За результатами отриманих розрахунків по морехідним та експлуатаційним характеристикам розроблюваного судна було отримано числові значення, які зведені у таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Параметри розроблюваного дрона

Характеристика	Значення
Довжина	2000 мм
Ширина	900 мм
Висота	450 мм
Маса корпусу	18,29 кг
Повна маса	80 кг
Внутрішній об'єм	0,405 м <sup>3</sup>
Остійність	Позитивна; $h = 1,052 \text{ м}$
Плавучість	Позитивна;
Вантажопідйомність	120 кг
Максимальна швидкість	4,3 м/с
Автономність	6,71 год
Дальність плавання	89,37 км

## 3.2 Розробка 3D моделі дрону

### 3.2.1 Розробка корпусу дрону

Для розробки 3D моделі дрону в даній роботі використовуються можливості програмного забезпечення Fusion 360.

Першим кроком для створення моделі необхідно створити первинне креслення. У зв'язку з цією необхідністю було створено креслення у трьох проекціях та загальний вид первинного креслення (рис. 3.5 – 3.8).

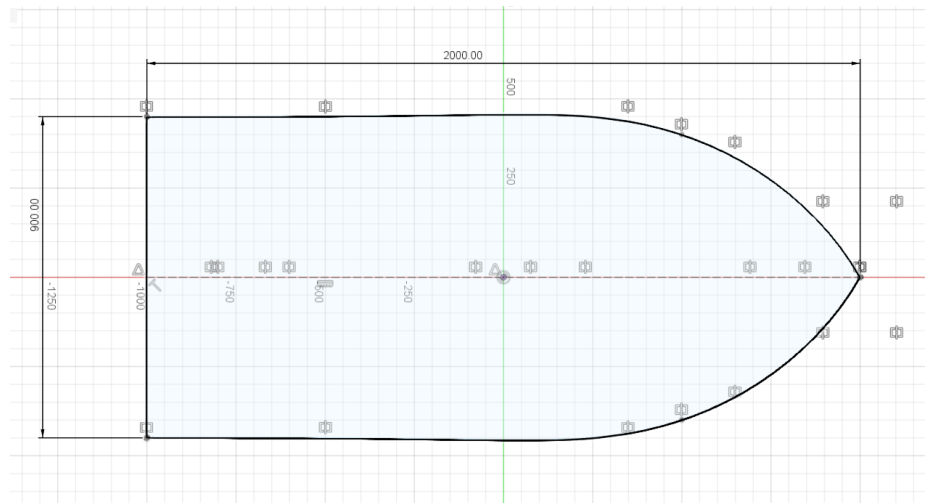


Рисунок 3.5 – Креслення дрону з видом зверху

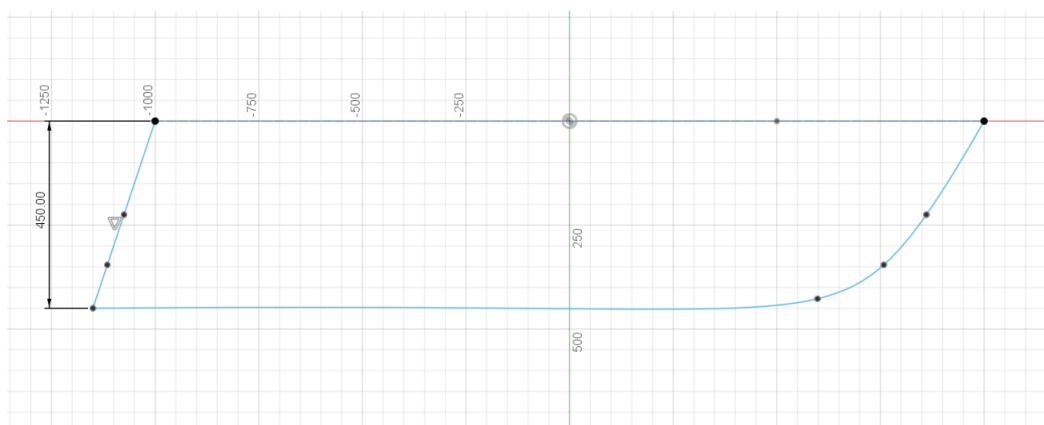


Рисунок 3.6 – Креслення дрону з видом збоку

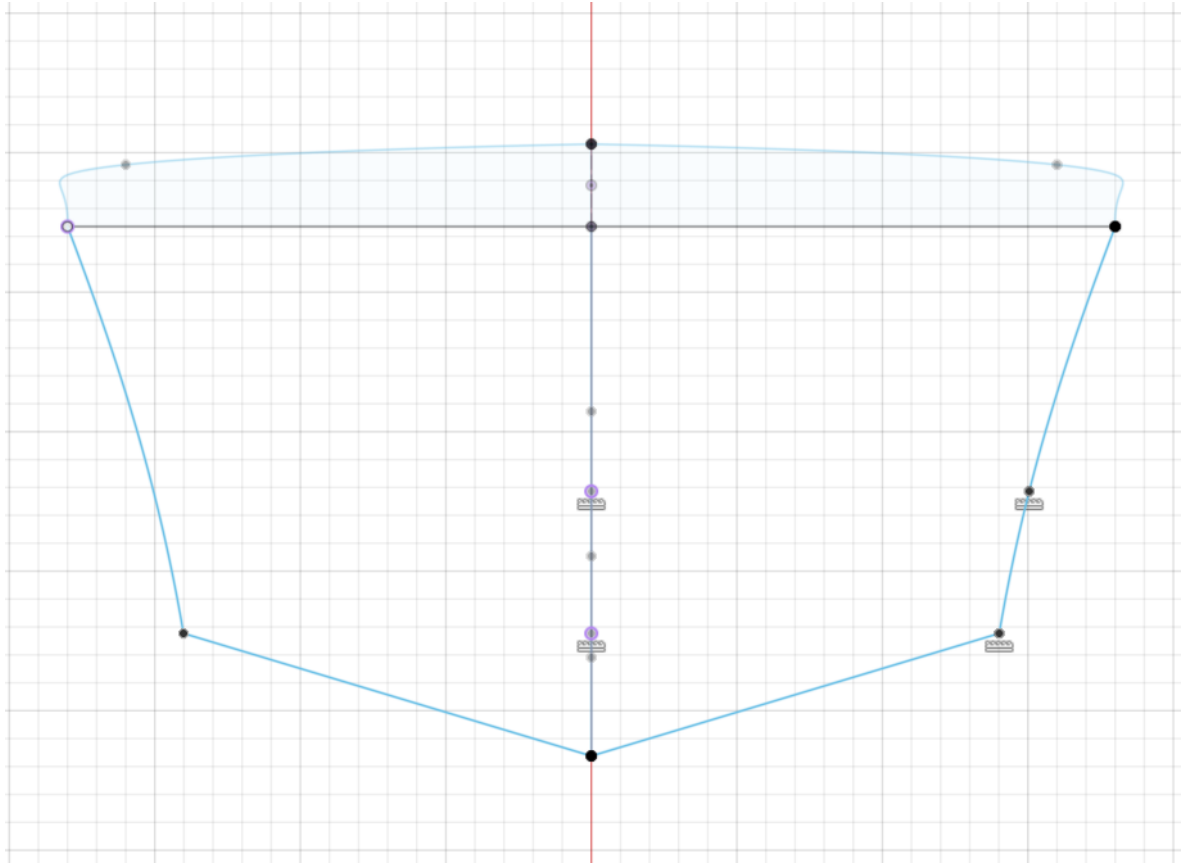


Рисунок 3.7 – Креслення дрона з видом сзаду

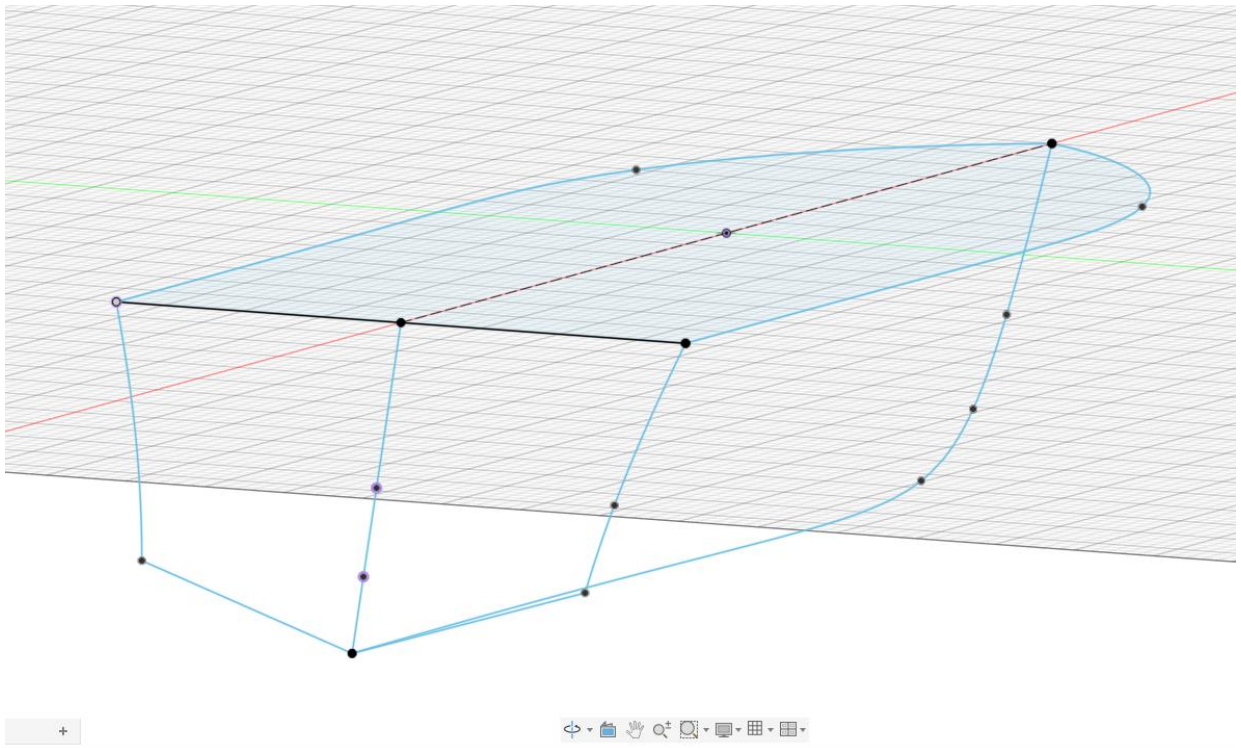


Рисунок 3.8 – Загальний вид первинного креслення

Наступним кроком було додано декілька додаткових необхідних елементів типу «plane», та побудовано по створених ребрах тіло дрона (рис. 3.9).

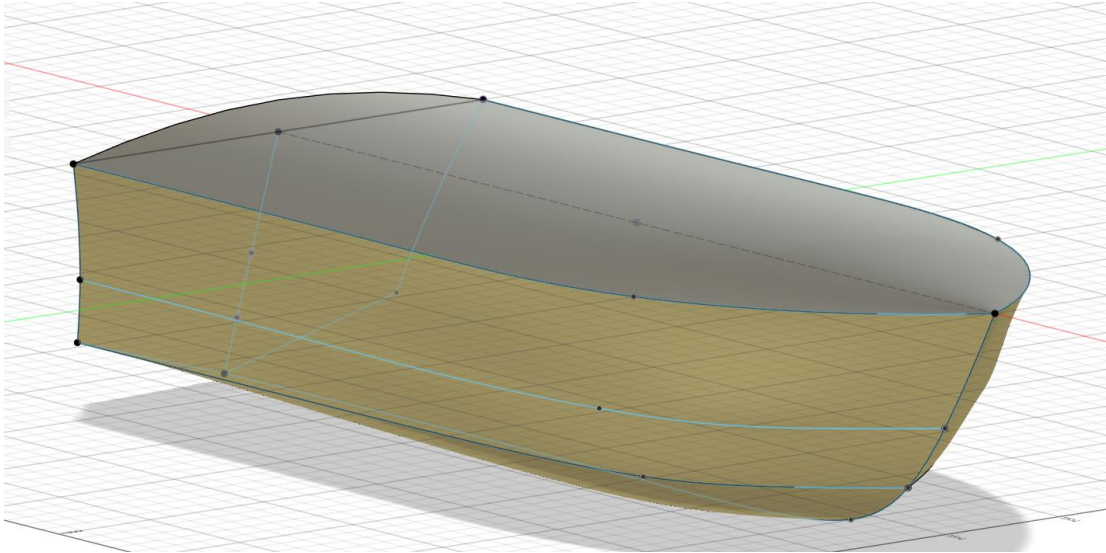


Рисунок 3.9 – Тіло корпусу дрона в процесі розробки

Дане тіло в подальшому буде перетворено на ребра посилення корпусу розроблюваного дрона. У зв'язку з цим, наступним кроком було задано створеному тілу товщину та первинну форму (рис. 3.10).

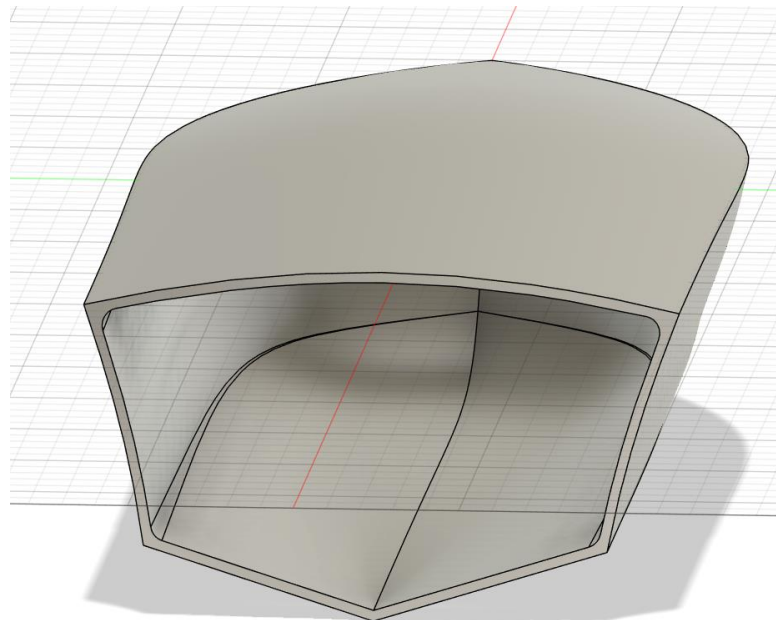


Рисунок 3.10 – Придання товщини та форми тілу

Наступним кроком було створено повздожні ребра міцності як елементи посилення корпусу розроблюваного дрону (рис. 3.11).

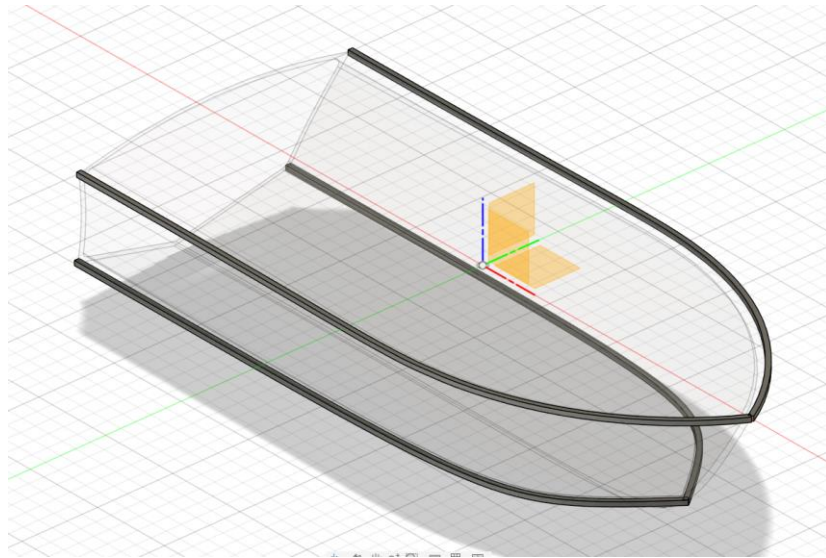


Рисунок 3.11 – Повздожні ребра міцності

Наступним кроком, з рами посилення корпусу (рис. 3.10) за допомогою інструмента «split body» було вирізано рамки поперечного посилення корпусу (рис. 3.12).

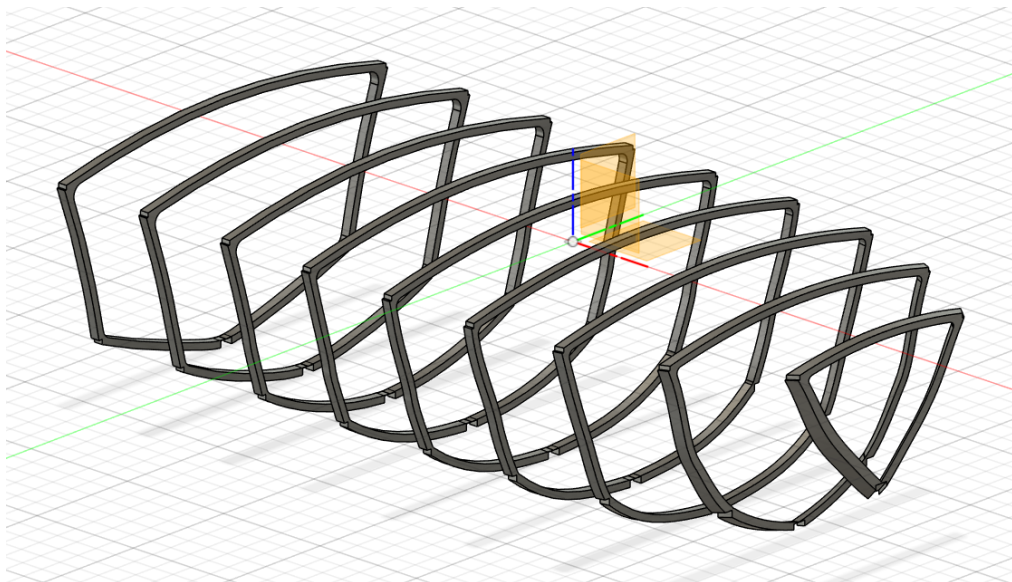


Рисунок 3.12 – Поперечні ребра міцності

Наступним кроком було зроблено виріз в ребрах міцності для верхнього люка (рис. 3.13).

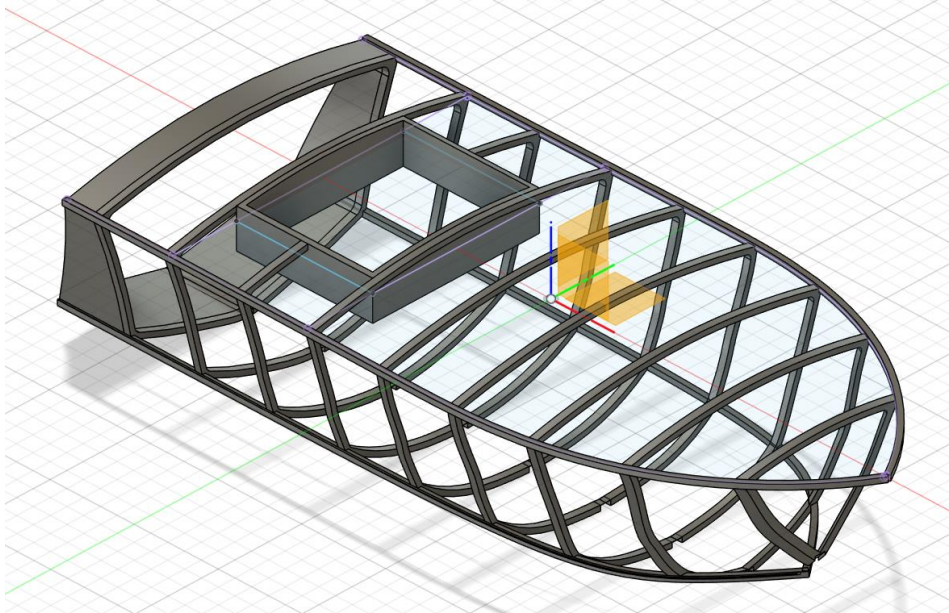


Рисунок 3.13 – Виріз люка в корпусі дрона

Далі було розроблено верхню кришку вантажного люка та виконано обшивку корпусу дрона (рис. 3.14).

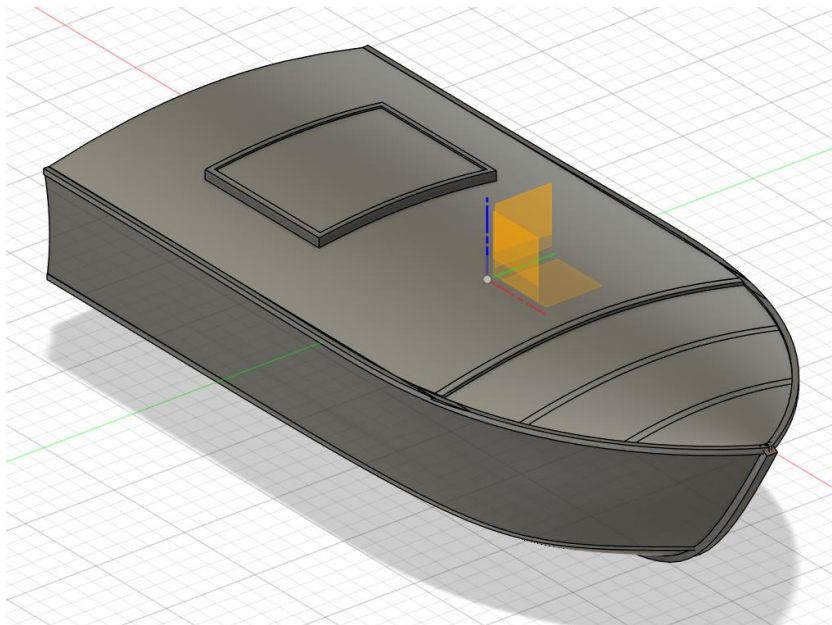


Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд корпусу з обшивкою

### 3.2.2 Розташування електроніки

Наступним етапом розробки 3D моделі є розробка та розташування електронних компонентів дрона всередині попередньо розробленого корпусу. Слід зауважити, що для подальшої симуляції параметрів розроблюваної моделі найважливішими характеристиками її комплектуючих є розміри, розташування та маса. У зв'язку з цим, в деяких випадках зовнішністю комплектуючих можливо нехтувати за умови коректності їх масо-габаритних параметрів. Деякі комплектуючі зображені схематично за допомогою геометричних примітивів.

Першим кроком було додавання акумуляторних батарей та їх розташування відносно корпусу (рис. 3.15).

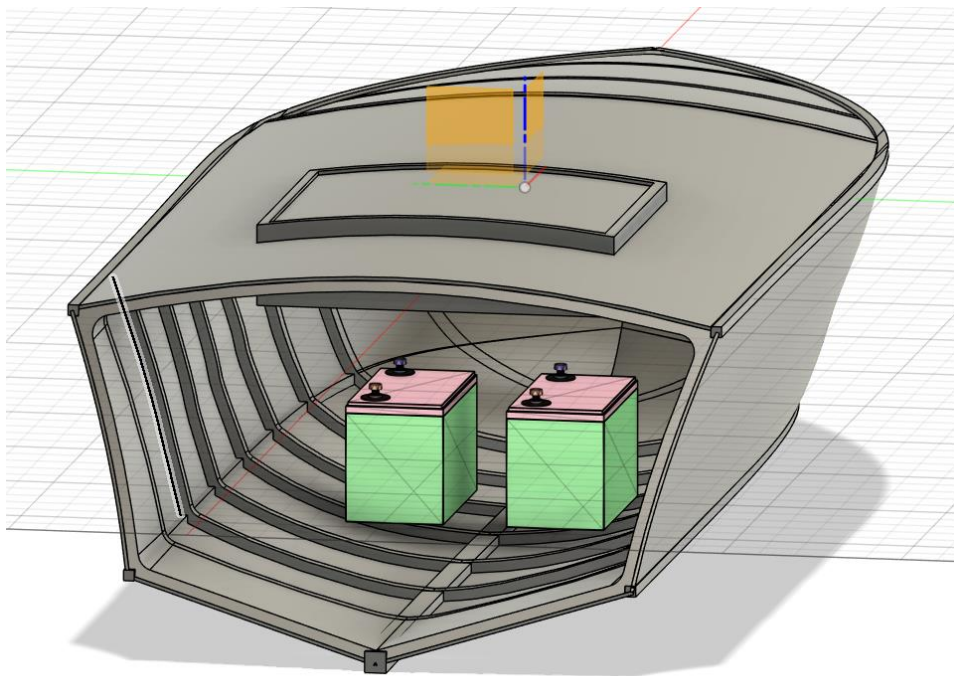


Рисунок 3.15 – Розташування акумуляторних батарей

Далі було додано основні гребні двигуни з пропелерами та зовнішніми корпусами (рис. 3.16).



Далі створені попередньо компоненти було розташовано найбільш оптимальним чином всередині корпусу дрона з відображенням повздовжніх ребер міцності в якості наочності зображення відносно основних площин дрона (рис. 3.18).

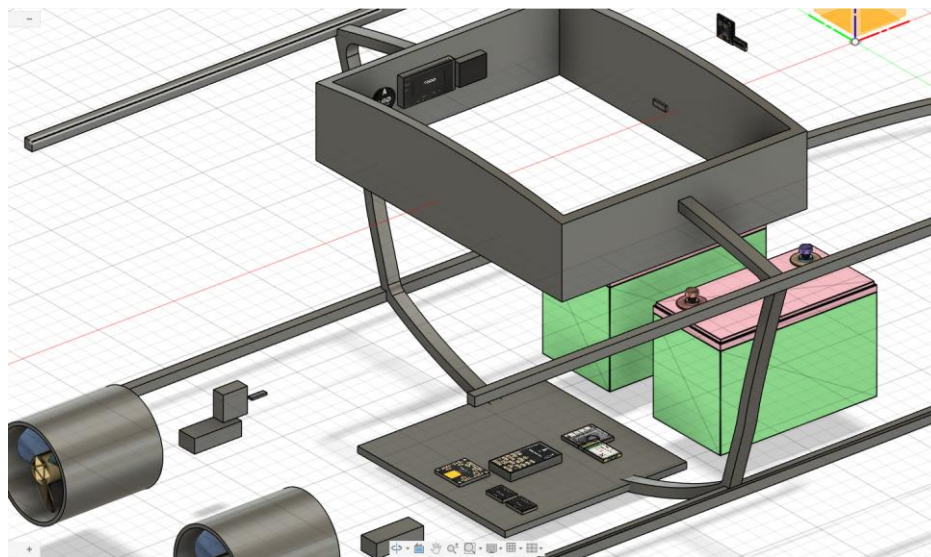


Рисунок 3.18 – Розташування електронних компонентів

## 4 СИМУЛЯЦІЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОРПУС ДРОНА

### 4.1 Симуляція статичного навантаження

У першу чергу при перевірці та симуляції моделі, що розробляється, необхідно провести симуляцію статичної напруги на корпус дрону. Найважливішим вузлом в даному випадку є не обшивка а корпус міцності, складений з поперечних і поздовжніх ребер жорсткості, так як саме дана структура, що розглядається, приймає на себе основний вплив зовнішніх сил, навантажень, моментів і деформацій. У зв'язку з цим жорсткість і пружність ребер є головним чинником, який досліджується під час проведення симуляції.

Першим кроком для проведення симуляції необхідно перетворити розроблену модель на необхідний для проведення експериментів формат. У зв'язку з цим моделі морського дрону були виставлені параметри жорсткої прив'язки "constraint" (рис. 4.1), для наочності приблизного положення прив'язок на рисунку показано повздовжні ребра та киль, а сама модель перетворена на формат " mesh " (рис. 4.2).

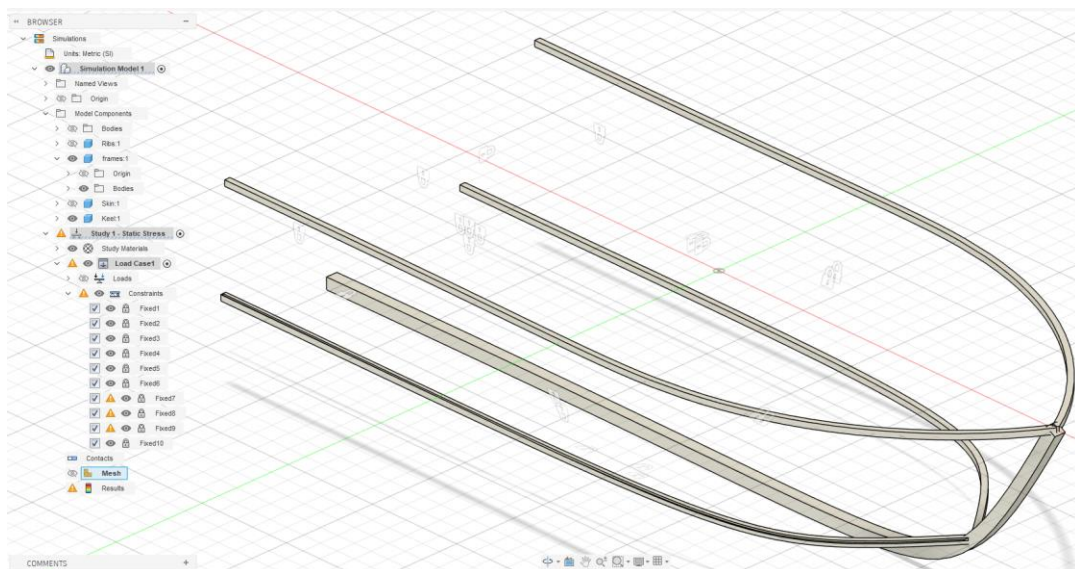


Рисунок 4.1 – Створення прив'язок корпусу

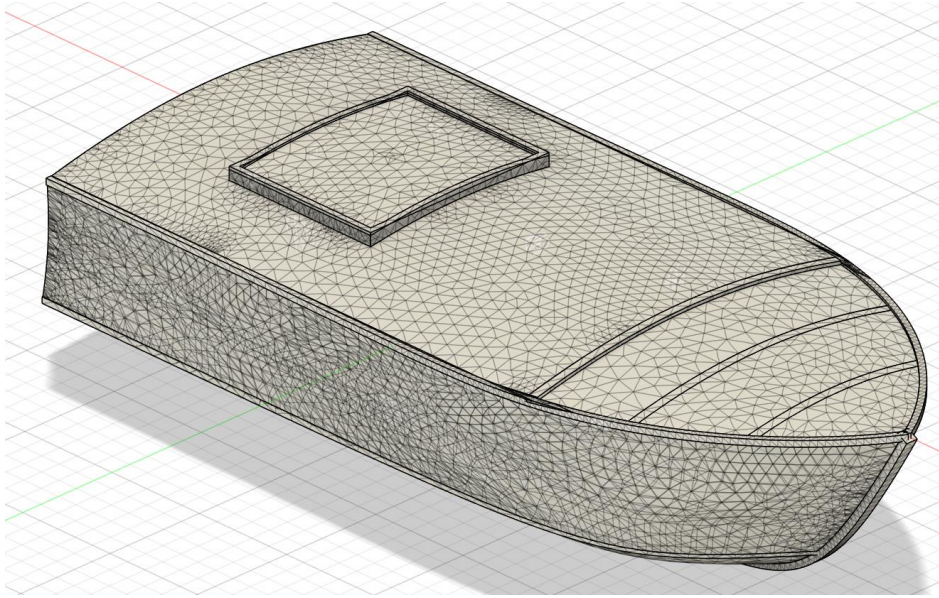


Рисунок 4.2 – Mesh-модель дрону

Як перший експеримент розглядається короткочасне ударне навантаження спрямоване на кіль дрону знизу. Подібна симуляція демонструє та моделює вплив сил, які прикладаються на корпус дрону при проходженні сильного хвилювання та ударі днища об воду. При врахуванні значень масо-габаритних параметрів, які розраховувалися раніше, допускається, що сила такого ударного навантаження становитиме 700 ньютон і матиме точку застосування, що збігається з проекцією точки центру маси дрону на поверхню кіля (рис. 4.3)

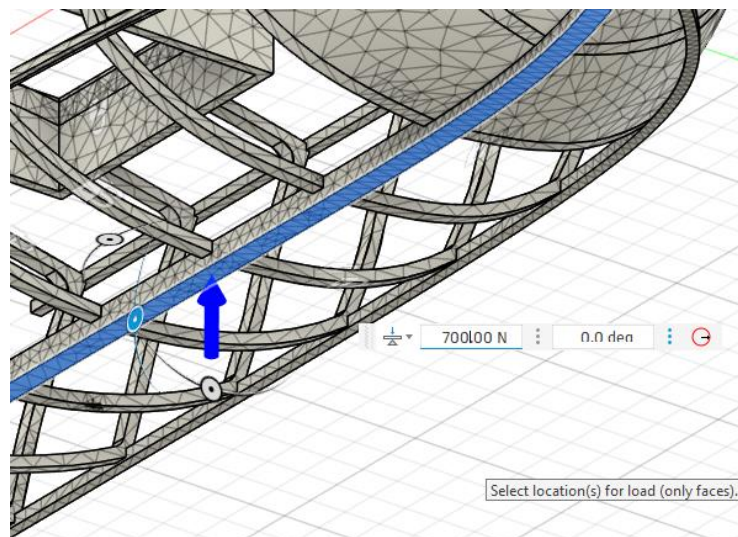


Рисунок 4.3 – Точка прикладення сили

При проведенні симуляції навантаження було отримано результат компенсуючої деформації корпусом міцності дрона в якості сили противодії до прикладеної ззовні сили (рис. 4.4–4.6). Слід зазначити, що через складну форму елементів корпусу при проведенні симуляцій можливим є виникнення візуального спотворення деяких окремих елементів.

Аналіз отриманих результатів демонструє здатність корпусу витримувати задане навантаження за рахунок запасу гнучкої деформації елементів корпусу. З рисунку 4.4 видно, що повздожні ребра за рахунок своєї міцності у відповідь на прикладене ззовні навантаження деформуються дугою без порушення структурної цілісності, а поперечні ребра компенсують момент скручування за рахунок жорсткої прив'язки інших елементів до себе, виконують роль скелета який тримає цілісність конструкції. При цьому в чисельних значеннях отриманий коефіцієнт безпечної деформації дорівнює 8, з чого випливає що програмне середовище вважає безпечним прикладення до корпусу дрона навантаження, яке потенційно може бути в 8 разів більше за прикладене в експерименті, без втрати структурної цілісності та руйнування розроблюваного дрону.

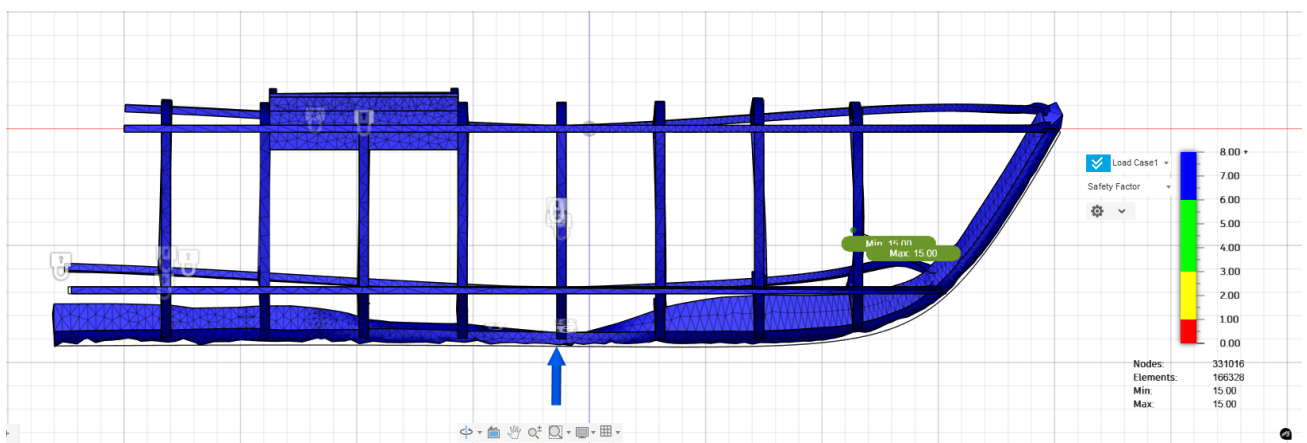


Рисунок 4.4 – Боковий вид статичного навантаження

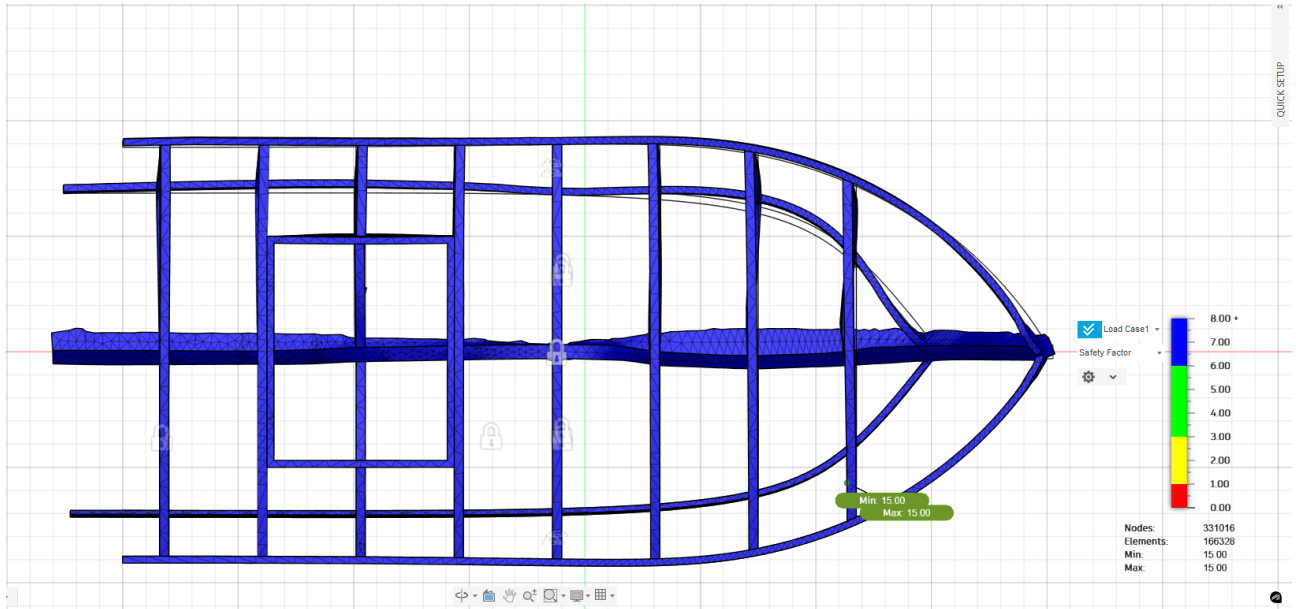


Рисунок 4.5 – Верхній вид на статичне навантаження

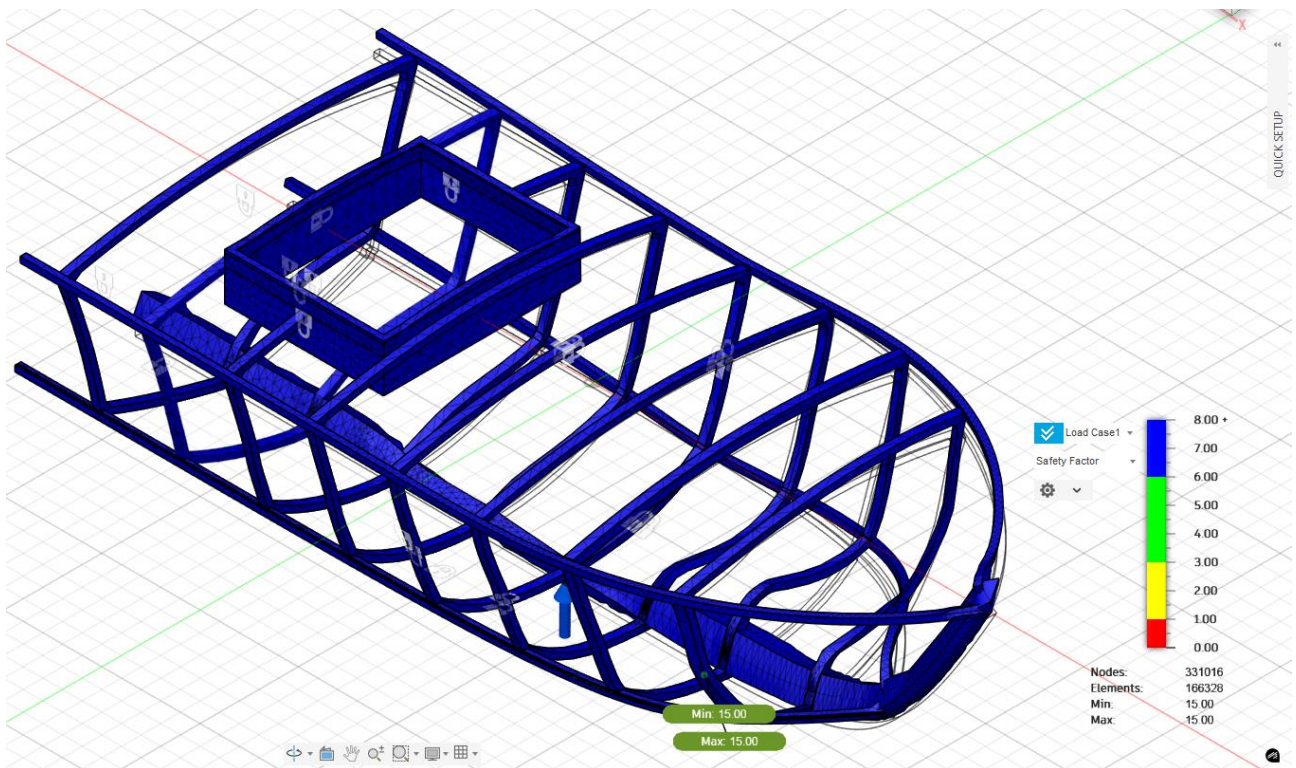


Рисунок 4.6 – Загальний вид корпусу під час статичного навантаження

В наступному експерименті перевіряється здатність корпусу дрона витримувати бокове статичне короткочасне навантаження направлене ззовні, що

в свою чергу симулює удар хвилі води збоку. Точка прикладення сили вказується приблизно на рівні ватерлінії на боковій стороні дрона (рис. 4.7).

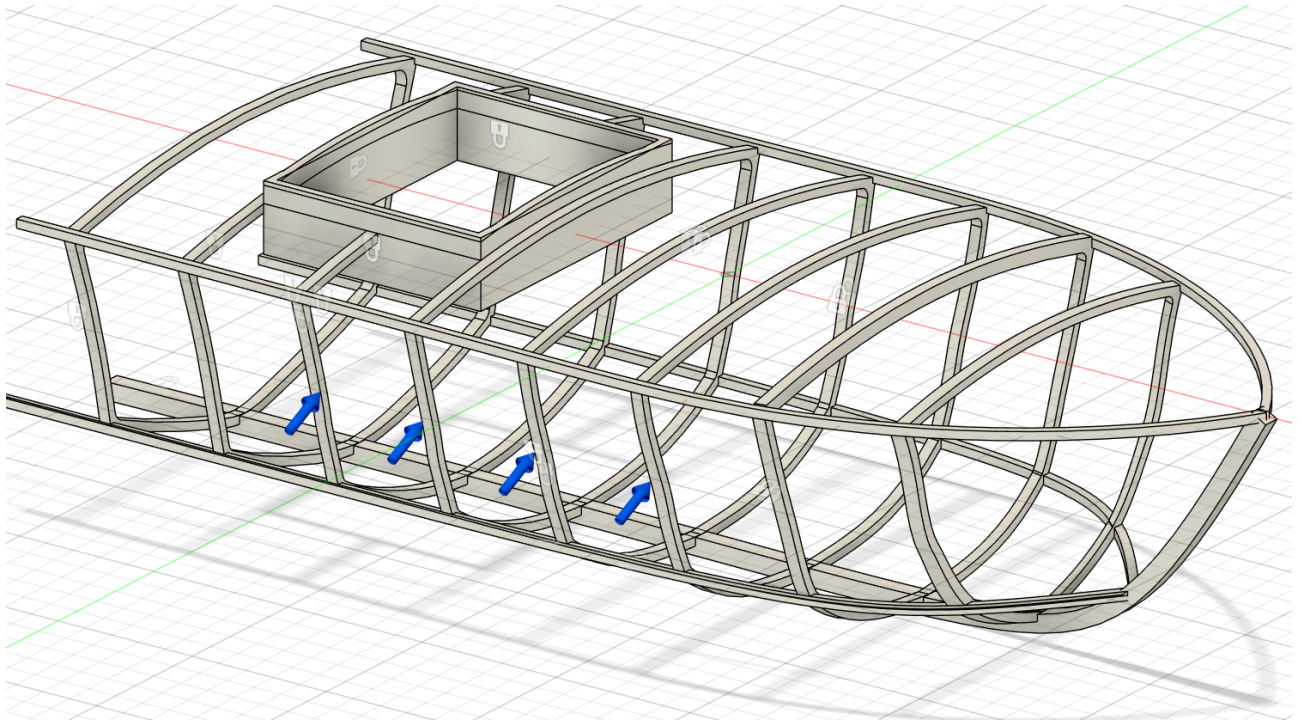


Рисунок 4.7 – Точки та напрямок прикладення сили

В результаті проведення симуляції було отримано коефіцієнт безпечної деформації рівним 15. Розроблюваний скелет відмінно витримує задане навантаження та майже не має візуальних маркерів деформації. В режимі перегляду напруги матеріалу (рис. 4.8) видно незначні показники напруги в точках прикладення ударної сили, які не руйнують структуру та лежать в межах норми міцності розроблюваного корпусу.

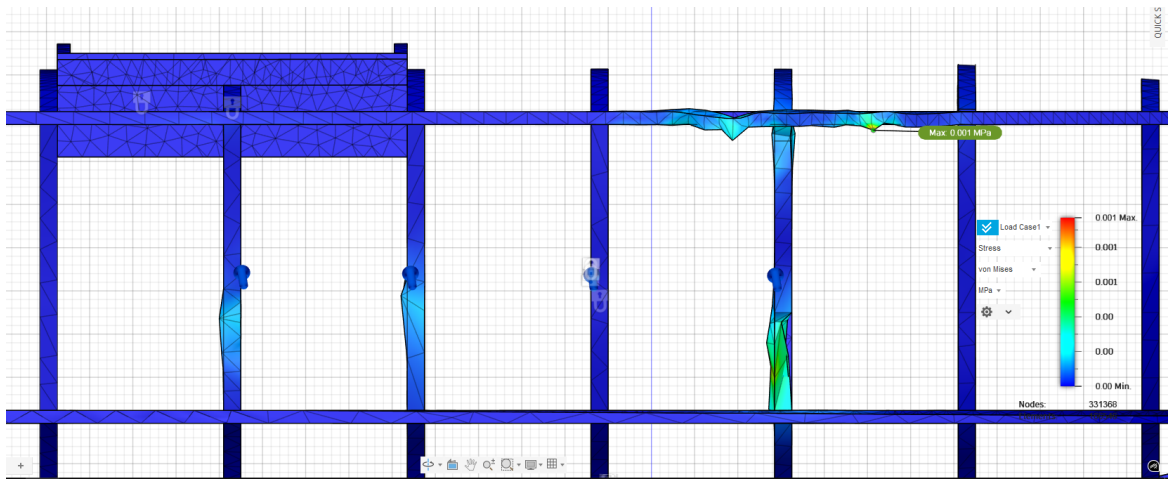


Рисунок 4.8 – Карта напруги під дією зовнішньої сили

В наступному експерименті було досліджено здатність конструкції дрона витримувати напругу на скручення. Подібна симуляція моделює ситуацію при якій на корпус дрона впливає декілька сил одночасно, причому напрямки дії сил протилежні, що провокує корпус на скручування навкруги однієї з його осей.

Нижче зображено напрямки докладання сил на корпус (рис. 4.9).

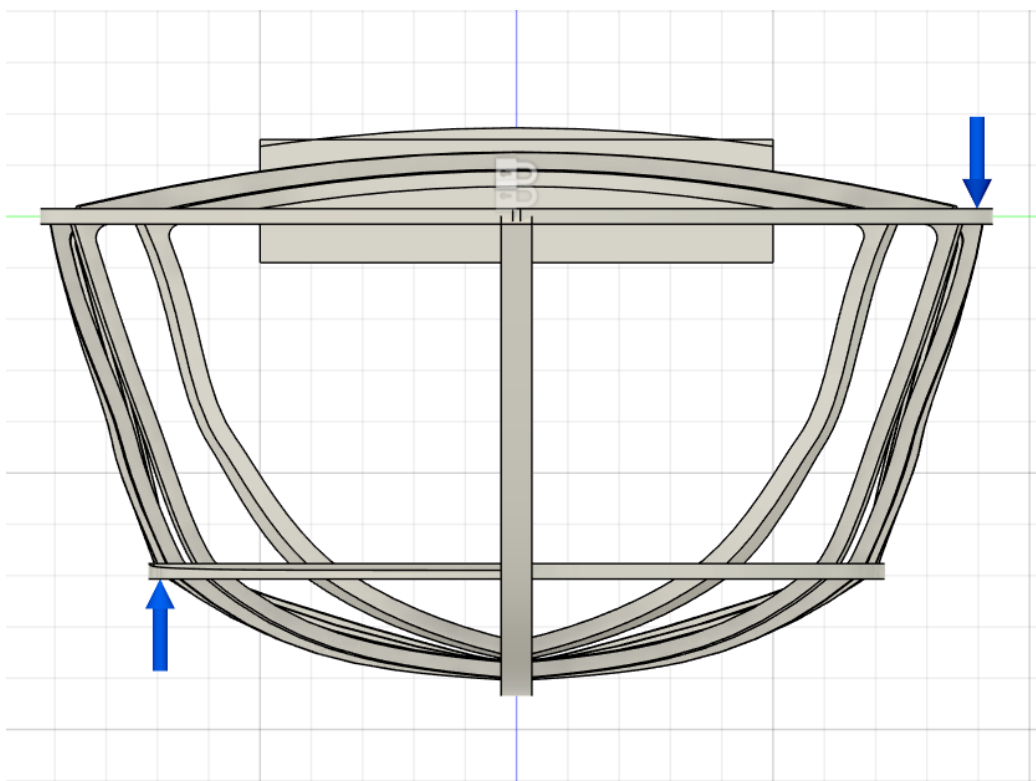


Рисунок 4.9 – Фронтальна проекція напрямку докладання зовнішніх сил

В результаті дослідження (рис. 4.10) було виявлено що при впливі сил направлених на скручування корпусу, розроблювана модель не втрачає цілісності конструкції і витримує навантаження за рахунок деформації верхнього повздовжнього ребра міцності. Варто також відмітити, що відносно повздовжньої центральної осі дрона корпус залишається в межах норми а нижнє повздовжнє ребро за рахунок жорсткого з'єднання витримує навантаження без деформації.

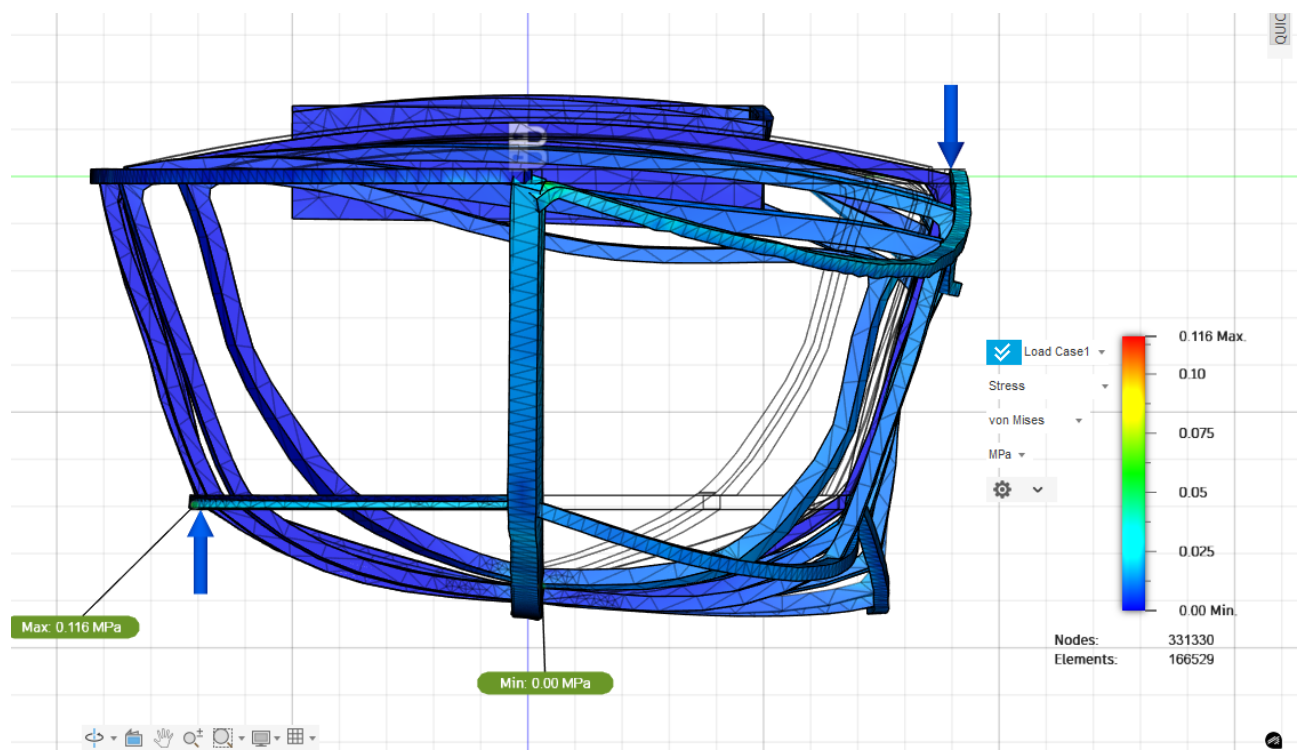


Рисунок 4.10 – Перевірка корпусу на скручування

При проведенні досліджень корпус розроблюваного морського багатофункціонального дрону досліджуваний об'єкт продемонстрував задовільні показники міцності та поведінки окремих елементів з огляду на їх пружність та здатність витримувати задану напругу у досліджуваних напрямках, у зв'язку з чим можна вважати розроблювану конструкцію допустимою до виготовлення та експлуатації в широкому спектрі сфер пов'язаних з водним середовищем.

## 4.2 Охорона праці

Виконання робіт по написанню кваліфікаційної роботи безпосередньо пов'язане з електронікою та електротехнікою, електрикою. Необхідно чітко дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з ланцюгами електрокомпонентів. Під час роботи з електрикою необхідно уникати води. Не торкатися електрообладнання або електричних ланцюгів мокрими руками. Це підвищує ризик ураження електричним струмом. Не можна використовувати обладнання зі зношеними шнурами, пошкодженою ізоляцією або зламаними штекерами. При роботі з акумуляторними комірками важливо заздалегідь перевірити рівномірність заряду кожного окремого елемента. Неправильне складання комірок акумулятора може призвести до пожежі або вибуху. Заряджання акумулятора необхідно виконувати лише за допомогою спеціалізованого зарядного пристрою. Не перевищувати значення за напругою і силою струму, що подається на пристрій. В іншому випадку пристрій може вийти з ладу або вразити людину струмом. Комплектуючі пов'язані в один ланцюг повинні бути сумісні один з одним як по роз'ємах, що використовуються, так і по робочій напрузі і силі струму. Недостатнє електроживлення призводить до неоптимального режиму роботи, зниження швидкості роботи, зниження ефективності, невідповідності нормативним показникам. Подача надмірного струму призводить до виходу з ладу окремих елементів або всього ланцюга, до потенційної пожежі, вибуху або ураження людини струмом. У жодному разі не можна кидати і пошкоджувати механічно електронні компоненти, не торкатися компонентів під час їх роботи у включеному стані. При ремонті або монтуванні електрообладнання необхідно користуватися лише інструментом із ізоляційним покриттям рукояток. Так як для людини небезпечною вважається будь-яка напруга понад 24 вольт, всі роботи зі збирання, ремонту або підключення електрокомпонентів необхідно проводити тільки в знеструмленому стані.

Згідно з пунктом 3.4 Положення про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу у харківському національному університеті радіоелектроніки, науковий керівник відповідає за безпечну експлуатацію приладів, установок, обладнання, а також захисних, сигнальних і протипожежних пристроїв, контрольно-вимірювальних приладів, посудин, що працюють під тиском, безпечне використання, забезпечення і транспортування вибухових, отруйних, радіоактивних, легкозаймистих та інших шкідливих для життя і здоров'я речовин [40].

Виходячи з цього пункту, було проведено розрахунки електричних компонентів розроблюваного дрона.

Для обраних акумуляторних батарей напруга 24 В постійного струму відноситься до безпечної низької напруги (SELV) згідно з нормами електробезпеки.

Для розрахунку безпечного перерізу силових кабелів прийнято допустиму густина струму для мідного провідника рівною 4 А/мм<sup>2</sup>. Розрахунок проводиться за допомогою формули (4.1):

$$S = \frac{A}{\rho}, \quad (4.1)$$

де  $S$  – площа перерізу кабелю, мм<sup>2</sup>;

$A$  – сила струму двигуна, ампер;

$\rho$  – густина струму для мідного провідника.

Таким чином площа перерізу для кабеля для одного двигуна:

$$S = \frac{43,5}{4},$$

$$S = 10,9 \text{ мм}^2.$$

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було виконано доскональний аналіз літератури за заданою темою, яка пов'язана з розробкою, експлуатацією та класифікацією безпілотних апаратів в водному, повітряному та наземному середовищі. Наведено приклади використання безпілотних водних апаратів різного функціоналу та способу дії. Проведено порівняння матеріалів та схем конфігурації розроблюваного дрону, підходів до його створення, моделювання та симуляції. На основі отриманих даних було проведено розрахунки обов'язкових параметрів та характеристик, а також навантажень та інших додаткових параметрів. Враховуючи отримані чисельні дані зроблено вибір відповідних електронних компонентів та матеріалів для дрона, враховано концепцію його багатозадачності та багатофункціональності. Застосовано технології програмного забезпечення для 3D моделювання для створення корпусу, посилюючих елементів та розміщення компонентів електронної схеми у внутрішньому середовищі. Проведено експериментальні симуляції статичних навантажень за різними параметрами діючої сили та напрямку відносно корпусу дрону. В результаті проведення симуляцій було виявлено, що корпус дрона здатний витримувати до 5600 Ньютон моментального короткотривалого навантаження у напрямку днища без втрати цілісності та руйнувань, витримувати до 2500 Ньютон ударного навантаження на борт без втрати цілісності та руйнувань, та до 3000 Ньютон сили на скручування з допустимим рівнем деформації. Отримані дані порівняно з заданими умовами та признано задовільними.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. Fernando Sotelo-Torres, Laura V Alvarez, Robert C Roberts.

4. Корченко О.Г., Ілляш О.С. Узагальнена класифікація безпілотних літальних апаратів : Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. - 2012. - Вип. 4. - С. 27-36.

5. MOL and Partners Set World Records for Time and Distance in Autonomous Navigation with Sea Trial Using Large Commercial Car Ferry : веб-сайт. URL: <https://www.mol.co.jp/en/pr/2022/22017.html> (дата звернення 04.09.2025)

6. Patterson, Ruth G.; Lawson, Emily; Udyawer, Vinay; Brassington, Gary B.; Groom, Rachel A.; Campbell, Hamish A. (2022). "Uncrewed Surface Vessel Technological Diffusion Depends on Cross-Sectoral Investment in Open-Ocean Archetypes: A Systematic Review of USV Applications and Drivers". *Frontiers in Marine Science*. 8.

7. The US Navy's new autonomous warship is called the Sea Hunter : веб-сайт. URL : <https://www.theverge.com/2016/4/8/11391840/us-navy-autonomous-ship-sea-hunter-christened> (дата звернення 05.09.2025)

8. Sea Drones Attack Russian Landing Craft In Crimean Port : веб-сайт. URL : <https://www.twz.com/sea-drones-attack-russian-landing-craft-in-crimean-port> (дата звернення 05.09.2025)

9. Морський дрон Magura V5 вперше показали у реальному розмірі: у чому його особливість : веб-сайт. URL : <https://focus.ua/uk/digital/622606-morskij-dron-magura-v5-vpershe-pokazali-u-realnomu-rozmiri-u-chomu-jogo-osoblivist> (дата звернення 05.09.2025)

10. Україна розкрила деталі про ударні морські БПА : веб-сайт. URL : <https://mil.in.ua/uk/news/ukrayina-rozkryla-detali-pro-udarni-morski-bpa/> (дата звернення 06.09.2025)

11. Official SpaceX Photos. Just Read the Instructions : веб-сайт. URL : <https://www.flickr.com/photos/spacex/17127808431/in/photostream/> (дата звернення 06.09.2025)

12. SpaceX Autonomous Spaceport Drone Ship Sets Sail for Tuesday's CRS-5 Rocket Landing Attempt : веб-сайт. URL : <https://www.americaspace.com/2015/01/04/spacex-autonomous-spaceport-drone-ship-sets-sail-for-tuesdays-crs-5-rocket-landing-attempt/> (дата звернення 07.05.2025)

13. Saildrones go where humans can't – or don't want to – to study the world's oceans : веб-сайт. URL : <https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/saildrones-go-where-humans-cant-or-dont-want-to-to-study-the-worlds-oceans/> (дата звернення 07.09.2025)

14. Saildrone's Journey Around Antarctica Uncovers New Climate Clues : веб-сайт. URL : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-05/saildrone-s-journey-around-antarctica-uncovers-new-climate-clues> (дата звернення 07.09.2025)

15. Scientists drove a robotic surfboard into Hurricane Sam, and the waves were incredible : веб-сайт. URL : <https://www.washingtonpost.com/weather/2021/09/30/hurricane-sam-saildrone-video-waves/> (дата звернення 07.09.2025)

16. Follow the Saildrone 2019 : веб сайт. URL : <https://www.pmel.noaa.gov/itae/follow-saildrone-2019> (дата звернення 07.09.2025)
17. Jetson nano : веб-сайт. URL : <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano> (дата звернення 08.09.2025)
18. NVIDIA Jetson Nano 4GB Development Kit : веб-сайт. URL : <https://no.rs-online.com/web/p/processor-development-tools/1999831> (дата звернення 08.09.2025)
19. Jetson Nano Brings AI Computing to Everyone : веб-сайт. URL : <https://developer.nvidia.com/blog/jetson-nano-ai-computing/> (дата звернення 09.09.2025)
20. Pixhawk 6C : веб-сайт. URL : <https://holybro.com/collections/flight-controllers/products/pixhawk-6c?variant=42783569903805> (дата звернення 09.09.2025)
21. Pixhawk 6C flight controller : веб-сайт. URL : [https://www.reichelt.com/de/en/shop/product/pixhawk\\_6c\\_flight\\_controller\\_pm02\\_power\\_module-340476?country=de&CCTYPE=private&LANGUAGE=en](https://www.reichelt.com/de/en/shop/product/pixhawk_6c_flight_controller_pm02_power_module-340476?country=de&CCTYPE=private&LANGUAGE=en) (дата звернення 10.09.2025)
22. Польотний контролер Pixhawk 6C : веб-сайт. URL : [https://hobbymania.com.ua/ru/tovar.php?id\\_tovar=7955](https://hobbymania.com.ua/ru/tovar.php?id_tovar=7955) (дата звернення 11.09.2025)
23. T500 thruster : веб-сайт. URL : <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t500-thruster/> (дата звернення 12.09.2025)
24. Basic ESC 500 : веб-сайт. URL : <https://bluerobotics.com/store/thrusters/speed-controllers/besc500/> (дата звернення 13.09.2025)
25. Savox - Servo - SW-1210SG : веб-сайт. URL : <https://savox-servo.com/en/product/SW-1210SG/savox-servo-sw-1210sg-digital-coreless-motor-waterproof-steel-gear?srsIid=AfmBOoqfZlxyF1MMVKe5DU9Zgqmv9Klza-hm99yIAM-aEQdAXDEwORiM> (дата звернення 14.09.2025)

26. Victron LiFePO4 Battery 12,8V/200Ah Smart : веб-сайт. URL : <https://www.farco.no/batterier/victron-batterier/victron-litium/victron-lifepo4-smart/victron-lifepo4-battery-128v/200ah-smart> (дата звернення 16.09.2025)
27. M10 GPS : веб-сайт. URL : <https://holybro.com/products/m10-gps?variant=42991226192061> (дата звернення 17.09.2025)
28. ST VL53L1X Lidar : веб-сайт. URL : <https://holybro.com/products/st-vl53l1x-lidar?srsltid=AfmBOopCQ-U0IQIKfojik-Fc3sj-I0RnHs2tDxqtL2vEkPuM9vlbOqP1> (дата звернення 20.09.2025)
29. Low-Light HD USB Camera : веб-сайт. URL : <https://bluerobotics.com/store/sensors-cameras/cameras/cam-usb-low-light-r1/> (дата звернення 21.09.2025)
30. Quectel EC25E Cat4 Mini PCIe : веб-сайт. URL : [https://www.computersalg.no/i/7015995/allnet-lte-modul-quectel-ec25e-cat4-mini-pcie?srsltid=AfmBOorqh9sIW3Bwf5HTHe1GTZUTEQ7cgmU0Wa9Tlj4w3IGipym4\\_b45](https://www.computersalg.no/i/7015995/allnet-lte-modul-quectel-ec25e-cat4-mini-pcie?srsltid=AfmBOorqh9sIW3Bwf5HTHe1GTZUTEQ7cgmU0Wa9Tlj4w3IGipym4_b45) (дата звернення 22.09.2025)
31. Low-Light HD USB Camera cable : веб-сайт. URL : <https://bluerobotics.com/wp-content/uploads/2017/08/cab-1-1.png> (дата звернення 22.09.2025)
32. Holybro Power Distribution Board – PDB01 : веб-сайт. URL : <https://www.flyingtech.co.uk/product/holybro-power-distribution-board-pdb01/> (дата звернення 23.09.2025)
33. Pixhawk 6C with PM02 Power Module : веб-сайт. URL : <https://core-electronics.com.au/pixhawk-6c-with-pm02-power-module.html> (дата звернення 24.09.2025)
34. Holybro Pixhawk I2C Splitter Port Expand Board with Cable : веб-сайт. URL : <https://indianrobostore.com/product/holybro-pixhawk-i2c-splitter-port-expand-board-with-cable?srsltid=AfmBOopGcAy9Ma5hEba9MRbmVFoVr7Alfduucvt8eH0NojWrdVmtJZE7> (дата звернення 25.09.2025)

35. Holybro Microhard P900 Radio : веб-сайт. URL : [https://docs.px4.io/main/zh/telemetry/holybro\\_microhard\\_p900\\_radio#holybro-microhard-p900-radio](https://docs.px4.io/main/zh/telemetry/holybro_microhard_p900_radio#holybro-microhard-p900-radio) (дата звернення 26.09.2025)

36. Прадюх В.І., Капліна А.А. Морехідні якості суден : Навчальний посібник. - 2021. - С. 8-92.

37. Теорія судна : веб-сайт. URL : <https://studfile.net/preview/5648140/page:20/> (дата звернення 01.10.2025)

38. Сили, що діють на судно. Плавучість судна : веб-сайт. URL : <https://studfile.net/preview/5648207/page:7/> (дата звернення 02.10.2025)

39. Аксьонов А.В., Нечитайло В.І. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. - 2020. - С. 40-60.

40. Положення про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу у ХНУРЕ (Наказ ХНУРЕ від 23.10.2025 № 403). – Харків: ХНУРЕ, 2025. – 16 с.