

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ Микола СІДЄЛЄВ

«___» _____ 2025 р

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ

АПАРАТОМ З МАНІПУЛЯТОРОМ

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

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Здобувач

_____ **Єгор Романов**

«___» _____ 2025 р.

Керівник роботи

к.т.н, доцент

_____ **Олег ЩЕСЮК**

«___» _____ 2025 р.

Завдання на виконання кваліфікаційної роботи

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет	Комп'ютерних наук
Кафедра	Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Освітній ступінь	Магістр
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма	Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

_____ Микола СІДЄЛЄВ

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну магістерську роботу здобувача

Романов Єгор Владиславович

1. Тема кваліфікаційної роботи <Мобільна роботизована система для перевезення вантажів> затверджена наказом ректора ЧНУ ім. Петра Могили № 298 від «30» жовтня 2024 р.
2. Строк представлення кваліфікаційної роботи «19» червня 2025 р.
3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні
Автоматизована система керування підводним апаратом з маніпулятором.
4. Перелік питань, що підлягають розробці

1. Дослідження різновидів підводно-технічних робіт, для яких необхідне точне вертикальне позиціонування підводного апарата.
2. Формування загальної характеристики вертикального рушійного пристрою як ключового елемента ефективного керування по осі глибини у підводному середовищі
3. Виконання аналізу існуючих моделей підводних апаратів, визначити їхні конструктивні особливості, типи рушіїв, способи керування та їх ефективність.
4. Розробка загальної структури автоматизованої системи керування підводним апаратом з виконавчими пристроями.
5. Аналіз структури на загальній характеристиці самохідного прив'язного підводного апарата проекту "Бриз".
6. Розрахунок необхідних даних для виготовлення автоматизованої системи керування вертикальним рушійним пристроєм та 3D моделі вертикального рушійного пристрою.
7. Розробка структури системи керування вертикальним рушійним пристроєм.
8. Розробка та опис 3D моделі конструкції вертикального рушійного пристрою.
9. Гідростатичний аналіз міцності змодельованої конструкції вертикального рушійного пристрою.
10. Умове графічне зображення гідродинамічного аналізу потоку води при роботі вертикального рушійного пристрою.
5. Перелік графічних матеріалів:
6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи
Щесюк О.В.	Автоматизація та КІТ	1 - 3 розділи

Дата видачі завдання «30» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання кваліфікаційної роботи

Тема: **Мобільна роботизована система для перевезення вантажів**

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання КМР	09.09.2024	30.10.2024	Виконано
2.	Огляд літератури за темою роботи	31.10.2024	15.11.2024	Виконано
3.	Складання календарного плану КМР	18.11.2024	20.11.2024	Виконано
4.	Аналіз предметної області	21.11.2024	20.12.2024	Виконано
5.	Розробка проєктних рішень	23.12.2024	28.02.2025	Виконано
6.	Моделювання, конструювання та програмування СА та РТС	03.03.2025	18.04.2025	Виконано
7.	Дослідження СА та РТС, аналіз результатів	21.04.2025	16.05.2025	Виконано
8.	Відгук керівника КМР	19.05.2025	23.05.2025	Виконано
9.	Оформлення КМР та презентації	26.05.2025	04.06.2025	Виконано
10.	Попередній захист	05.06.2025	06.06.2025	Виконано
11.	Рецензування	16.06.2025	17.06.2025	Виконано
12.	Завершення оформлення КМР та презентації	18.06.2025	19.06.2025	Виконано
13.	Захист кваліфікаційної роботи	26.06.2025	27.06.2025	Виконано

Здобувач

Єгор РОМАНОВ

«__» _____ 20__ р.

Керівник роботи

к. т. н. , доцент

Олег ЩЕСЮК

«__» _____ 20__ р.

АНОТАЦІЯ

до кваліфікаційної магістерської наукової роботи

«Автоматизована система керування підводним апаратом з маніпулятором»

студента гр. 671м Романова Єгора Владиславовича

Керівник: канд. техн. наук, доцент Щесюк Олег Володимирович

Сучасні виклики у сфері дослідження, обслуговування та ремонту підводних об'єктів потребують активного використання підводної робототехніки. Зокрема, дистанційно керовані та автономні підводні апарати відіграють ключову роль у завданнях, що потребують високої точності, безпечності та оперативності в умовах глибоководного середовища. Ефективність таких апаратів значною мірою визначається рівнем автоматизації систем керування, які забезпечують стабільне функціонування, маневреність і адаптивність до змін зовнішнього середовища.

Особливу увагу в цьому контексті привертають підводні апарати, обладнані маніпуляторними пристроями. Вони дозволяють виконувати широкий спектр завдань: від забору зразків і виконання монтажних робіт до взаємодії з тонкими або небезпечними об'єктами. Успішне застосування таких систем потребує комплексного підходу до розробки алгоритмів керування, елементної бази, конструктивного моделювання та врахування фізичних обмежень, зумовлених водним середовищем.

Тематика даного дослідження охоплює проєктування автоматизованої системи керування підводним апаратом з маніпулятором із акцентом на дослідження впливу вертикального рушійного пристрою на просторову стабілізацію апарата. У межах цієї роботи здійснюється підбір складових компонентів автоматизованої системи, побудова 3D-моделі конструкції, аналіз гідродинамічних характеристик і перевірка міцності ключових компонентів. Основна мета полягає у створенні надійного та адаптивного керування, що забезпечить точне позиціонування апарата під час виконання підводно-технічних робіт.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшого вдосконалення підводних роботизованих систем, що знаходять застосування у морській інженерії, екологічному моніторингу, аварійно-рятувальних операціях та інших критично важливих сферах.

Метою роботи є створення функціональної автоматизованої системи керування та забезпечення стабільної вертикальної стабілізації апарата за допомогою ефективного конструктивного рішення та гідродинамічної оцінки його взаємодії з оточуючим середовищем.

Об'єктом розробки є сам підводний апарат з усіма його складовими: механічною структурою, електронікою, програмним забезпеченням та іншими компонентами.

Предметом дослідження є процес проєктування та вдосконалення вертикального рушійного пристрою для підводного апарата з маніпулятором, а також методи його інтеграції в загальну систему автоматизованого керування.

Задачі, які були поставлені для досягнення **мети** в розробці системи керування підводним апаратом за маніпулятором:

1. Дослідити різновиди підводно-технічних робіт, для яких необхідне точне вертикальне позиціонування підводного апарата.
2. Сформулювати загальну характеристику вертикального рушійного пристрою як ключового елемента ефективного керування по осі глибини у підводному середовищі
3. Виконати аналіз існуючих моделей підводних апаратів, визначити їхні конструктивні особливості, типи рушіїв, способи керування та їх ефективність.
4. Розробити загальну структуру автоматизованої системи керування підводним апаратом з виконавчими пристроями.
5. Аналіз структури на загальній характеристиці самохідного прив'язного підводного апарата проєкту "Бриз".
6. Розрахунок необхідних даних для виготовлення автоматизованої системи керування вертикальним рушійним пристроєм та 3D моделі вертикального рушійного пристрою.

7. Розробка структури системи керування вертикальним рушійним пристроєм.

8. Розробка та опис 3D моделі конструкції вертикального рушійного пристрою.

9. Гідростатичний аналіз міцності змодельованої конструкції вертикального рушійного пристрою.

10. Умовне графічне зображення гідродинамічного аналізу потоку води при роботі вертикального рушійного пристрою.

Сторінок - 112. Рисуноків - 42, Таблиць - 19. Посилань - 27.

Ключові слова: підводний апарат, вертикальний рушійний пристрій, модель, автоматизована система.

ABSTRACT

to the qualifying master's thesis

" Automated Control System for an Underwater Vehicle with a Manipulator "

of the student of group 671m Romanov Yehor

Supervisor: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of AKIT

Schesyuk Oleg Volodymyrovych

Modern challenges in the field of underwater object research, maintenance, and repair require the active use of underwater robotics. In particular, remotely operated and autonomous underwater vehicles play a key role in tasks that demand high precision, safety, and responsiveness in deep-sea environments. The efficiency of such vehicles is largely determined by the level of automation of control systems, which ensure stable operation, maneuverability, and adaptability to changes in the external environment.

Special attention in this context is drawn to underwater vehicles equipped with manipulator devices. They allow for the execution of a wide range of tasks: from sample collection and assembly operations to interaction with delicate or hazardous objects. The successful application of such systems requires a comprehensive approach to the development of control algorithms, hardware components, structural modeling, and consideration of the physical limitations imposed by the aquatic environment.

The subject of this research covers the design of an automated control system for an underwater vehicle with a manipulator, with an emphasis on investigating the influence of the vertical propulsion device on the spatial stabilization of the vehicle. Within this work, the selection of components for the automated system, the construction of a 3D model, the analysis of hydrodynamic characteristics, and the strength testing of key components are carried out. The main goal is to create a reliable and adaptive control system that ensures accurate positioning of the vehicle during underwater technical operations.

The research results can be applied to the further development of underwater robotic systems used in marine engineering, environmental monitoring, rescue operations, and other critically important areas.

The aim of the work is to develop a functional automated control system and ensure stable vertical stabilization of the vehicle through an effective structural solution and hydrodynamic assessment of its interaction with the surrounding environment.

The object of development is the underwater vehicle itself with all its components: mechanical structure, electronics, software, and other elements.

The subject of the research is the design and improvement process of the vertical propulsion device for an underwater vehicle with a manipulator, as well as the methods of its integration into the overall automated control system.

The tasks set to achieve the goal in the development of the control system for the underwater vehicle with a manipulator:

1. To study the types of underwater technical works that require precise vertical positioning of the underwater vehicle.
2. To form a general characteristic of the vertical propulsion device as a key element of effective depth-axis control in the underwater environment.
3. To analyze existing models of underwater vehicles, determine their structural features, types of thrusters, control methods, and their effectiveness.
4. To develop a general structure of the automated control system for the underwater vehicle with actuating devices.
5. To analyze the structure and general characteristics of the tethered self-propelled underwater vehicle of the “Breeze” project.
6. To calculate the necessary data for the production of the automated control system and 3D model of the vertical propulsion device.
7. To develop the structure of the control system for the vertical propulsion device.
8. To develop and describe the 3D model of the vertical propulsion device structure.
9. To perform a hydrostatic strength analysis of the modeled vertical propulsion device structure.
10. To present a conditional graphical representation of the hydrodynamic analysis of water flow during the operation of the vertical propulsion device

Pages - 112. Figures - 42, Tables - 19. References - 27.

Keywords: underwater vehicle, vertical propulsion device, model, automated system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ З МАНІПУЛЯТОРАМИ.....	8
1.1 Застосування підводних апаратів у задачах, що потребують точного вертикального позиціювання	8
1.2 Функціональна роль вертикального рушійного пристрою в підводному середовищі.....	13
1.3 Аналіз сучасних підводних апаратів з вертикальним рушієм	20
1.4 Постановка задач дослідження	34
Висновки до першого розділу	34
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДВОДНОГО АПАРАТА З МАНІПУЛЯТОРОМ	36
2.1 Загальна функціональна структура автоматизованої системи керування підводним апаратом	36
2.2 Аналіз структури підводного апарата проєкту «Бриз» як базової платформи для інтеграції автоматизованої системи керування	42
2.3. Розрахунок необхідної тяги вертикального рушія	50
2.4 Розрахунок необхідної потужності вертикального рушія	54
2.5 Вибір електродвигуна для вертикального рушійного пристрою.....	57
2.6 Розрахунок розміщення та фіксації двигуна у середині корпусу рушія	62
2.7 Розрахунок сопла як обтічника для забезпечення протитоку	63
2.8 Розрахунки лінійної швидкості на кінці лопаті, кроку гвинта та куту його нахилу, а також оцінка коефіцієнтів гвинта.....	64
2.9 Розрахунок геометрії центрального конуса (всередині сопла).....	68
2.10 Графічна побудова спіральної поверхні гвинта за допомогою Matlab кодування.....	69

2.11. Проектування структури системи керування вертикальним рушійним пристроєм	74
Висновки до другого розділу	82
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРТИКАЛЬНОГО РУШІЙНОГО ПРИСТРОЮ ПІДВОДНОГО АПАРАТА.....	84
3.1 Розробка та опис 3D-моделі конструкції вертикального рушійного пристрою.....	84
3.2. Статична оцінка міцності змодельованої конструкції	98
3.3 Графічне представлення потоку води в результаті роботи пристрою у MATLAB	102
Висновки до третього розділу	105
4 ОРГАНІЗАЦІЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ ЛЮДЕЙ	106
4.1 Загальні вимоги до охорони праці.....	106
4.2 Аналіз ризиків та визначення заходів безпеки	107
4.3 Автоматизація робочих процесів	108
4.4 Застосування датчиків та систем моніторингу	109
4.5 Заходи безпеки при роботі з автоматизованою системою	110
4.6 Освіта та кваліфікація персоналу	111
4.7 Тренінги та навчання з питань охорони праці.....	111
4.8 Системи контролю та моніторингу	112
4.9 Аналіз нещасних випадків та заходи щодо їх запобігання	112
Висновки до четвертого розділу	113
ВИСНОВКИ	115
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	117

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування

ДКПА – дистанційно керований підводний апарат

ПК – пост керування

ЛКТ – лебідка кабель-тросу

СН – судно-носіє

КТ – кабель-трос

ЗК – засоби керування

ВП – виконавчі пристрої

ПМ – поворотний механізм

НС – навігаційні сенсори

ВРП – вертикальний рушійний пристрій

РКК – рушійно-кермовий комплекс

ВСТУП

Сучасні виклики у сфері дослідження, обслуговування та ремонту підводних об'єктів потребують активного використання підводної робототехніки. Зокрема, дистанційно керовані та автономні підводні апарати відіграють ключову роль у завданнях, що потребують високої точності, безпеки та оперативності в умовах глибоководного середовища. Ефективність таких апаратів значною мірою визначається рівнем автоматизації систем керування, які забезпечують стабільне функціонування, маневреність і адаптивність до змін зовнішнього середовища.

Особливу увагу в цьому контексті привертають підводні апарати, обладнані маніпуляторними пристроями. Вони дозволяють виконувати широкий спектр завдань: від забору зразків і виконання монтажних робіт до взаємодії з тонкими або небезпечними об'єктами. Успішне застосування таких систем потребує комплексного підходу до розробки алгоритмів керування, елементної бази, конструктивного моделювання та врахування фізичних обмежень, зумовлених водним середовищем.

Тематика даного дослідження охоплює проєктування автоматизованої системи керування підводним апаратом з маніпулятором із акцентом на дослідження впливу вертикального рушійного пристрою на просторову стабілізацію апарата. У межах цієї роботи здійснюється підбір складових компонентів автоматизованої системи, побудова 3D-моделі конструкції, аналіз гідродинамічних характеристик і перевірка міцності ключових компонентів. Основна мета полягає у створенні надійного та адаптивного керування, що забезпечить точне позиціонування апарата під час виконання підводно-технічних робіт.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшого вдосконалення підводних роботизованих систем, що знаходять застосування у

морській інженерії, екологічному моніторингу, аварійно-рятувальних операціях та інших критично важливих сферах.

Метою роботи є створення функціональної автоматизованої системи керування та забезпечення стабільної вертикальної стабілізації апарата за допомогою ефективного конструктивного рішення та гідродинамічної оцінки його взаємодії з оточуючим середовищем.

Об'єктом розробки є сам підводний апарат з усіма його складовими: механічною структурою, електронікою, програмним забезпеченням та іншими компонентами.

Предметом дослідження є процес проєктування та вдосконалення вертикального рушійного пристрою для підводного апарата з маніпулятором, а також методи його інтеграції в загальну систему автоматизованого керування.

Задачі, які були поставлені для досягнення **мети** в розробці системи керування підводним апаратом за маніпулятором:

1. Дослідити різновиди підводно-технічних робіт, для яких необхідне точне вертикальне позиціювання підводного апарата.
2. Сформулювати загальну характеристику вертикального рушійного пристрою як ключового елемента ефективного керування по осі глибини у підводному середовищі
3. Виконати аналіз існуючих моделей підводних апаратів, визначити їхні конструктивні особливості, типи рушіїв, способи керування та їх ефективність.
4. Розробити загальну структури автоматизованої системи керування підводним апаратом з виконавчими пристроями.
5. Аналіз структури на загальній характеристиці самохідного прив'язного підводного апарата проєкту "Бриз".

6. Розрахунок необхідних даних для виготовлення автоматизованої системи керування вертикальним рушійним пристроєм та 3D моделі вертикального рушійного пристрою.

7. Розробка структури системи керування вертикальним рушійним пристроєм.

8. Розробка та опис 3D моделі конструкції вертикального рушійного пристрою.

9. Гідростатичний аналіз міцності змодельованої конструкції вертикального рушійного пристрою.

10. Умовне графічне зображення гідродинамічного аналізу потоку води при роботі вертикального рушійного пристрою.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ З МАНІПУЛЯТОРАМИ

1.1 Застосування підводних апаратів у задачах, що потребують точного вертикального позиціювання

Інспекція та обстеження підводних об'єктів

Інспекційно-обстежувальні роботи є однією з ключових сфер застосування підводних апаратів. До таких робіт належать візуальний контроль стану підводних конструкцій, визначення пошкоджень, корозії, біообрастання, а також моніторинг технічного стану інфраструктури, розташованої під водою. Ефективне виконання подібних завдань неможливе без точного просторового позиціювання апарата, зокрема по вертикальній осі, що обумовлює необхідність наявності та якісної роботи вертикального рушійного пристрою.

Завдання обстеження часто виконуються в умовах обмеженої видимості, турбулентних потоків, наявності підводних перешкод і складної геометрії об'єктів. У таких умовах забезпечення стабільності апарата в заданій точці простору набуває критичного значення, особливо під час огляду з невеликої відстані. Вертикальне переміщення підводного апарата повинно здійснюватися плавно, точно та з мінімальними коливаннями, що потребує відповідного рівня технічного оснащення та застосування систем стабілізації [10].

Особливої актуальності вертикальне позиціювання набуває при виконанні оглядів конструкцій, що розміщені на різних рівнях глибини. Наприклад, при обстеженні колон або елементів трубопроводу, прокладеного з перепадом висот, підводний апарат повинен не лише фіксуватися у горизонтальній площині, а й коригувати своє положення по вертикалі з високою точністю. Навіть незначне відхилення по глибині може призвести до втрати фокусування сенсорів або контакту з об'єктом обстеження [10].

У цьому контексті вертикальний рушійний пристрій виконує функцію точного управління глибиною занурення, компенсує вплив підйомних і занурювальних сил, а також забезпечує стабілізацію у разі дії змінного зовнішнього середовища. У поєднанні з датчиками глибини, ІМУ або гідростатичними перетворювачами, рушійний модуль утворює замкнений контур керування, що дозволяє реалізовувати функції автопозиціювання та автозбереження рівня глибини [5].

Таким чином, у процесі інспекції підводних об'єктів вертикальний руховий модуль є необхідним функціональним елементом, що визначає загальну здатність апарата до виконання завдань у складному тривимірному середовищі.

Технічне обслуговування та ремонт

Завдання технічного обслуговування та ремонту підводних об'єктів є складними з точки зору навігації, стабілізації й взаємодії з елементами інфраструктури, що часто перебувають у важкодоступних ділянках. До таких об'єктів належать підводні трубопроводи, електричні кабелі, опори мостів, гідротехнічні споруди, донне обладнання та вузли з'єднання. Особливістю цього типу робіт є не лише необхідність точного позиціювання апарата, а й взаємодія з об'єктом за допомогою маніпуляторів, захоплювачів чи спеціальних інструментів, що висуває підвищені вимоги до стабільності платформи в усіх напрямках, зокрема — по вертикальній осі [6].

У процесі виконання робіт технічного обслуговування, таких як встановлення або демонтаж елементів, заміна або перевірка з'єднань, нанесення захисного покриття, необхідно витримувати точне положення апарата у фіксованій позиції протягом тривалого часу. У випадку складних гідродинамічних умов (припливи, течії, локальні турбулентності), саме вертикальний рушійний пристрій дозволяє компенсувати відхилення апарата від бажаної траєкторії або точки фіксації. Надмірна дестабілізація по глибині

може призвести до неможливості точного контакту з цільовою поверхнею, пошкодження обладнання або неякісного виконання операції.

Додаткову складність становить необхідність виконання технічного обслуговування на значній глибині, де змінюється гідростатичний тиск, збільшується інерційна маса води та знижується ефективність рушіїв. У таких умовах точність вертикального переміщення стає ще важливішою, особливо під час використання роботизованих маніпуляторів. Умови глибоководної експлуатації вимагають від вертикального рушійного модуля високої надійності, відмовостійкості та здатності до точного й швидкого реагування на команди системи керування [2].

У ряді випадків технічне обслуговування виконується в умовах обмеженого простору, наприклад у внутрішніх порожнинах конструкцій або вузьких каналах. Тут вертикальний рушій повинен забезпечити апарату можливість опускання й піднімання з мінімальними коливаннями, уникати зіткнень та зберігати необхідне положення у тривимірній обмеженій зоні.

Таким чином, у контексті технічного обслуговування і ремонтних робіт вертикальне позиціонування виконує критичну роль, будучи основою для точного маніпулювання, безпечного зближення з об'єктами і стабільної роботи апарата у змінному середовищі під водою.

Монтажні та демонтажні операції

Монтажні та демонтажні операції в підводному середовищі є одними з найбільш відповідальних та технічно складних задач, які виконуються із залученням безпілотних підводних апаратів (БПА) з маніпуляторами. У таких випадках необхідно забезпечити високу точність взаємодії з масивними або крихкими конструктивними елементами, які часто мають складну геометрію та обмежену доступність. Вертикальне позиціонування апарата є обов'язковою умовою успішного виконання подібних робіт.

У процесі монтажу підводних елементів — таких як модулі трубопроводу, сенсорні станції, елементи підводної інфраструктури або

кріплення — апарат повинен бути здатним точно наблизитися до цільової позиції, вирівнятися відносно заданих координат і стабільно утримуватися у необхідному положенні на час маніпуляцій. Аналогічно, демонтаж конструкцій, які вже частково закріплені, вимагає ювелірного переміщення апарата по вертикалі для забезпечення безпечного від'єднання, вилучення або переміщення елементів.

Рушійні пристрої вертикального типу дозволяють виконувати плавні та контрольовані переміщення по осі глибини, що є особливо важливим при роботі зі складно навантаженими або нестабільними об'єктами. Наприклад, під час зняття елементів, які мають залишкову плавучість, необхідно компенсувати додаткові вертикальні сили, аби уникнути раптового зсуву конструкції, який може пошкодити обладнання або сам апарат. У цьому контексті вертикальний рушій виконує функцію динамічного регулятора положення по висоті [4].

Особливо важливим є вертикальне стабілізування в умовах виконання монтажу/демонтажу поблизу дна або в зоні стику конструкцій, де вертикальний простір обмежений. Втрата точності вертикального позиціювання у таких випадках може призвести до помилок з'єднання, деформації вузлів або пошкодження маніпулятора. Окрім цього, апарат повинен бути здатним утримувати своє положення у разі змін зовнішнього середовища, таких як припливно-відпливні коливання, локальні течії або змінення розподілу ваги після маніпуляцій.

У багатьох випадках монтажні та демонтажні операції виконуються за сценаріями, де апарат працює в автономному або напіваавтоматичному режимі, із заздалегідь заданими точками фіксації у просторі. Для таких сценаріїв особливо важливим є наявність програмно-керованого вертикального рушія з підтримкою точного контролю переміщення, стабілізації на фіксованій глибині та здатністю реагувати на зміни оточення в реальному часі.

Таким чином, у структурі завдань монтажу і демонтажу вертикальний рух є не допоміжною, а основною координатою, що визначає ефективність, безпечність та точність виконання всього технологічного процесу.

Взаємодія з підводною інфраструктурою

Підводна інфраструктура включає в себе широкий спектр об'єктів — від стаціонарних конструкцій (офшорні платформи, фундаменти, підводні модулі, вузли з'єднання) до прокладених комунікаційних та енергетичних систем (трубопроводи, кабелі, сенсорні мережі). Здійснення технічної взаємодії з такими об'єктами потребує високого рівня просторової точності позиціонування, що зумовлює важливість стабільного контролю положення апарата по вертикальній осі.

На відміну від ізольованих оглядових чи монтажних задач, взаємодія з інфраструктурними об'єктами часто передбачає серію координованих дій у складній геометричній обстановці, де апарат повинен:

- 1) наблизитися до об'єкта без зіткнення;
- 2) досягти точної висоти над поверхнею або всередині технічного вузла;
- 3) утримуватись у стабільному положенні протягом всієї операції;
- 4) здійснювати вертикальні мікропереміщення для регулювання позиції сенсорів або інструментів.

Важливим аспектом є той факт, що елементи підводної інфраструктури часто розміщуються на значних глибинах, у складних умовах, з обмеженим доступом до точок підключення чи обслуговування. При цьому сама інфраструктура може бути частково занурена в донні осади, оточена конструктивними перешкодами або покрита біообрастаннями, що обмежує огляд і свободу маневру. У таких умовах вертикальний рушій дозволяє коригувати положення апарата відносно складних поверхонь або отворів з точністю, необхідною для запобігання контакту з конструкцією [8].

Крім того, при з'єднанні з елементами інфраструктури (наприклад, підключення гідравлічного або електричного конектора, встановлення

датчика, прокладання кабелю), вертикальний рух використовується для утримання апарата в оптимальній точці фіксації, забезпечення правильного кута підходу, а також для створення механічного зусилля при монтажі або від'єднанні елементів. Усі ці дії потребують динамічного регулювання сили тяги у вертикальному напрямку та високої чутливості системи керування до зовнішніх змін (наприклад, при віддачі від закріплення).

У випадку модульної або адаптивної інфраструктури (наприклад, змінних сенсорних систем, портів обслуговування), точне вертикальне позиціонування дозволяє апаратові з високою повторюваністю виконувати циклічні задачі — регулярні перевірки, заміни, очищення тощо. Це особливо важливо для довготривалого технічного супроводу офшорних об'єктів, де людська присутність мінімальна або неможлива.

Таким чином, під час взаємодії з підводною інфраструктурою вертикальний рушій виступає не лише засобом переміщення, а й ключовим елементом точного операційного позиціонування, що забезпечує ефективну інтеграцію підводного апарата в технічну систему об'єкта.

1.2 Функціональна роль вертикального рушійного пристрою в підводному середовищі

Роль у стабілізації та управлінні глибиною

Однією з основних функцій вертикального рушійного пристрою в підводному апараті є забезпечення стабільного управління глибиною занурення та вертикального положення апарата в товщі води. Вертикальне позиціонування є критично важливим параметром під час виконання широкого спектра завдань — від візуального огляду й технічного обслуговування до маніпуляцій з об'єктами інфраструктури, що потребують точного розміщення апарата у тривимірному просторі [10].

У підводному середовищі глибина занурення безперервно змінюється під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, таких як зміна об'ємної маси апарата, гідродинамічний тиск, течії, хвильова активність, розподіл вантажу

або рух маніпулятора. Без відповідної корекції навіть незначні збурення можуть призвести до дрейфу по вертикалі, що негативно впливає на точність виконання місії та може унеможливити її реалізацію.

Вертикальний рушійний пристрій забезпечує можливість активного протистояння цим збуренням шляхом створення спрямованої сили тяги вздовж осі глибини. Завдяки цьому апарат може:

- 1) підтримувати стабільну глибину на заданому рівні;
- 2) плавно змінювати глибину за потреби;
- 3) швидко реагувати на вертикальні зсуви, спричинені рухом води чи апарата.

З технічної точки зору, вертикальне керування глибиною базується на інтеграції рушія з автоматизованою системою керування (АСК), яка приймає сигнали від датчиків глибини, тиску або інерційних вимірювальних систем. На основі цих сигналів АСК формує керуючі імпульси для рушійного пристрою з метою досягнення або утримання необхідного положення. Найчастіше використовуються контури зворотного зв'язку з ПІД-регуляторами, які забезпечують плавну стабілізацію без коливань і перерегулювань.

Функція стабілізації по глибині (depth hold mode) дозволяє оператору або програмі автоконтролю фіксувати апарат на конкретному рівні занурення, що є особливо корисним при виконанні точкових операцій або тривалому спостереженні. Це значно зменшує навантаження на оператора й підвищує точність взаємодії з об'єктами під водою.

Таким чином, вертикальний рушійний пристрій виконує ключову роль у забезпеченні динамічної стабільності апарата по осі глибини, виступаючи базовим елементом механізму утримання просторового положення в умовах змінного зовнішнього середовища.

Вимоги до конструкції у зв'язку з особливостями середовища

Функціонування вертикального рушійного пристрою у підводному середовищі обумовлює низку специфічних вимог до його конструкції, що

зумовлені фізичними, гідродинамічними та хімічними характеристиками водного середовища. Врахування цих особливостей є критично важливим для забезпечення надійності, довговічності та ефективності роботи рушія як основного елемента управління по вертикальній осі.

Однією з головних особливостей підводного середовища є зростання гідростатичного тиску з глибиною. Конструктивні елементи рушійного пристрою — включно з електричними двигунами, підшипниками, герметичними з'єднаннями та елементами кріплення — повинні бути розраховані на роботу в умовах підвищеного зовнішнього тиску. Це передбачає застосування герметичних корпусів, ущільнювачів, заповнення внутрішнього простору нейтральною рідиною або гелем, здатним компенсувати зовнішній тиск без пошкодження компонентів.

Іншою критичною умовою є наявність агресивного впливу морської води, що містить солі, мікроорганізми та інші хімічно активні компоненти. Це вимагає використання корозійностійких матеріалів, зокрема:

- 1) нержавіючої сталі (марки AISI 316 і вищі),
- 2) титанового сплаву,
- 3) спеціальних полімерів,
- 4) композитних матеріалів з покриттям (наприклад, епоксидна смола або антикорозійна фарба).

Окрім цього, конструкція рушія повинна враховувати гідродинамічні навантаження, що виникають під час руху в товщі води або у присутності течій. Елементи кріплення, лопаті гвинта, втулки та опори повинні мати оптимізовану форму для зниження опору воді та запобігання кавітації. Кавітація — утворення парових порожнин на лопатях гвинта — призводить до зменшення тяги, шуму та потенційного пошкодження матеріалу. Для її зменшення важливо дотримуватись вимог до частоти обертання гвинта та профілю лопатей.

Також до конструкції висуваються вимоги вібраційної та механічної стійкості. Робота рушія у змінному навантаженні та при високих обертах спричиняє вібрації, які можуть негативно впливати на інші системи апарата, зокрема сенсорні модулі або блоки керування. Тому конструкція має включати демпфуючі елементи або бути ізольованою від основного корпусу апарата через еластичні кріплення [8].

Умови використання під водою також вимагають забезпечення ефективного тепловідведення, оскільки в умовах герметичного середовища циркуляція повітря відсутня. Найчастіше охолодження забезпечується безпосередньо водою, яка обмиває корпус двигуна. У таких випадках зовнішні поверхні рушія мають виконувати роль радіаторів і бути розрахованими на тривале відведення тепла без перегріву. Важливо при цьому уникати прямих отворів або негерметичних стиків, які могли б призвести до короткого замикання або втрати працездатності електроніки.

Таким чином, конструкція вертикального рушійного пристрою повинна бути результатом складного інженерного компромісу між гідродинамікою, міцністю, герметичністю, корозійною стійкістю та енергоефективністю, що враховує всі особливості експлуатації у змінному й агресивному середовищі підводного простору.

Базові принципи роботи (на основі тяги, гідродинаміки)

Вертикальний рушійний пристрій у підводному апараті є механізмом, що створює спрямовану силу тяги вздовж осі глибини з метою зміни або утримання заданого положення апарата по вертикалі. Його функціонування базується на взаємодії гвинта (пропелера), електродвигуна та навколишнього водного середовища, де через гідродинамічні процеси виникає реактивна сила, що забезпечує рух.

Основним принципом роботи вертикального рушія є реактивний рух, що реалізується згідно з третім законом Ньютона: для забезпечення переміщення тіла в одному напрямку необхідно створити потік маси в протилежному. У

конструкції підводного апарата це досягається шляхом обертання гвинта, який захоплює воду і виштовхує її вниз, створюючи тим самим тягу вгору або вниз, залежно від напрямку обертання.

Величина створюваної тяги залежить від кількох основних параметрів:

- 1) діаметра гвинта — більший діаметр забезпечує більший об'єм перекачуваної води;
- 2) частоти обертання — чим вища швидкість обертання, тим більша швидкість водяного потоку, а отже, і тяга;
- 3) форми та профілю лопатей — профіль впливає на кут атаки, ефективність переміщення та зменшення турбулентності;
- 4) щільності середовища — у морській воді (вища щільність порівняно з прісною) при однакових параметрах створюється дещо більша тяга.

У гідродинамічному контексті рушій взаємодіє з водою як з в'язкою середовищем, і при цьому виникає опір руху, який визначається формою корпусу рушія, наявністю обтічників і ефективністю передачі енергії від двигуна до потоку води. Оптимізація цього процесу передбачає зменшення втрат на турбулентність та перегрів [4].

У сучасних підводних апаратах широко застосовуються безколекторні електродвигуни постійного струму (BLDC), які забезпечують високу ефективність, малий рівень шуму, компактність і можливість точного керування обертами. Такий двигун з'єднаний із гвинтом напряму або через редуктор (рідше — для зменшення механічних втрат).

Гідродинамічна ефективність рушійного пристрою також визначається співвідношенням швидкості потоку до споживаної енергії, що безпосередньо впливає на загальну енергоефективність апарата. У системах, які використовують функцію автоматичного регулювання глибини, змінення тяги відбувається за рахунок плавного керування обертами рушія, що дає змогу досягати як точного позиціонування, так і зменшення енергоспоживання при стабільній глибині.

Важливим аспектом роботи рушія є його відгук — час, за який система створює потрібну тягу після зміни команди. Для забезпечення стабілізації цей показник має бути мінімальним, а динаміка тяги — передбачуваною і лінійною в усьому діапазоні обертів.

Таким чином, базова робота вертикального рушія зводиться до керованого створення реактивної сили за допомогою гвинта, що взаємодіє з водним середовищем. Її ефективність визначається як характеристиками обертів елементів, так і гідродинамічними властивостями середовища, у якому функціонує апарат.

Коротка типологія рушіїв (електричні, гідравлічні тощо)

Рушійні пристрої, що забезпечують вертикальне переміщення підводних апаратів, класифікуються за типом приводу, джерелом енергії, способом реалізації тяги та принципами керування. Вибір конкретного типу рушія визначається умовами експлуатації, габаритними обмеженнями, вимогами до надійності та точності позиціонування. Найбільш поширеними типами рушіїв для підводних систем є електричні, гідравлічні, пневматичні та реактивні (водометні).

Електричні рушії

Найбільш широко застосовуються у сучасних підводних апаратах малого та середнього класу. Їх основою є електродвигун (зазвичай — безколекторний двигун постійного струму, BLDC), який обертає гвинт (пропелер), створюючи напрямлений потік води.

Переваги:

- 1) висока точність керування обертами;
- 2) компактність;
- 3) енергоефективність;
- 4) відсутність потреби в зовнішньому гідравлічному або пневматичному контурі;
- 5) низький рівень шуму.

- 6) Недоліки:
- 7) обмежена потужність (у порівнянні з гідравлічними системами);
- 8) чутливість до герметичності та охолодження.

Електричні рушії є основним типом у комерційних і науково-дослідницьких ROV та AUV, які виконують завдання огляду, моніторингу та обслуговування.

Гідравлічні рушії

Застосовуються переважно у великих підводних апаратах, що працюють на значних глибинах або здійснюють складні маніпуляції. Тяга створюється шляхом подачі рідини під тиском у гідромотор, який обертає гвинт.

Переваги:

- 1) висока потужність і зусилля;
- 2) стійкість до навантажень;
- 3) ефективна робота на великій глибині.
- 4) Недоліки:
- 5) необхідність у складній системі насосів, клапанів і трубопроводів;
- 6) ризик витоку робочої рідини;
- 7) обмежена точність регулювання обертів.

Гідравлічні рушії широко використовуються у важких промислових ROV, зокрема в глибоководних системах технічного обслуговування нафтогазових платформ.

Пневматичні рушії

Зустрічаються рідше і переважно в експериментальних або допоміжних системах. Принцип роботи полягає у використанні стисненого повітря або газу для створення реактивного струменя.

Переваги:

- 1) проста конструкція;
- 2) можливість створення швидкого імпульсу тяги.
- 3) Недоліки:

- 4) обмежений запас повітря;
- 5) низька точність і контрольованість;
- 6) низький ККД.

Пневматичні рушії практично не використовуються як основні вертикальні рушії, але можуть бути застосовані у допоміжних аварійних або системах скидання баласту.

Водометні рушії (реактивні системи)

В основі водометних систем лежить захоплення води через вхідний канал, її прискорення за допомогою внутрішнього ротора (турбіни) та виштовхування через сопло. Такі системи забезпечують безгвинтову реалізацію тяги.

Переваги:

- 1) безпека (відсутність відкритого гвинта);
- 2) знижений ризик пошкодження в обмежених просторах;
- 3) менший шумовий слід.
- 4) Недоліки:
- 5) нижча ефективність у порівнянні з гвинтовими системами при однаковій потужності;
- 6) складніша конструкція та обслуговування.

Водометні рушії знаходять застосування в апаратах, що працюють поблизу людей або в умовах підвищеної небезпеки пошкодження лопатей.

Загалом, при виборі типу вертикального рушія враховують такі фактори, як глибина занурення, необхідна тяга, енергетичні обмеження, наявність маніпуляторів та середовище експлуатації. У більшості малогабаритних підводних апаратів вертикальний рух забезпечується електричними гвинтовими рушіями завдяки їх простоті, керованості та енергоефективності [14].

1.3 Аналіз сучасних підводних апаратів з вертикальним рушієм

Приклади сучасних моделей підводних апаратів з вертикальним рушієм

На сучасному етапі розвитку підводної робототехніки на ринку представлено широкий спектр апаратів з реалізованими вертикальними рушіями. Вони відрізняються за класом (оглядові, робочі, автономні), габаритами, кількістю ступенів свободи та функціональним призначенням. Незалежно від конкретної сфери застосування, більшість таких апаратів мають у складі своєї рушійної системи окремі двигуни або рушії, орієнтовані уздовж вертикальної осі, що забезпечують керування глибиною занурення та стабілізацію по вертикалі. Нижче розглянуто кілька найбільш поширених і технічно досконалих моделей.

BlueROV2 (Blue Robotics, США)

BlueROV2 — це модульний дистанційно керований апарат (ROV), який належить до оглядового класу та широко використовується в наукових, інженерних і комерційних цілях.



Рисунок 1.3.1 – BlueROV2 компактний оглядовий ROV зі структурованим корпусом і вертикальними рушіями

Його конструкція включає шість рушіїв, із яких два розташовані вертикально. Така конфігурація дозволяє апаратові утримувати глибину, здійснювати вертикальні переміщення та стабілізацію в реальному часі.

Таблиця 1.3.1 – Загальні характеристики BlueROV2

Рушій	Два електричних безколекторних рушії вертикального напрямку (T200)
Керування	відкрита платформа ArduSub (на основі Pixhawk), підтримка зовнішніх датчиків
Спеціалізація	візуальний огляд, моніторинг, легке обслуговування, наукові дослідження
Управління	стабілізація глибини (depth hold), управління по крену та диференту (roll/pitch)
Максимальна глибина, м	100 (опціонально до 300 із глибоководним комплектом)

Seaeye Falcon (Saab Seaeye, Велика Британія)

Falcon — це універсальний ROV середнього класу, призначений для виконання складних технічних завдань, включно з інспекцією, обслуговуванням і легким монтажем.

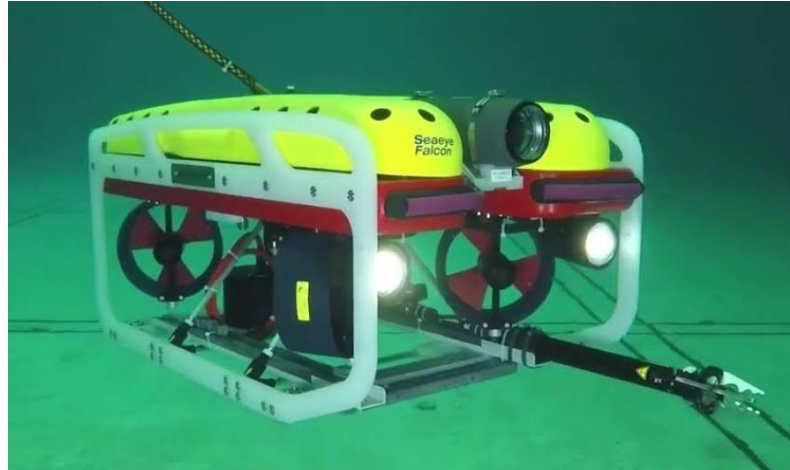


Рисунок 1.3.2 – Seabeed Falcon середньокласовий ROV з характерною жовтою рамою і вертикальними рушіями

Модель має п'ять електричних рушіїв, з яких два — вертикального напрямку, що забезпечують точне позиціонування по глибині навіть у складних умовах течій.

Таблиця 1.3.2 – Загальні характеристики BlueROV2

Рушій	Два електричних вертикальних рушії, гідродинамічно оптимізовані
Керування	фірмова система iCON з інтеграцією сенсорів, GPS та доплерівського профілювальника швидкості (DVL)
Спеціалізація	інспекція, легкі монтажні операції, технічне обслуговування
Управління	автоматичне утримання позиції та глибини, підтримка маніпуляторів
Максимальна глибина, м	300

VideoRay Pro 5 (VideoRay, США)

Інспекційний ROV з одним вертикальним рушієм, що призначений для роботи в обмеженому просторі, забезпечує стабілізацію глибини та точне позиціювання на глибинах до 305 м.



Рисунок 1.3.3 – VideoRay Pro 5 компактний апарат легкого класу призначений для інспекційних задач на малій і середній глибині

Зображення демонструє корпус апарата і розташування рушія. Його конфігурація передбачає використання одного вертикального рушія, інтегрованого з системою автоматичної стабілізації глибини.

Таблиця 1.3.3 – Загальні характеристики VideoRay Pro 5

Рушій	Один електричний вертикальний рушій з незалежним керуванням
Керування	інтелектуальний контролер із підтримкою стабілізації в умовах течій
Спеціалізація	швидка інспекція, портові споруди, водозабірні системи, безпека
Управління	стабілізація глибини, положення в просторі, підтримка датчиків позиціювання
Максимальна глибина, м	305

Argus Mini ROV (Argus Remote Systems, Норвегія)

Модель середнього класу, призначена для інспекційних і обслуговувальних робіт у складних умовах. Має чотири рушії, включаючи один вертикальний, і сумісність з інструментами для збору проб, зварювання та маніпуляцій.



Рисунок 1.3.4 – Argus Mini ROV версія з відеокамерою 4К

Зображення демонструє дизайн і основні елементи вертикального рушія.

Таблиця 1.3.4 – Загальні характеристики Argus Mini ROV

Рушій	Один вертикальний рушій (електричний), в складі чотирьох активних рушіїв
Керування	власна система стабілізації з гіроскопічним контролем, підтримка HD-відео
Спеціалізація	огляд, маніпуляції, підводне обслуговування нафтогазових систем
Управління	стабілізація по глибині, зворотний зв’язок від гідростатичних сенсорів
Максимальна глибина, м	1000

Deep Trekker DTG3 (Канада)

Цей оглядовий ROV оснащено єдиним комбінованим рушієм, який дозволяє здійснювати як вертикальні, так і обмежені горизонтальні переміщення завдяки змінному вектору тяги. Модель орієнтована на простоту у використанні та мобільність.



Рисунок 1.3.5 – Deer Trekker DTG3 — легкий, портативний апарат зі змінним вектором руху

Таблиця 1.3.5 – Загальні характеристики Deer Trekker DTG3

Рушій	Один комбінований рушій з можливістю зміни вектора тяги (у вертикальному та горизонтальному напрямках)
Керування	вбудована консоль, ручне та автоматичне керування, закрита система
Спеціалізація	огляд водосховищ, колекторів, свердловин, трубопроводів
Управління	стабілізація по глибині, ручне коригування положення
Максимальна глибина, м	200

Ці моделі демонструють різні підходи до реалізації вертикального руху — від простих однорухійних конфігурацій до складних систем із декількома рушіями та інтегрованими системами стабілізації. Усі вони передбачають керування по глибині як необхідну функцію для виконання завдань високої точності у підводному середовищі.

Типи вертикальних рушіїв, їх розташування, кількість, потужність

Вертикальні рушії в конструкції підводних апаратів є критичними елементами, що забезпечують керованість по осі глибини, стабілізацію у вертикальній площині та можливість точного позиціонування в складних гідродинамічних умовах. Їх технічна реалізація може відрізнятися залежно від призначення апарата, рівня автономності, глибини занурення та вимог до маневреності.

Типи вертикальних рушіїв

Найбільш поширеними типами вертикальних рушіїв є:

- 1) Електричні гвинтові рушії — найбільш поширений варіант у малих і середніх ROV. В основі — безколекторний двигун постійного струму (BLDC), що обертає гвинт. Приклад: BlueROV2, VideoRay Pro 5.
- 2) Гідравлічні рушії — використовуються в апаратах середнього та важкого класу, що працюють на великих глибинах або потребують високої сили тяги. Вони забезпечують обертання гвинта або турбіни за рахунок подачі рідини під тиском. Приклад: Seaeye Panther XT (старша модель).
- 3) Векторні рушії — в деяких моделях вертикальна складова реалізується за допомогою комбінованого рушія з можливістю зміни напрямку тяги (векторизація). Приклад: Deep Trekker DTG3.
- 4) Водометні системи (рідше) — тяга утворюється завдяки потоку води через сопло; можуть бути безгвинтовими, зменшуючи ризик пошкоджень.

Кількість вертикальних рушіїв

Кількість вертикальних рушіїв безпосередньо впливає на здатність апарата:

- 1) швидко змінювати глибину,
- 2) точно стабілізуватись на місці,
- 3) компенсувати вплив нахилу корпусу при маніпуляціях.

Типова кількість вертикальних рушіїв у сучасних ROV:

- 1) 1 рушій — у малих апаратах (VideoRay Pro 5, DTG3);
- 2) 2 рушії — у багатьох середньокласових апаратах (BlueROV2, Seaeye Falcon);
- 3) >2 рушії — у складніших конструкціях із високими вимогами до стабілізації та надмірності (резервування на випадок відмови).

Розміщення зазвичай симетричне відносно центральної осі апарата (ліворуч/праворуч або по діагоналі), щоб забезпечити стабільність без створення моменту, який би призводив до крену.

Розташування вертикальних рушіїв

Розміщення вертикальних рушіїв має велике значення для динамічного балансу апарата. Найчастіше застосовуються такі конфігурації:

- 1) по центру корпусу — забезпечує прямий вплив на вертикальну вісь без крену;
- 2) по боках (ліворуч/праворуч) — для рознесення тяги та кращої стабілізації;
- 3) по діагоналі — в апаратах із векторизованою тягою або з можливістю комбінованого вертикального і горизонтального руху;
- 4) у нижній частині корпусу — для зменшення моменту обертання та покращення ефекту підйому (особливо якщо центр маси зміщений вниз).

Потужність вертикальних рушіїв

Потужність рушіїв визначає швидкість вертикального переміщення, здатність протидіяти зовнішнім збуренням (течії, збурення від маніпулятора), а також вагу апарата, яку можливо стабільно утримувати або переміщувати.

Характерні діапазони потужностей:

- 1) 100–300 Вт — для оглядових апаратів малого класу (VideoRay, DTG3);
- 2) 300–600 Вт — середній клас (BlueROV2, Seaeye Falcon);
- 3) >1 кВт — важкі апарати, що працюють із навантаженнями або на великих глибинах (Argus Mini ROV).

Потужність вертикального рушія повинна враховувати не лише вагу апарата, а й додаткові фактори:

- 1) наявність маніпуляторів і зміщення центру маси;
- 2) змінну плавучість залежно від завантаження;
- 3) необхідність резерву потужності для аварійного підйому.

Таким чином, вибір типу, кількості, потужності та розміщення вертикальних рушіїв є результатом комплексного інженерного аналізу, який враховує як гідродинамічні параметри апарата, так і функціональні завдання, які він виконує в реальних підводних умовах.

Особливості інтеграції вертикального рушія в конструкцію підводного апарата

Інтеграція вертикального рушійного пристрою в конструкцію підводного апарата є одним з найважливіших етапів проєктування, що впливає на загальну стійкість, ефективність, маневреність та енергоємність системи. Від того, наскільки грамотно інтегровано рушії у корпусну структуру апарата, залежить не лише його здатність утримувати задану глибину, але й стабільність у разі змін маси, перекосів або впливу зовнішніх сил.

1. Розміщення у центрі мас або симетрично навколо нього

Один із ключових принципів інтеграції вертикального рушія — наближення його дії до центру мас апарата. Це дозволяє мінімізувати виникнення додаткових моментів, які могли б спричинити обертання апарата навколо поперечної або поздовжньої осі. У випадку використання двох

вертикальних рушіїв вони розташовуються симетрично відносно центральної вертикальної осі, що забезпечує збалансовану силу тяги без крену.

2. Ізоляція від основних корпусних елементів

Оскільки рушій створює локальні вібрації, турбулентність та теплові навантаження, його розміщення передбачає наявність механічної розв'язки (еластичних елементів, амортизаторів) або окремих вузлів кріплення, які не передають вібрації на сенсорні прилади чи керувальні модулі. Водночас, важливо зберігати жорсткість конструкції, аби тяга не розсіювалась через деформації корпусу.

3. Мінімізація гідродинамічного опору

При проєктуванні каналу обтікання апарата вертикальний рушій має бути розташований у такій зоні, де створюється найменший додатковий опір воді. Зазвичай це — внутрішні ніші корпусу або захищені зони в межах рами, що дозволяють воді проходити через гвинт без збурення основного потоку. У компактних ROV часто використовується відкрите розміщення рушіїв, але з додатковими обтічниками або сітками для захисту.

4. Електрична та інформаційна інтеграція

У конструкції апарата передбачається:

- 1) окремий силовий канал для живлення рушія (часто з високим струмом до 20–30 А);
- 2) інтерфейс управління — зазвичай це шина PWM, UART або CAN, пов'язана з бортовим контролером;
- 3) датчики контролю обертів, струму, температури, які інтегруються до загальної системи моніторингу.

Важливо також забезпечити герметичне з'єднання силових кабелів, особливо в місцях проходження через корпус. У глибоководних системах використовуються сальники, гелеві ущільнення або спеціальні роз'єми з компенсацією тиску.

5. Обслуговуваність та модульність

У більшості сучасних ROV передбачена модульна конструкція, яка дозволяє швидко демонтувати та замінити вертикальний рушій без розбирання всього апарата. Це особливо важливо при експлуатації в польових умовах або за умов тривалої місії. Деякі моделі (наприклад, BlueROV2) мають стандартні посадкові місця, що дозволяють змінювати конфігурацію рушіїв залежно від задачі.

6. Захист від зовнішнього середовища

Корпус вертикального рушія повинен бути інтегрований таким чином, щоб мінімізувати ризики пошкодження при зіткненні з об'єктами, у зоні дна або в умовах сильного потоку. Для цього часто використовуються захисні кожухи, решітки або корпусні виступи, що відводять удар від чутливого обладнання.

Інтеграція вертикального рушія в конструкцію підводного апарата — це багаторівневе завдання, що охоплює механічні, гідродинамічні, енергетичні й інформаційні аспекти. Її правильна реалізація забезпечує баланс між точністю вертикального руху, ефективністю та експлуатаційною надійністю апарата в умовах реального підводного середовища [14].

Основні підходи до системи керування вертикальним рухом (PID, адаптивні системи, зворотний зв'язок від глибини/IMU)

Система керування вертикальним рухом підводного апарата відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного положення по осі глибини, компенсації зовнішніх збурень та реалізації функцій точного позиціонування. На сучасному етапі в таких системах переважають алгоритми зі зворотним зв'язком, в основі яких — дані від сенсорів глибини, інерційних вимірювальних одиниць (IMU), а також математичні моделі руху.

1. PID-регулятори (Пропорційно-Інтегрально-Диференціальні системи)

Найбільш поширеним і базовим підходом є застосування PID-регуляторів, які забезпечують корекцію сигналу керування відповідно до відхилення фактичної глибини від заданої.

- 1) Пропорційна складова (P) — формує реакцію рушія на поточну помилку;
- 2) Інтегральна складова (I) — компенсує постійні зсуви (наприклад, зміну плавучості);
- 3) Диференціальна складова (D) — пригнічує коливання та стабілізує відгук системи.

Переваги PID-регуляторів:

- 1) простота реалізації;
- 2) передбачуваність поведінки;
- 3) широке використання у промислових контролерах (наприклад, ArduSub, BlueOS).

Недоліки:

- 1) фіксовані коефіцієнти, чутливі до зміни середовища;
 - 2) можливість перерегулювання при різкій зміні маси або умов.
2. Адаптивні та нечіткі системи керування

Для більш складних сценаріїв, де параметри середовища змінюються динамічно (течії, зміна ваги при захопленні об'єкта, коливання центра мас), застосовуються адаптивні системи керування.

Ці системи:

- 1) автоматично підлаштовують параметри регулятора в режимі реального часу;
- 2) використовують методи модального аналізу, ідентифікації параметрів або нечіткої логіки;
- 3) забезпечують вищу точність позиціонування та кращу компенсацію збурень.

Недоліком є вища складність реалізації та потреба в потужнішому бортовому обчислювальному забезпеченні.

3. Використання зворотного зв'язку від глибини та IMU

Сучасні апарати для стабілізації вертикального положення використовують комбінований сенсорний зворотний зв'язок. Основні джерела даних:

- 1) Датчики глибини (гідростатичні перетворювачі тиску): забезпечують пряму інформацію про абсолютну глибину занурення;
- 2) Інерційні вимірювальні одиниці (IMU): вимірюють прискорення, кутові швидкості та нахили (pitch/roll), допомагають відрізнити реальне переміщення від короткочасного нахилу;
- 3) Доплерівські профілювальники швидкості (DVL) — в апаратах середнього і важкого класу, для обчислення вертикальної швидкості та положення відносно дна.

У багатьох системах (наприклад, у BlueROV2, Seaeye Falcon) дані з сенсорів обробляються у фільтрах Калмана або комплементарних фільтрах, які об'єднують інформацію з різних джерел, формуючи стійкий та точний сигнал для регулятора.

4. Автоматичні режими

На основі вищезазначених алгоритмів реалізуються такі автоматичні режими керування:

- 1) Depth Hold — утримання апарата на фіксованій глибині;
- 2) Vertical Positioning — переміщення між заданими рівнями;
- 3) Auto Dive / Auto Surface — автоматичне занурення або підняття;
- 4) Collision Avoidance — вертикальне уникнення перешкод (інтеграція з ехо-лотами або камерами).

Загалом, вибір типу системи керування вертикальним рухом залежить від вимог до точності, умов експлуатації, наявності сенсорної бази та обчислювальних ресурсів апарата. Прості PID-регулятори залишаються домінуючими у легких системах, тоді як адаптивні алгоритми використовуються в складних багатофункціональних підводних комплексах [16].

1.4 Постановка задач дослідження

Перш за все, необхідно дослідити різновиди підводно-технічних робіт, у яких критичне значення має здатність апарата до точного та стабільного регулювання положення по осі глибини. Далі слід сформулювати загальне уявлення про призначення, функції та конструктивні особливості вертикального рушія, розглядаючи його як ключовий компонент у структурі сучасного підводного апарата. З метою формування повного уявлення про наявні інженерні рішення, необхідно провести аналіз існуючих моделей підводних апаратів, визначити їхні конструктивні відмінності, типи рушіїв, принципи побудови систем керування та рівень їх ефективності. На підставі отриманих висновків формулюється загальна структура автоматизованої системи керування, яка включає виконавчі пристрої, зокрема вертикальний рушій. Проаналізувати будову самохідного прив'язного підводного апарата проєкту «Бриз», який виступає базовою платформою для впровадження нової системи. Виконати попередні розрахунки, необхідні для побудови вертикального рушійного пристрою, а також сформувати 3D модель на основі отриманих геометричних і силових характеристик. Після завершення моделювання провести аналіз міцності змодельованої конструкції з урахуванням гідростатичного тиску на заданій глибині. На завершальному етапі Реалізувати умовне графічне моделювання гідродинамічного потоку води навколо рушія за допомогою інструментів MATLAB, щоб оцінити характер розподілу напрямків руху водного середовища в результаті роботи пристрою.

Висновки до першого розділу

У результаті аналізу сучасних підходів до реалізації вертикального позиціонування підводних апаратів з маніпуляторами встановлено, що вертикальний рух є ключовим параметром, який забезпечує точність і

стабільність виконання широкого спектра підводно-технічних робіт. Особливу актуальність вертикальне позиціонування набуває при виконанні таких задач, як інспекція, технічне обслуговування, монтаж та демонтаж конструкцій, а також взаємодія з підводною інфраструктурою.

Вертикальний рушійний пристрій відіграє центральну роль у реалізації управління по осі глибини, стабілізації апарата в змінних умовах середовища та динамічному балансі при роботі з маніпуляторами. У ході дослідження встановлено, що до конструкції вертикального рушія висуваються особливі вимоги, зумовлені гідростатичним тиском, корозійною активністю водного середовища, гідродинамічними навантаженнями та потребою в точному регулюванні тяги.

Аналіз типології рушіїв показав, що переважаючими є електричні гвинтові системи з безколекторними двигунами, які забезпечують високу точність і керованість при відносно невеликих енергетичних затратах. Залежно від функціонального призначення апарата, використовуються різні конфігурації вертикальних рушіїв — як за кількістю, так і за розташуванням. Типові рішення передбачають симетричне розміщення одного або двох рушіїв із забезпеченням мінімізації моментів крену.

Огляд сучасних моделей підводних апаратів (BlueROV2, Seaeye Falcon, VideoRay Pro 5, Argus Mini ROV, Deep Trekker DTG3) показав, що всі вони мають вертикальні рушії, інтегровані в конструкцію відповідно до завдань маневрування, стабілізації й енергетичної ефективності. Рушії, як правило, працюють у складі системи автоматичного керування, що базується на PID-регуляторах або адаптивних алгоритмах із зворотним зв'язком від сенсорів глибини та IMU.

Теоретичні основи, викладені в цьому розділі, формують необхідне підґрунтя для подальшого проєктування, моделювання та дослідження вертикального рушійного пристрою як невід'ємного компонента автоматизованої системи керування підводним апаратом з маніпулятором.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДВОДНОГО АПАРАТА З МАНІПУЛЯТОРОМ

2.1 Загальна функціональна структура автоматизованої системи керування підводним апаратом

Автоматизована система керування (АСК) є базовим елементом сучасного самохідного прив'язного підводного апарата, особливо у випадках, коли апарат оснащується маніпулятором і призначений для виконання точних операцій у складному водному середовищі. Основним завданням АСК є забезпечення стійкого, безпечного й керованого функціонування апарата під час руху, позиціювання, виконання маніпуляцій та обміну інформацією з оператором у реальному часі.

У даному підрозділі буде розглянута загальна функціональна структура автоматизованої системи керування, побудована на основі поєднання класичної прив'язаної моделі (з кабелем-тросом) та багатоканальної системи взаємодії між компонентами керування, датчиками та виконавчими елементами. Представлена схема відображає основні вузли системи, їх взаємозв'язки та логіку функціонування.

На рисунку 2.1 подано функціональну схему автоматизованої системи керування самохідним прив'язним підводним апаратом виконавчими елементами.

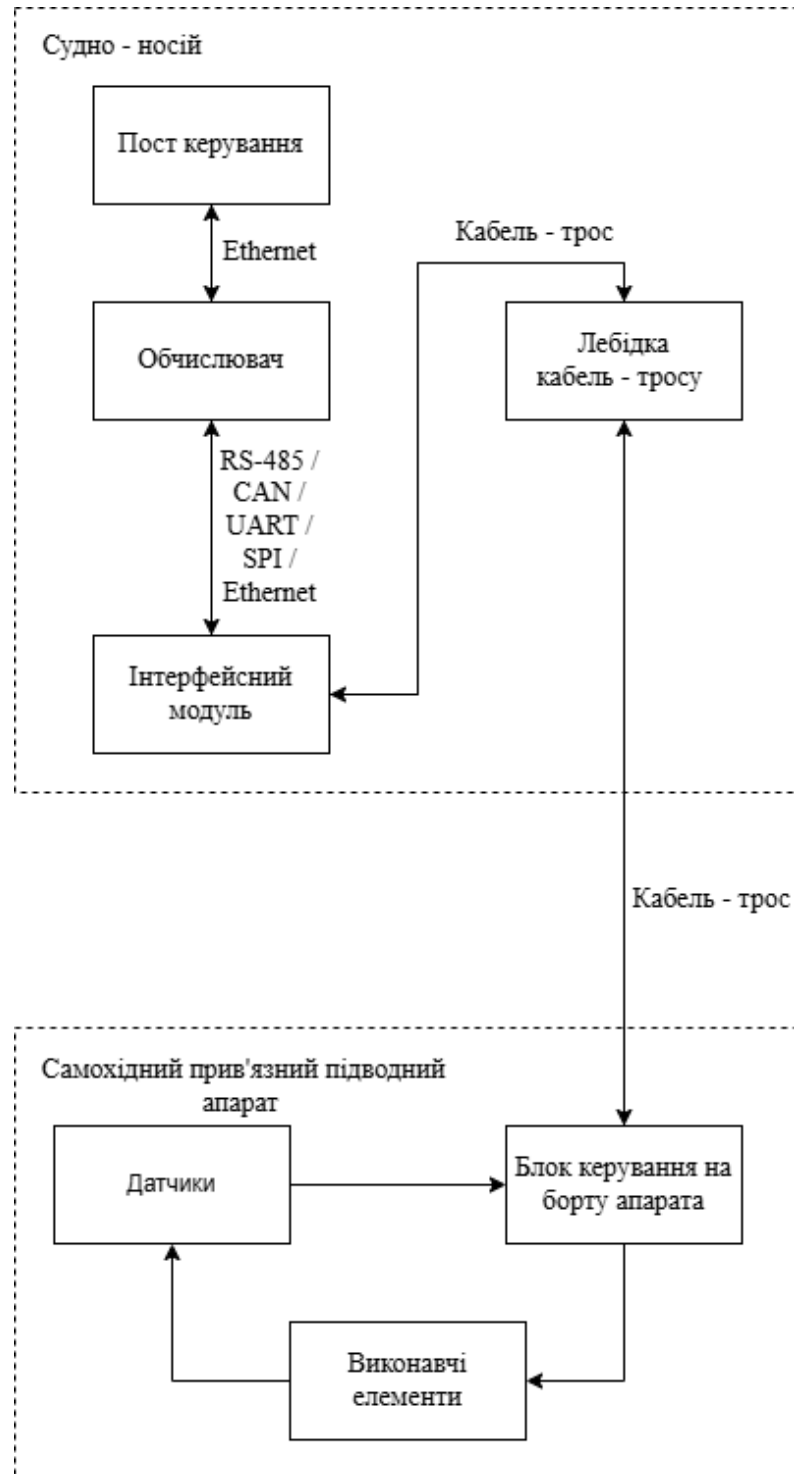


Рисунок 2.1.1 – Функціональна схема автоматизованої системи керування прив'язним підводним апаратом з виконавчими елементами

Система умовно поділена на дві частини:

- 1) поверхнева частина, розташована на судні-носії (операторський сегмент),

2) підводна частина, що міститься безпосередньо на борту апарата.

Пост керування

Пост керування є центральним модулем операторської частини системи. Він включає в себе комп'ютер або спеціалізовану станцію з програмним забезпеченням, що дозволяє:

- 1) керувати апаратом у ручному, напівавтоматичному або автоматичному режимі;
- 2) отримувати телеметричні дані з датчиків апарата (глибина, положення, температура, відео тощо);
- 3) контролювати стан виконавчих механізмів і відправляти керуючі команди.

Обмін даними між постом керування та обчислювальним блоком виконується, як правило, по каналу Ethernet, що забезпечує високу швидкість передавання і сумісність із сучасними комунікаційними протоколами.

Обчислювач

Обчислювач (або центральний обчислювальний модуль) виконує роль проміжної ланки між оператором і фізичними каналами зв'язку з підводним апаратом. Він:

- 1) обробляє вхідні команди з поста керування;
- 2) формує сигнали керування у відповідному форматі;
- 3) виконує логіку маршрутизації інформації;
- 4) підтримує канали зворотного зв'язку з апаратом.

Для передачі даних до інтерфейсного модуля обчислювач може використовувати RS-485, CAN, UART, SPI або Ethernet — залежно від обраної реалізації, необхідної стійкості сигналу та умов середовища.

Інтерфейсний модуль

Інтерфейсний модуль (також може виступати як перетворювач сигналу або транслятор протоколів) забезпечує перетворення та узгодження фізичних і логічних рівнів сигналів. Він також може виконувати функцію

мультиплексування інформації (злиття кількох потоків у єдиний кабель-трос), а в складніших реалізаціях — ще й оптоелектричне розділення каналів (у випадку використання оптоволокна).

Цей модуль з'єднаний з кабелем-тросом, який служить як каналом зв'язку, так і (в багатьох випадках) джерелом електроживлення для підводного апарата.

Лебідка кабелю-тросу

Лебідка є важливим технічним елементом у структурі прив'язного підводного апарата, що виконує функції:

- 1) механічної підтримки апарата при спуску і підйомі;
- 2) захисту та організації кабелю-тросу (щоб уникнути його перекручування, пошкодження);
- 3) передавання даних і живлення через кабель-трос, який інтегровано з електричними або оптоволоконними лініями.

У складі лебідки зазвичай передбачено барабан, електропривод, систему натягу та напрямні, а також електричні комутаційні вузли для безпечного підключення тросу до інтерфейсного модуля. Часто вона оснащується датчиками довжини кабелю для визначення глибини занурення.

Лебідка може керуватись як автоматично (від поста керування), так і вручну залежно від конфігурації системи.

Блок керування на борту апарата

Цей блок є локальним центром прийняття рішень, що відповідає за:

- 1) обробку вхідних команд, отриманих з поверхні (через трос);
- 2) обробку даних з вбудованих сенсорів;
- 3) реалізацію алгоритмів стабілізації, позиціонування, керування рушіями;
- 4) передавання телеметрії та зображень у реальному часі на пост керування.

У більшості сучасних апаратів тут використовується мікроконтролер або бортовий комп'ютер на базі ARM/STM32/Jetson тощо, який взаємодіє з виконавчими механізмами через драйвери.

Датчики

Сенсорна система підводного апарата включає:

- 1) гідростатичний датчик тиску — для визначення глибини;
- 2) інерційний модуль (IMU) — для обчислення положення в просторі (нахил, прискорення, курс);
- 3) температурні, струмові, напругові сенсори — для контролю системного стану;
- 4) опційно: відеокамери, сонари, гідролокатори — для збирання візуальної/просторової інформації.

Ці датчики надсилають інформацію до блоку керування, де вона обробляється та формує зворотній зв'язок для керування рушіями.

Виконавчі елементи

Виконавчі елементи забезпечують реалізацію механічної дії відповідно до отриманих команд. Сюди входять:

- 1) рушії (горизонтальні та вертикальні) — для маневрування та позиціонування;
- 2) маніпулятор — для виконання робіт (захоплення, обрізка, маніпулювання);
- 3) світлодіоди, актуатори, гідравлічні вузли (у складніших апаратах).

Керування виконавчими елементами здійснюється на основі команд блоку керування з урахуванням даних сенсорів (наприклад, стабілізація глибини на основі зворотного зв'язку з тиску).

Функціонування автоматизованої системи керування підводним апаратом відбувається у формі взаємодії між кількома логічно і фізично пов'язаними рівнями, які утворюють єдиний замкнений контур. Ініціація процесу починається з поста керування, що розташовується на борту судна-

носія. Оператор за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення формує команди керування рухом, позиціюванням та інженерними функціями підводного апарата (наприклад, керування маніпулятором або активація системи стабілізації глибини).

Ці команди передаються через мережевий інтерфейс — зазвичай Ethernet — до центрального обчислювального модуля, який виконує первинну обробку та перетворення команд у формат, що сумісний із інтерфейсною системою передавання сигналу. Обчислювач також приймає зворотні дані від апарата, відображає їх на екрані оператора й формує реакцію на основі аналізу отриманої телеметрії.

З обчислювача сигнал надходить до інтерфейсного модуля, який виконує фізичне й логічне узгодження протоколів. Наприклад, електричні сигнали Ethernet можуть бути трансформовані у стійкий до шуму інтерфейс типу RS-485, CAN або навіть передані по оптоволокну — залежно від конкретної реалізації апарата. Саме інтерфейсний модуль забезпечує передачу команд та отримання даних по кабелю-тросу, що фізично сполучає судно з апаратом. У разі потреби через цей же канал може передаватись електроживлення, якщо апарат не має автономного джерела живлення.

Кабель-трос пропущений через спеціальну лебідку, яка забезпечує його спуск і підйом. Лебідка контролює довжину випущеного кабелю, регулює натяг і зменшує механічні навантаження на провідник. Її механізм не лише дозволяє здійснювати фізичне переміщення апарата у вертикальній площині, а й гарантує безпеку лінії передачі сигналу. Таким чином, лебідка є не лише механічним компонентом, а й критичним елементом цілісності інформаційного та енергетичного каналу.

Інформаційний сигнал по тросу надходить на борт підводного апарата, де приймається центральним блоком керування. Цей блок виконує обробку сигналів, керує алгоритмами стабілізації, передає команди виконавчим механізмам і приймає інформацію від сенсорної системи. На основі даних з

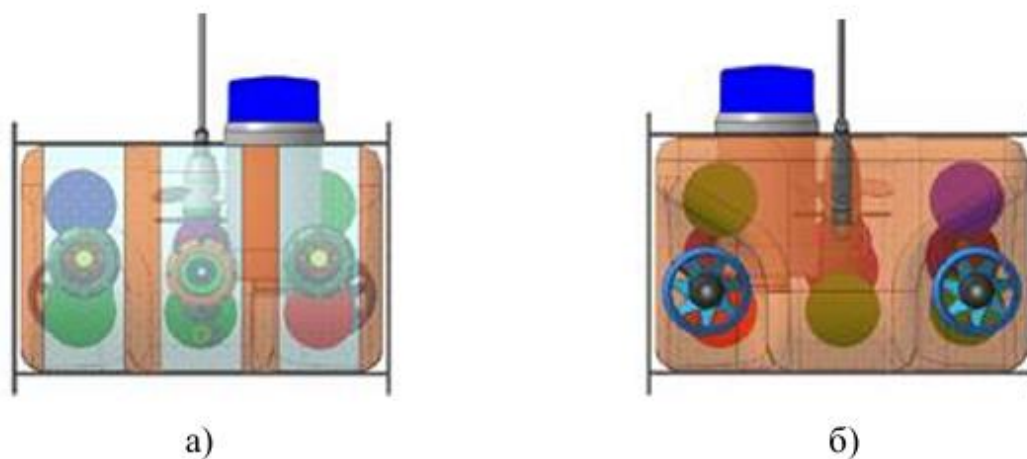
гідростатичних датчиків тиску, інерційних модулів (IMU), датчиків температури, струму або положення апарат здійснює самокорекцію свого положення в реальному часі.

Блок керування формує сигнали керування для виконавчих елементів — рушіїв вертикального й горизонтального руху, маніпуляторів або інших механізмів. Наприклад, у разі стабілізації глибини бортовий контролер постійно зчитує дані з датчика тиску, обчислює поточне відхилення від заданої глибини, і відповідно до алгоритму (PID або іншого) коригує оберти вертикального рушія.

Уся система працює у замкнутому циклі, в якому сигнал проходить повний маршрут — від оператора до підводного апарата, далі від сенсорів назад до блоку керування, а потім до поста спостереження. Така структура забезпечує високий рівень керованості, точності позиціювання і швидкої реакції на зовнішні збурення або зміну умов середовища, що є критично важливим для підводних місій із використанням маніпуляторів, інструментів і сенсорних систем.

2.2 Аналіз структури підводного апарата проєкту «Бриз» як базової платформи для інтеграції автоматизованої системи керування

Проєктування автоматизованої системи керування вертикальним рухом підводного апарата вимагає наявності типового апаратного середовища, яке можна використати як основу для розміщення та інтеграції структурних елементів системи. У цьому підрозділі розглянуто самохідний прив'язний підводний апарат (СППА) проєкту «Бриз» — один із вітчизняних прикладів роботизованих платформ, що вже містить необхідні функціональні компоненти: рушійну систему, кабельну лебідку, засіб керування, та призначений для підводних технічних операцій.



а) – вид спереду; б) – вид ззаду

Рисунок 2.2.1 – Зовнішній вигляд СППА проекту «Бриз»

Апарат «Бриз» обрано як базову модель не лише через наявність вертикального рушія, але й завдяки його компактним габаритам, невеликій масі та придатності до розширення функціоналу. Основною ідеєю є те, що розроблена система керування вертикальним рухом не повинна бути жорстко прив'язана до конкретного корпусу «Бризу», а має проектуватись так, щоби інтегруватися у будь-який аналогічний апарат, що має схожі габарити, електроживлення та масово-габаритні характеристики.

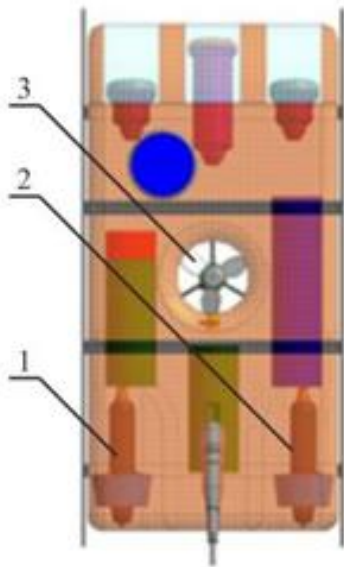
Технічні характеристики СППА проекту «Бриз» представлені в таблиці 2.2.1

Таблиця 2.2.1 – Технічні характеристики СППА проекту «Бриз»

Найменування параметра	Значення
Максимальна робоча глибина, м	50
Швидкість маршового руху, вузлів	1
Довжина КТ, м	до 150
Електроживлення	12В, 0,5 кВт
Кількість членів екіпажу, чол.	2
Габаритні розміри, мм	850x420x350

Маса апарата, кг	35
------------------	----

СППА проєкту «Бриз» живиться від джерела постійного струму напругою 12 В при споживаній потужності 0,5 кВт. Габаритні розміри корпусу становлять $850 \times 420 \times 350$ мм, а маса — 35 кг. Ці параметри є оптимальними для інтеграції вертикального рушійного пристрою невеликого класу, зокрема у вигляді компактного герметизованого блоку з власною електронікою керування.



1) – маршовий лівий РП; 2) – маршовий правий РП; 3) – вертикальний РП

Рисунок 2.2.2 – Місце розташування РП на СППА проєкту «Бриз»

Структура апарата включає рушійно-кермовий комплекс (РКК), до якого входять два горизонтальні маршові рушії, розміщені по боках, та один вертикальний рушій. Така схема дає змогу здійснювати повний вектор керування в площинах горизонтального і вертикального руху. Наявність уже існуючого вертикального рушія дозволяє провести точні вимірювання, калібрування та тестування розробленої системи, а також виконати порівняльний аналіз між штатною та запропонованою схемами стабілізації по осі глибини.

Для комунікації між апаратом і постом керування використовується оптичний кабель-трос діаметром 3 мм та довжиною до 150 м, який пропущений через спеціалізовану кабельну лебідку. Живлення апарата, передача команд і прийом телеметрії відбуваються одночасно по цьому каналу. Кабельна лебідка оснащена власним електроприводом і споживає 100 Вт потужності при тих же 12 В живлення. Це дозволяє уніфікувати систему живлення з апаратом і спростити систему енергозабезпечення всієї структури.

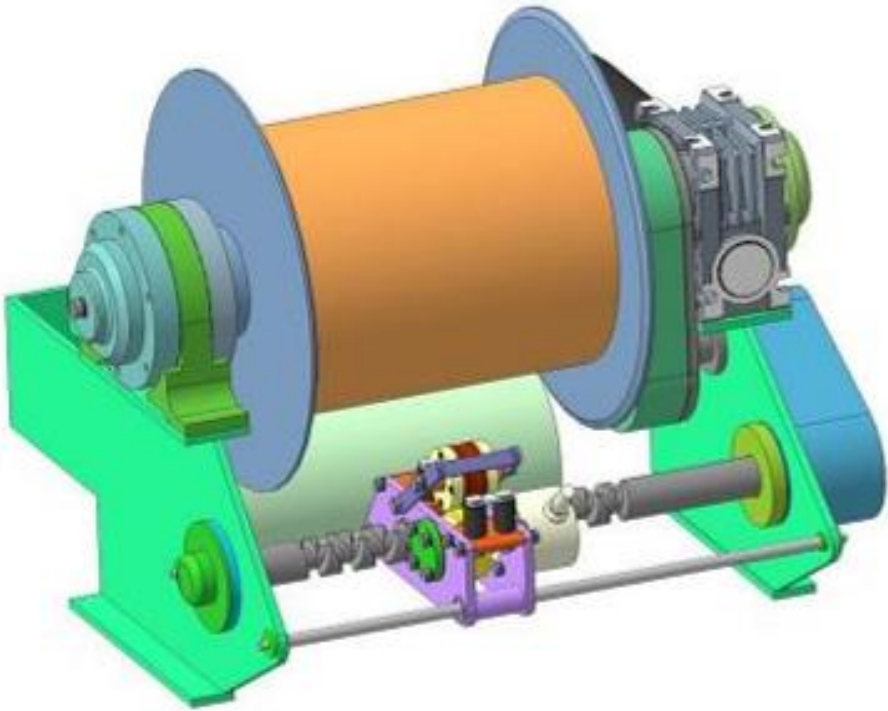


Рисунок 2.2.3 – Зовнішній вигляд КЛ для СППА проекту «Бриз»

Технічні характеристики КЛ для СППА проекту «Бриз» представлені в таблиці 2.2.2

Таблиця 2.2.2 – Технічні характеристики КЛ для СППА проекту «Бриз»

Найменування параметра	Значення
Напруга постійного живлення, В	12
Споживча потужність, Вт	100
Тип КТ	оптичний

Діаметр КТ, мм	3
Габаритні розміри, мм	310x350x270
Маса КЛ, кг	12

Керування апаратом здійснюється через провідний джойстик, який має автономне живлення і час безперервної роботи до 20 годин. Завдяки цьому оператор може виконувати завдання як у ручному, так і напіваавтоматичному режимі.



Рисунок 2.2.4 – Зовнішній вигляд засобу керування для СППА проекту
Детальні характеристики засобу для керування представлені в таблиці

2.2.3

Таблиця 2.2.3 – Технічні характеристики засобу керування СППА

Найменування параметра	Значення
Напруга постійного живлення, В	12
Електроживлення	автономне
Час безперервної роботи, год	20
Габаритні розміри, мм	240x100x60
Маса, кг	0,6

Маніпулятор як частина базової конфігурації апарата

У складі підводного апарата «Бриз» передбачено встановлення легкого електромеханічного маніпулятора, призначеного для захоплення, утримання та переміщення невеликих об'єктів масою до 3 кг у підводному середовищі. Його наявність створює додаткове конструктивне та керувальне навантаження, яке потребує урахування при проектуванні системи стабілізації й вертикального позиціонування.

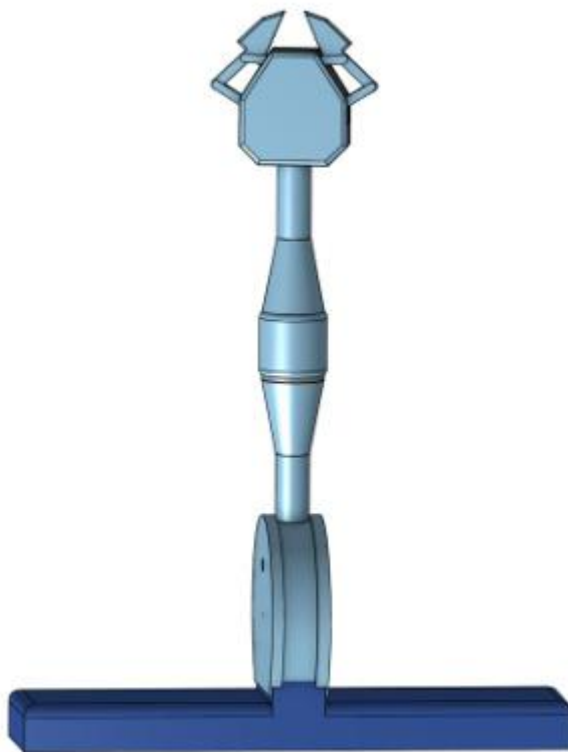


Рисунок 2.2.5 – Загальний вид ескізної 3D моделі маніпулятора зверху

Захоплення реалізовано у вигляді важільно-гвинтового механізму, здатного ефективно взаємодіяти з об'єктами неправильної форми. Робоча зона пристрою має складну сферичну геометрію, що дозволяє здійснювати маніпуляції як перед апаратом, так і в межах бокових секторів досяжності [16].

Технічні характеристики маніпулятора підводного апарата представлені в таблиці 2.2.4

Найменування параметра	Значення
Напруга постійного живлення, В	12

Споживча потужність, Вт	>70
Максимальна вантажопідйомність, кг	3
Габаритні розміри, мм	550x220x200
Маса, кг	6

Маса — 6 кг, що становить приблизно 17% маси апарата, забезпечуючи оптимальний баланс між вантажопідйомністю та стійкістю. Це дозволяє уникнути суттєвих зсувів центру мас або потреби у спеціальних баластних системах компенсації. Тим не менш, динаміка руху маніпулятора, особливо при зміні положення обертової ланки, створює змінний момент відносно центра апарата, що враховується при налаштуванні вертикального керування.

Маніпулятор живиться від джерела постійного струму напругою 12 В. Споживана електрична потужність — не перевищує 70 Вт, що забезпечує енергоефективність і просту інтеграцію у наявну систему живлення без необхідності у додаткових джерелах енергії.

З урахуванням цих параметрів, маніпулятор не лише зберігає функціональність і ефективність, а й забезпечує механічну та енергетичну сумісність із базовою платформою апарата «Бриз», не перевищуючи допустиме навантаження по масі та об'єму. Усі подальші розрахунки системи вертикального керування проводитимуться з урахуванням цього навантаження, як статичного (маса, габарити), так і динамічного (момент від рухомих частин) [18].

Кінематична структура маніпулятора та її вплив на стійкість апарата

На рисунку 2.2.5 подано узагальнену кінематичну схему маніпулятора, реалізованого за структурою $R - P - P$, яка відповідає технічному рішенню, передбаченому в конфігурації підводного апарата «Бриз». Така структура є однією з найпростіших і найпоширеніших у сфері маніпуляторної робототехніки для легких підводних роботів.

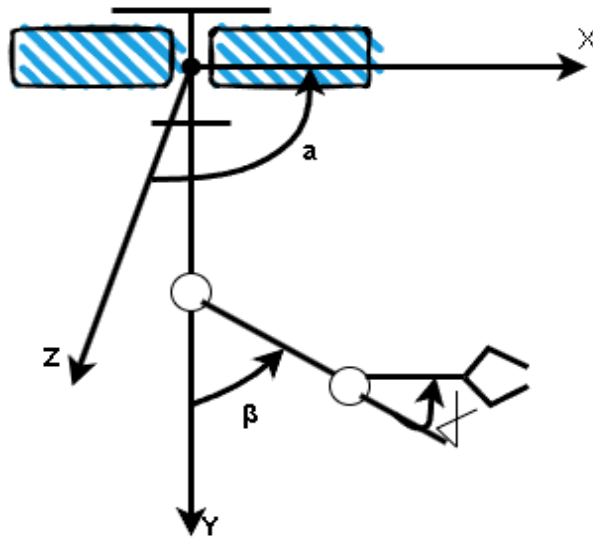


Рисунок 2.2.6 – Кінематична схема представленого маніпулятора

Схема передбачає наявність одного обертового з'єднання (типу R) у основі маніпулятора, яке забезпечує обертання всієї конструкції навколо вертикальної осі. Це дає змогу змінювати напрям робочої зони без переміщення корпусу апарата. Далі йдуть дві поступальні ланки (типу P), які забезпечують зміну довжини робочого плеча та переміщення захвату в радіальному напрямку. Наприкінці ланцюга розташовано важільний захват, який має можливість локального обертання навколо власної осі (але ця ступінь у кінематичну схему не включена, оскільки не є базовою з погляду позиціонування).

Така структура забезпечує плоске розгортання маніпулятора в одній площині (умовно X–Y) при стабільній вертикальній осі Z, що є важливою перевагою для інтеграції на борту невеликого апарата. Водночас, рух поступальних ланок призводить до динамічного зміщення центра мас, оскільки винос робочого захвату від осі обертання створює механічний момент відносно вертикальної осі [16].

З точки зору статички, при максимальному виносі ланки на довжину до 0.55 м і масі захватної частини (разом із виконавчими елементами) приблизно

2.5–3 кг, виникає момент сил, який діє на корпус апарата. Це викликає потенційний крен або нестабільність положення в вертикальній площині. Таким чином, система керування вертикальним рушієм повинна не лише забезпечувати компенсацію постійного навантаження (власна маса маніпулятора ~6 кг), але й динамічно реагувати на зміну його положення під час роботи.

З позиції інерції та центру маси робота маніпулятора призводить до того, що:

- 1) центр мас усього апарата зміщується від початкової геометричної осі;
- 2) розподіл навантаження по вертикальній осі (Z) стає неоднорідним;
- 3) необхідно перерозподілити керуючі сигнали до рушіїв (особливо вертикального) для збереження стабільності глибини та нахилу.

У підсумку, вибрана структура маніпулятора є логічною з огляду на простоту, компактність та ефективність, однак вимагає врахування додаткових моментів інерції та реактивних сил, які виникають при роботі ланок. Це зумовлює включення відповідних коефіцієнтів у подальші розрахунки вертикального рушія й системи компенсації.

На основі усіх перелічених характеристик підводний апарат «Бриз» розглядається як еталонна платформа, на якій буде змодельовано та протестовано нову систему керування вертикальним рухом. Усі конструктивні та функціональні рішення, що будуть розроблені надалі, мають враховувати специфіку не лише цього апарата, а й можливість масштабування до аналогічних моделей з близькими масово-габаритними параметрами.

2.3. Розрахунок необхідної тяги вертикального рушія

З метою забезпечення точного вертикального позиціонування підводного апарата з маніпулятором, необхідно визначити тягові характеристики вертикальних рушіїв. Розрахунок виконується з урахуванням гідростатичних, гідродинамічних і реактивних сил, що діють на апарат, а також моментів, спричинених роботою маніпулятора.

Підводний апарат "Бриз" має власну масу, що дорівнює 35 кг. Додатково до складу системи входить маніпулятор, маса якого складає 6 кг (відповідно до узгоджених конструктивних змін для узгодження з габаритами апарата).

Таким чином, повна маса системи:

$$m_{\text{система}} = 35 + 6 = 41 \text{ кг}$$

Ця величина буде використана для подальших розрахунків сили тяжіння.

Сила тяжіння, яка діє на систему у водному середовищі, обчислюється як добуток маси системи на прискорення вільного падіння $g = 9.81 \text{ м/с}^2$:

$$F_{\text{тяж}} = m \cdot g = 41 \cdot 9.81 = 402.21 \text{ Н}$$

Це вага, яку створює вся конструкція у воді, і яку необхідно або компенсувати, або врівноважити завдяки виштовхувальній силі.

Корпус апарата має габарити $0.85 \times 0.42 \times 0.35 \text{ м}$, що дає повний геометричний об'єм:

$$V_{\text{геометричний}} = 0.12495 \text{ м}^3$$

Проте через конструктивні особливості (порожнини, відкриті елементи, доступ води) реальний об'єм витісненої води буде меншим. Для розрахунку приймаємо ефективний об'єм:

$$V_{\text{ефективний}} = 0.040 \text{ м}^3$$

Тоді сила виштовхування розраховується за законом Архімеда:

$$F_{\text{Арх}} = \rho \cdot g \cdot V = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.040 = 392.4 \text{ Н}$$

Ця сила протидіє силі тяжіння і сприяє підтримці апарата на заданій глибині.

Різниця між силою тяжіння та силою Архімеда визначає ефективну вагу об'єкта у водному середовищі. Ця сила вказує, наскільки система тяжіє до занурення:

$$F_{\text{еф}} = F_{\text{тяж}} - F_{\text{арх}} = 402.21 - 392.4 = 9.81\text{Н}$$

Це значення близьке до нуля, що говорить про майже нейтральну плавучість. Це бажаний режим для підводного апарата, оскільки зменшує енергоспоживання та спрощує керування по глибині.

При русі у вертикальному напрямку апарат зустрічає опір води. Для оцінки гідродинамічного опору береться лобова проекція апарата (знизу/зверху), яка визначається як добуток ширини та довжини корпусу:

$$A = 0.42 \cdot 0.85 = 0.357\text{м}^2$$

Цільова швидкість вертикального руху визначена як:

$$v_z = 0.3\text{м/с}$$

Коефіцієнт лобового опору корпусу взято як:

$$C_d = 0.8$$

Сила опору:

$$F_{\text{опір}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v_z^2 = 0.5 \cdot 1000 \cdot 0.8 \cdot 0.357 \cdot 0.3^2 \approx 12.85\text{Н}$$

Цей опір необхідно долати при кожному русі вгору або вниз.

Маніпулятор, розгорнутий вперед, створює додатковий момент відносно центра мас. Якщо розглянути випадок захоплення об'єкта масою 3 кг на відстані 0.55 м від основи маніпулятора, отримаємо:

$$M = m \cdot g \cdot a = 3 \cdot 9.81 \cdot 0.55 = 16.2\text{Н} \cdot \text{м}$$

Щоб компенсувати цей момент, потрібно створити асиметрію у тязі двох вертикальних рушіїв. Якщо відстань між рушіями (передній і задній) становить 0.6 м, сила для компенсації моменту:

$$\Delta F = \frac{M}{d} = \frac{16.2}{0.6} = 27\text{Н}$$

Це означає, що задній рушій повинен збільшити тягу на 13.5 Н, а передній — зменшити її на таку ж величину.

Сумарна тяга, яку повинні створити обидва рушії разом:

$$F_{\text{всього}} = F_{\text{еф}} + F_{\text{опір}} = 9.81 + 12.85 = 22.66\text{Н}$$

Враховуючи змінні умови (течії, рухи маніпулятора, похибки керування), вводиться коефіцієнт запасу:

$$F_{\text{робоча}} = 22.66 \cdot 1.3 = 29.5\text{Н}$$

Номінальна тяга одного рушія:

$$F_1 = \frac{29.5}{2} = 14.75\text{Н}$$

Але в піковому режимі (з компенсацією моменту від маніпулятора) один рушій повинен забезпечити:

$$F_{\text{макс}} = 14.75 + 13.5 = 28.25\text{Н}$$

Кожен з двох вертикальних рушіїв повинен мати можливість створювати мінімум 30 Н тяги (≈ 3 кгс), щоб забезпечити:

- 1) нейтралізацію ваги у воді;
- 2) переміщення по осі глибини;
- 3) компенсацію моменту від маніпулятора;
- 4) стабілізацію в умовах зовнішніх збурень.

Проміжний підсумок визначення необхідної тяги вертикального рушія наведено у таблиці 2.3.1

Таблиця 2.3.1 Проміжний підсумок підрозділу 2.3

Параметр	Значення
Загальна маса апарата, кг	41
Сумарна сила тяжіння, Н	402.21
Архімедова сила, Н	392.4
Ефективна вага, Н	9.81

Гідроопір при русі, Н	12.85
Момент від маніпулятора, Н·м	16.2
Різниця тяги для компенсації, Н	27 (13.5 на рушій)
Робоча тяга на один рушій, Н	≈14.75
Максимальна тяга одного рушія з запасом, Н	≈28.25

2.4 Розрахунок необхідної потужності вертикального рушія

Після визначення необхідної тяги для одного вертикального рушія на попередньому етапі, наступним логічним кроком є встановлення вимог до потужності приводу, який здатен забезпечити цю тягу в умовах реального підводного середовища.

Потужність рушія — це ключовий енергетичний параметр, який визначає розміри, тип двигуна, електроживлення та систему управління. Визначення цього параметра дає змогу перейти від теоретичної моделі до конкретного конструктивного рішення.

Розрахунок механічної потужності

Механічна потужність визначається як добуток сили тяги, яку створює рушій, на швидкість переміщення в напрямку цієї сили. Цей підхід ґрунтується на класичному виразі потужності в механіці:

$$P = F \cdot v$$

де:

P — потужність (Вт),

F — сила тяги, яку створює рушій (Н),

v — лінійна швидкість руху у напрямку тяги (м/с).

Згідно з попередніми розрахунками, кожен вертикальний рушій повинен забезпечувати тягу до 30 Н (еквівалент приблизно 3 кгс) у піковому режимі — з урахуванням компенсації моменту від маніпулятора, гідродинамічного опору та запасу на змінні умови. Цільова швидкість вертикального руху апарата приймається як 0.3 м/с, що відповідає середнім значенням для легких підводних самохідних апаратів.

Підставляючи ці дані у формулу, отримаємо:

$$P = 30 \cdot 0.3 = 9.0 \text{ Вт}$$

Це значення відображає чисту механічну потужність, яка повинна бути передана рушієм воді для створення необхідної тяги.

Врахування коефіцієнта корисної дії

Однак у реальних умовах рушії мають далеко не 100% ефективність. Втрати виникають у самому двигуні (на тертя, нагрів), у гвинті (турбулентність, ковзання, кавітація), у підводних з'єднаннях та контролерах. Для підводних безколекторних двигунів із пропелером типовий коефіцієнт корисної дії (ККД) коливається в межах від 0.3 до 0.5.

З огляду на характерні умови, приймаємо ККД рушійної системи рівним 0.4. Це середнє, реалістичне значення, яке забезпечує резерв на непередбачувані втрати енергії.

Для отримання такої механічної потужності, реальна електрична потужність, яка повинна бути подана на двигун, розраховується за формулою:

$$P_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta} = \frac{9.0}{0.4} = 22.5 \text{ Вт}$$

Таким чином, електроживлення одного вертикального рушія має забезпечити не менше 22.5 Вт, щоб гарантувати досягнення тяги 30 Н при швидкості 0.3 м/с.

Визначення електричних параметрів живлення

Переважає більшість сучасних підводних ROV використовує двигуни з постійним струмом (BLDC або DC), які працюють від стабілізованих джерел напруги 12 В або 16 В. З урахуванням обчисленої потужності, можна визначити електричний струм, який буде споживатися одним рушієм при цих рівнях напруги:

1. При 12 В:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{22.5}{12} = 1.875 \text{ A}$$

2. При 16 В:

$$I = \frac{22.5}{16} = 1.41 \text{ A}$$

Отримані значення – це середнє робоче навантаження, без урахування стартових імпульсів або форсованих режимів. З практичного погляду, ці значення є досить скромними і легко підтримуються більшістю малогабаритних контролерів для BLDC двигунів, включаючи популярні серії, що застосовуються у морських дронах.

Технічні рекомендації до вибору рушія

Отримані результати дозволяють сформулювати технічне завдання до рушія, який буде встановлений у вертикальній конфігурації.

Рекомендовані характеристики, що має забезпечувати рушій наведено у таблиці 2.4.1

Таблиця 2.4.1 – Характеристики відповідного рушія

Параметр	Значення
Тяга, Н	30
Механічна потужність, Вт	9
Електрична потужність, Вт	22.5
Робочий струм, А	2

Живлення, В	12–16
Бажаний ККД, %	від 40 і вище

У результаті детального розрахунку встановлено, що кожен вертикальний рушій повинен споживати до 22.5 Вт електричної потужності, щоб забезпечити необхідну тягу на рівні 30 Н при вертикальній швидкості 0.3 м/с. Рушій має бути побудований на основі ефективного електродвигуна (BLDC або DC), здатного працювати в умовах повного занурення, із низьким струмовим навантаженням і оптимізованою геометрією гвинта для досягнення прийнятного ККД.

2.5 Вибір електродвигуна для вертикального рушійного пристрою

В рамках етапу проектування вертикального рушійного пристрою підводного апарата необхідно обрати електродвигун, який відповідатиме розрахованим параметрам і водночас буде придатним для експлуатації в агресивному водному середовищі. Двигун повинен забезпечувати надійну тягу, мати високу ефективність, бути сумісним з електронною системою керування та мати допустимі габарити для інтеграції в корпус.

Для реалізації вертикального рушійного пристрою підводного апарата було обрано безколекторний підводний електродвигун M200 Motor, який розроблений спеціально для застосування в морському середовищі. Цей двигун має унікальну конструкцію, що дозволяє йому працювати без додаткової герметизації, завдяки повній водостійкості та стійкості до тиску.

Конструктивні особливості

На відміну від традиційних рішень, де двигун із повітряним або масляним заповненням ізолюється від води, у даному варіанті реалізовано інтегрований підхід: двигун сам по собі є водонепроникним, з одною єдиною

рухомою частиною — ротором. Це дозволяє зменшити кількість компонентів, підвищити надійність та знизити вартість.

У конструкції є

- 1) статор (рис. 2.5.1) з мідними обмотками зафіксований у пластиковому литому корпусі, що має високу електроізоляцію;

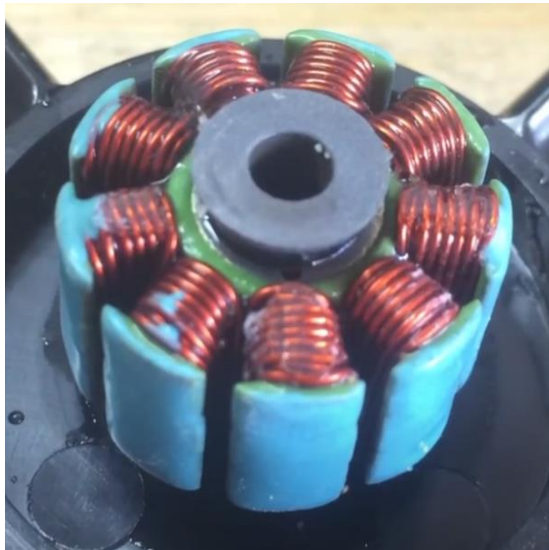


Рисунок 2.5.1 – Статор двигуна M200 Motor

- 2) ротор – з неодимовими постійними магнітами (рис 2.5.2) , вкритими багат шаровим антикорозійним захистом;



Рисунок 2.5.2 – Ротор двигуна M200 Motor

- 3) вал двигуна (рис 2.5.3) виготовлений з нержавіючої сталі класу 316, стійкої до морської води;



Рисунок 2.5.3 – Вал двигуна M200 Motor

- 4) замість традиційних кулькових підшипників використовуються пластикові втулки (рис. 2.5.4), що змащуються водою.



Рисунок 2.5.4 – Пластикові втулки двигуна M200 Motor

Цей двигун працює за принципом трифазного безколекторного електродвигуна постійного струму (BLDC), де обертальний момент створюється в результаті електромагнітної взаємодії між статором з обмотками та ротором із постійними магнітами. Усередині корпусу розміщується статор, який містить мідні обмотки, залиті в електроізоляційний компаунд. Ці обмотки поперемінно активуються спеціальним електронним контролером, який послідовно комутує фази струму, створюючи обертове магнітне поле.

Ротор, у свою чергу, містить неодимові постійні магніти, розташовані по колу у феромагнітному кільці. Це магнітне поле ротора прагне слідувати за обертовим полем статора, завдяки чому виникає крутний момент, що обертає вал двигуна. Вал жорстко з'єднаний із пропелером, тому обертання ротора безпосередньо створює тягу у воді.

Особливістю цього двигуна є те, що він повністю відкритий до води — він не захищений корпусом або герметичним бар'єром, як у класичних рішеннях. Замість цього, його конструкція спеціально адаптована до роботи в умовах повного занурення. Всі матеріали, включно з обмотками, магнітами, корпусом і валом, мають антикорозійне покриття, а підшипники замінені на пластикові втулки, які змащуються самою водою під час роботи. Таким чином, вода відіграє не лише роль зовнішнього середовища, а й функціональний елемент — охолоджує двигун, зменшує тертя та виводить тепло.

Управління обертами здійснюється за допомогою електронного швидкісного контролера (ESC), який приймає керуючі сигнали з комп'ютера або мікроконтролера у вигляді широтно-імпульсної модуляції (PWM). Зміна частоти чи тривалості імпульсів дозволяє змінювати швидкість обертання ротора, а отже — і величину створюваної тяги. Реверс обертання також реалізується на рівні електронного керування, без зміни фізичних з'єднань.

Завдяки високій точності керування, швидкій реакції та простоті інтеграції, двигун забезпечує надійну стабілізацію положення підводного апарата в умовах змінного середовища.

Технічні характеристики двигуна M200 Motor наведені у таблиці 2.5.1
Таблиця 2.5.1 – Загальні технічні характеристики двигуна M200 Motor

Параметр	Значення
Тип	трифазний BLDC підводний двигун
Живлення, В	7–20
Номінальна напруга, В	16

Максимальний струм при 12,16,20 В, А	17 , 24 , 32
Максимальна потужність при 12,16,20 В, Вт	205, 390, 645
Максимальна тяга, Н	5.25 кгс (≈ 51.5)
Габарити корпусу, мм	Довжина – 73.6; діаметр – 40
Вага в повітрі / у воді, г	282 / 217
Матеріали, що контактують з водою	Полікарбонат, епоксид, неіржавна сталь, пластик, поліуретан
Кабель	BR-100997, довжина 1 м (стандарт), переріз 16 AWG
Максимальна глибина занурення, м	300

Відповідність розрахунковим вимогам

Порівняння розрахункових параметрів із технічними характеристиками двигуна підтверджує його повну відповідність, що наведено у таблиці 2.5.2

Таблиця 2.5.2 – Відповідність розрахункових параметрів до характеристик двигуна M200 Motor

Критерій	Розрахункове значення	M200 Motor	Відповідність
Максимальна тяга, Н	≥ 30	51.5	✓
Механічна потужність, Вт	≈ 9	до 390	✓
Електрична потужність, Вт	до 22.5	до 390	✓
Робоча напруга, В	12–16	7–20	✓
Максимальна глибина занурення, м	не менше 50–100 м	300	✓
Габарити довжина, мм	≤ 120	73.6	✓

Діаметр для інтеграції, мм	≤ 100	40	✓
Маса в середовищі (воді), г	≤ 250	217	✓
Корозійна стійкість	обов'язкова	Полікарбонат, епоксид, неіржавна сталь, пластик, поліуретан	✓
Пусковий момент, Н·м	≥ 0.3 (орієнтовно)	0.5	✓
Герметизація/проста інтеграція	Бажано без зовнішньої герметизації	реалізована конструктивно	✓

Двигун M200 Motor цілком відповідає технічним та конструктивним вимогам для застосування в системі вертикального позиціонування підводного апарата. Його використання дозволяє не тільки реалізувати потрібну тягу з запасом, а й забезпечити довготривалу роботу в умовах повного занурення.

На основі його габаритних, електромеханічних та монтажних характеристик буде побудована 3D-модель корпусу вертикального рушійного пристрою, а також проведено розрахунок особливостей конструкції з урахуванням вимог до монтажу, герметизації та розміщення всередині підводного апарата.

2.6 Розрахунок розміщення та фіксації двигуна у середині корпусу рушія

Мета: визначити розміри сердечника — основного блоку, що утримує статор двигуна, забезпечує теплообмін, герметизацію кабелю та з'єднання з іншими частинами конструкції.

Початкові дані:

- 1) Діаметр двигуна: 40 мм.
- 2) Довжина двигуна: 73.6 мм.
- 3) Кабель входить ззаду, через носовий конус (буде розглянутий окремо).

Конструктивне рішення:

Сердечник виконується як циліндричний блок, у якому монтується двигун. Його довжина має включати не лише сам двигун, а й 10–15 мм запасу на внутрішні фланці кріплення та кабельний вхід.

Розрахунок довжини сердечника:

$$L_{\text{сердечник}} = L_{\text{двигуна}} + L_{\text{зазори}} = 73.6 \text{ мм} + 15 \text{ мм} = 88.6 \text{ мм} \approx 90 \text{ мм}$$

Відповідь: Довжина сердечника ≈ 90 мм.

Розрахунок зовнішнього діаметра:

З урахуванням того, що двигун має $\varnothing 40$ мм і потрібен тепловий зазор + місце для вставних втулок/амортизаторів:

$$D_{\text{сердечник}} = D_{\text{двигуна}} + 4\text{--}6 \text{ мм} = 40 + 6 = 46 \text{ мм}$$

Відповідь: Зовнішній діаметр сердечника ≈ 46 мм

2.7 Розрахунок сопла як обтічника для забезпечення протитоку

Мета: створити гідродинамічний кожух, який охоплює пропелер і сприяє підвищенню тяги за рахунок концентрації потоку.

Діаметр сопла:

Пропелер має діаметр 76 мм, отже сопло має бути щонайменше на 10–12% ширше:

$$D_{\text{сопла}} = 76\text{мм} \cdot 1.1 = 83.6\text{мм} \approx 84\text{мм}$$

Відповідь: Внутрішній діаметр сопла ≈ 84 мм

Довжина сопла:

Беремо за основу 1.2–1.4 діаметра пропелера:

$$L_{\text{сопла}} = 76\text{мм} \cdot 1.3 \approx 99\text{мм}$$

Відповідь: Довжина сопла ≈ 100 мм

2.8 Розрахунки лінійної швидкості на кінці лопаті, кроку гвинта та куту його нахилу, а також оцінка коефіцієнтів гвинта

Тепер детально розрахуємо параметри гвинта (пропелера) для вертикального рушійного пристрою, використовуючи дані про двигун M200, попередні розрахунки тяги, габарити корпусу апарата та вимоги до вертикального стабілізованого руху. Пропелер є ключовим елементом, який перетворює крутний момент двигуна в осьову силу тяги.

Вихідні умови для розрахунку представлені в таблиці 2.8.1

Таблиця 2.8.1 – вихідні параметри та значення для розрахунку гвинта

Параметр	Значення
Необхідна тяга на один рушій	$30\text{ Н} / 2 = 15\text{ Н}$
Робоча напруга	16 В (номінальна)
Потужність на один двигун	390 Вт
Оберти ($K_v = 470$, при 16 В)	$470 \times 16 = 7520$ об/хв
Швидкість потоку (залежить від обертів і діаметра пропелера)	~ розраховується нижче
Середовище	Вода, температура $\sim 10\text{--}15^\circ\text{C}$

Діаметр пропелера (заздалегідь визначений в М200)	76 мм = 0.076 м
---	-----------------

Розрахунок лінійної швидкості на кінці лопаті

Оскільки маємо діаметр пропелера 76 мм:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{0.076}{2} = 0.038 \text{ м}$$

Оберти на валу:

$$n = 7520 \text{ об/хв} = \frac{7520}{60} = 125.33 \text{ об/с}$$

Швидкість кінця лопаті (лінійна):

$$V_{\text{кінцева}} = 2\pi r n = 2\pi \cdot 0.038 \cdot 125.33 \approx \frac{29.9 \text{ м}}{\text{с}}$$

Оцінка коефіцієнтів гвинта

Значення тяги, яке має забезпечити гвинт:

$$T = 15 \text{ Н}$$

Загальне рівняння для тяги пропелера в рідині (спрощена модель):

$$T = C_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

де:

- a. C_T — коефіцієнт тяги;
- b. ρ — густина води $\approx 1000 \text{ кг/м}^3$;
- c. n — об/с = 125.33;
- d. D — діаметр пропелера = 0.076 м.

Обернено розрахуємо C_T :

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

$$C_T = \frac{15}{1000 \cdot (125.33)^2 \cdot (0.076)^4}$$

$$C_T \approx \frac{15}{1000 \cdot 15714.7 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6}} \approx \frac{15}{52.3} \approx 0.287$$

Коефіцієнт тяги $C_T \approx 0.29$ – цілком типовий для гвинтів з високою ефективністю у воді.

Розрахунок кроку гвинта (Pitch)

Для підводних апаратів характерні відносно великі кути атаки та високий крутний момент при малому кроку.

Використаємо співвідношення:

$$\text{Pitch} = V_{\text{теоретична}} \cdot \frac{60}{n}$$

Якщо нам потрібно, щоб потік води забезпечував вертикальне переміщення зі швидкістю, наприклад, 0.5 м/с, тоді:

$$\text{Pitch} = 0.5 \cdot \frac{60}{125.33} \approx 0.24 \text{ м} = 240 \text{ мм}$$

Отже, теоретичний крок гвинта ≈ 240 мм, що співвідноситься з діаметром 76 мм як:

$$\frac{\text{Pitch}}{D} = \frac{240}{76} \approx 3.15$$

Це відносно високий показник, характерний для вертикального гвинта, який має створити велику тягу при малій швидкості переміщення.

У ході виконання проєктно-розрахункової частини було визначено орієнтовні параметри вертикального пропелера, який використовуватиметься в складі рушійного пристрою підводного апарата. Ці характеристики підібрано таким чином, щоб забезпечити ефективну тягу та при цьому не перевищити технічні обмеження обраного двигуна типу M200.

Діаметр гвинта становить 76 міліметрів — це значення обумовлено компромісом між компактністю конструкції та достатньою площею лопатей для створення необхідного об'єму потоку. Кількість лопатей орієнтовно становить три або чотири, що вважається оптимальним варіантом з погляду балансування тяги та зниження гідродинамічного опору. Геометричний крок лопаті визначено на рівні приблизно 240 міліметрів, що дозволяє досягати високої ефективності на низьких обертах, характерних для підводної навігації.

Швидкість на кінці лопаті оцінено приблизно у 30 метрів за секунду, що відповідає номінальному режиму роботи двигуна і не створює ризику кавітації. Попередні розрахунки показали, що коефіцієнт тяги становить близько 0.29, що є типовим значенням для гвинтів подібного типу. За цих умов орієнтовна сила тяги становить 15 ньютонів, чого достатньо для виконання поставленого завдання щодо вертикального позиціонування апарата.

Таким чином, визначені параметри пропелера є обґрунтованими і можуть бути використані для подальшого тривимірного моделювання.

Розрахунок кута нахилу гвинта

Щоб оцінити кут нахилу лопаті гвинта (кут гвинтової лінії), скористаємося співвідношенням між кроком гвинта, радіусом та кутом нахилу:

$$\tan\theta = \frac{\text{Pitch}}{2\pi r}$$

де:

- a. θ – кут нахилу лопаті (в радіанах або градусах),
- b. Pitch – крок гвинта ($\approx 240 \text{ мм} = 0.24 \text{ м}$),
- c. r – радіус гвинта (діаметр / 2) = $0.076 / 2 = 0.038 \text{ м}$.

Підставимо значення:

$$\tan\theta = \frac{0.24}{2\pi \cdot 0.038} \approx \frac{0.24}{0.2387} \approx 1.006$$

$$\theta \approx \arctan(1.006) \approx 45.1^\circ$$

Відповідь: Кут нахилу лопаті гвинта $\approx 45^\circ$.

Це типовий кут для пропелерів, що працюють у вертикальній тязі — він забезпечує високу тягу на низькій швидкості руху та оптимальний компроміс між підйомною силою та навантаженням на двигун.

2.9 Розрахунок геометрії центрального конуса (всередині сопла)

Вихідні умови:

- 1) Пропелер: $\varnothing 76$ мм $\rightarrow$ радіус $r=38$ мм
- 2) Сопло: внутрішній діаметр ≈ 84 мм
- 3) Довжина сопла: ≈ 100 мм
- 4) Вісь пропелера проходить через центр сопла

Мета — задати обтічну форму конуса, який не буде перекривати лопаті, буде мати компактну геометрію та не заважати проходженню потоку.

Визначення максимальної довжини конуса

Конус має розміщуватись перед гвинтом, на одній осі з ним, але не повинен перекривати зону активної тяги лопатей (близько 70–80% від довжини сопла).

$$L_{\text{конус}} = 0.6 \cdot L_{\text{сопла}} \approx 0.6 \cdot 100 = 60 \text{ мм}$$

Визначення радіуса основи конуса

Базовий радіус не повинен перевищувати 60–65% від радіуса пропелера, щоби не перешкоджати роботі центральних лопатей.

$$R_{\text{осн}} = 0.6 \cdot 38 \text{ мм} \approx 23 \text{ мм}$$

Висота конуса та кут нахилу поверхні

Кут нахилу розраховується як:

$$\tan(\theta) = \frac{R_{\text{осн}}}{L_{\text{конус}}} = \frac{23}{60} \approx 0.383 \Rightarrow \theta \approx \arctan(0.383) \approx 21^\circ$$

Підсумкові параметри центрального конуса наведені в таблиці 2.9.1

Таблиця 2.9.1 – Загальні параметри центрального конуса

Параметр	Значення
Довжина конуса	≈ 60 мм
Радіус основи	≈ 23 мм
Кут нахилу поверхні	$\approx 21^\circ$
Тип профілю	прямий круговий конус
Розміщення	перед пропелером, уздовж осі в середині сопла

Іноді замість класичного конуса використовують сферичний або параболоїдний обтічник, але в данному випадку цілком підійде прямий круговий конус, бо він простіше у виробництві та легко інтегрується у 3D-модель.

2.10 Графічна побудова спіральної поверхні гвинта за допомогою Matlab кодування

У цьому підрозділі здійснено побудову просторової моделі лопаті вертикального рушійного пристрою на основі розрахованих геометричних параметрів. Такий підхід дозволяє не лише візуалізувати результати інженерних обчислень, а й сформуванати наочну вихідну основу для подальшого 3D-моделювання, виробництва або чисельного аналізу у середовищах CAD чи CFD.

Після виконаних у попередньому розділі розрахунків кута нахилу гвинта, радіуса, товщини та кроку, було визначено, що для забезпечення тяги, необхідної для компенсації моменту від дії маніпулятора, лопать повинна мати кут нахилу близько 45.1° , радіус 38 мм, товщину 10 мм та крок обертання 240 мм. Ці параметри стали основою для формування спіральної поверхні, яку збудовано у середовищі MATLAB за допомогою відповідної параметризації.

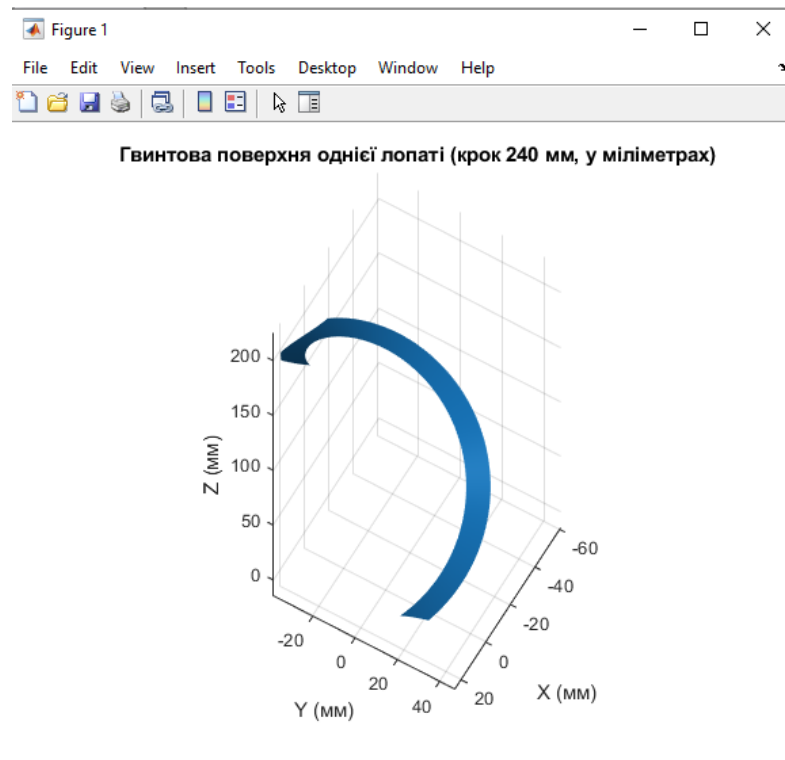


Рисунок 2.10.1 – Тривімірне зображення руху однієї лопаті з Matlab вид збоку

Побудова лопаті здійснювалася відповідно до параметричних рівнянь гвинтової лінії з поступовим підйомом, що дозволяє моделювати реальний профіль лопаті при заданому куті підйому. Координати точок поверхні обчислювались за формулами:

$$\begin{cases} x(\theta) = r \cdot \cos(\theta) \\ y(\theta) = r \cdot \sin(\theta) \\ z(\theta) = \frac{h}{2\pi} \cdot \theta \end{cases}$$

де:

- a. r – радіус відповідної межі лопаті (внутрішній або зовнішній);
- b. h – крок гвинта, тобто висота за один оберт;
- c. $\theta \in [0, 2\pi]$ – параметр, що описує кут повного обертання;
- d. z – вертикальне переміщення по осі обертання.

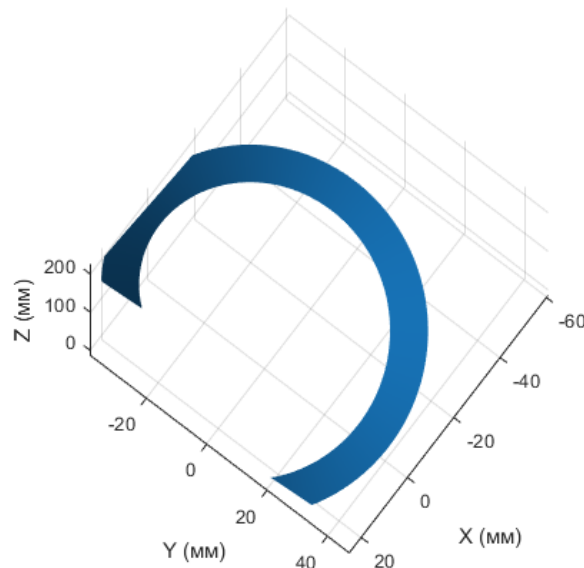


Рисунок 2.10.2 – Тривимірне зображення з Matlab вид зверху

Результатом є тривимірне зображення однієї лопаті пропелера у прямокутній системі координат. Зображення дозволяє наочно перевірити відповідність геометрії заданим розрахункам, оцінити пропорції, кривину та можливу взаємодію з іншими елементами конструкції. Побудова також слугує етапом підготовки до створення 3D-моделі у CAD-середовищах, де на її основі буде змодельовано повну структуру гвинта та сопла.

Окрім цього, візуалізація дозволяє оцінити фізичну реалізованість обраної конструкції, виявити потенційні зони гідродинамічного опору, а також надалі використовувати поверхню як вихідну форму для експорту у форматі STL або для інтеграції у моделі аерогідродинамічного аналізу. З огляду на те, що пропелер підводного рушія є одним із ключових елементів стабілізації

глибини апарата, точність геометричної побудови набуває критичного значення для роботи автоматизованої системи керування.

Таким чином, побудована спіральна лопать не є лише ілюстративним матеріалом, а й функціональним аналітичним компонентом у структурі всього проєкту.

Зважаючи на результати попередніх розрахунків моменту, що виникає від дії маніпулятора, та необхідності досягнення стабільного вертикального руху, конструктивне рішення передбачає застосування трьох лопатей у складі вертикального рушія. Така конфігурація забезпечує рівномірний розподіл гідродинамічних навантажень, зменшує вібрацію та підвищує ефективність генерації тяги.

У зв'язку з цим, побудова моделі однієї лопаті є лише проміжним етапом. Остаточна модель гвинта має складатися з трьох симетрично розташованих лопатей, зміщених на 120° одна від одної. Це дає змогу повністю сформувати об'ємну геометрію пропелера, яка буде використана в 3D-моделюванні вертикального рушія.

Побудова моделі гвинта з трьома лопатями

Для відтворення геометрії вертикального рушійного пристрою було реалізовано графічну побудову тривимірної спіральної поверхні у середовищі MATLAB. На основі інженерних розрахунків встановлено, що для забезпечення стійкого вертикального руху підводного апарата з маніпулятором доцільним є використання пропелера з трьома лопатями, які рівномірно розміщуються під кутами 0° , 120° та 240° відносно осі обертання. Така симетрія дозволяє мінімізувати вібрації, зменшити крутний момент на корпус, а також забезпечити більш стабільну тягу у вертикальній площині.

Лопаті мають визначену товщину $t=10\text{мм}$, що додається до радіуса в обидва боки для побудови двох гвинтових кривих — внутрішньої та зовнішньої межі кожної лопаті. Таким чином формується площа товщини лопаті, яку потім екструдують по висоті.

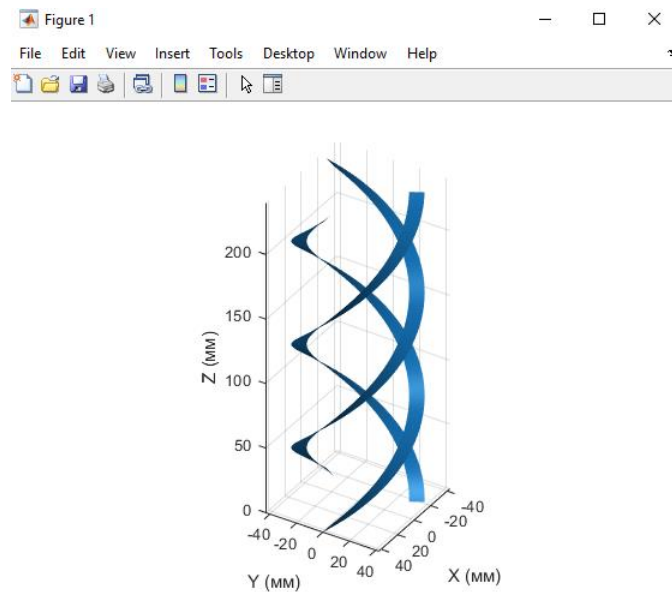


Рисунок 2.10.3 – Тривімірне зображення повного кроку пропелера з трьома лопатями з Matlab вид збоку

Для формування повної геометрії пропелера, кожна з трьох лопатей генерується обертанням основної геометрії на відповідний кут навколо осі Z. Обертання реалізується через обертальні матриці в MATLAB. Кожна лопать має однакові параметри, що відповідає умові симетрії та рівномірності навантаження.

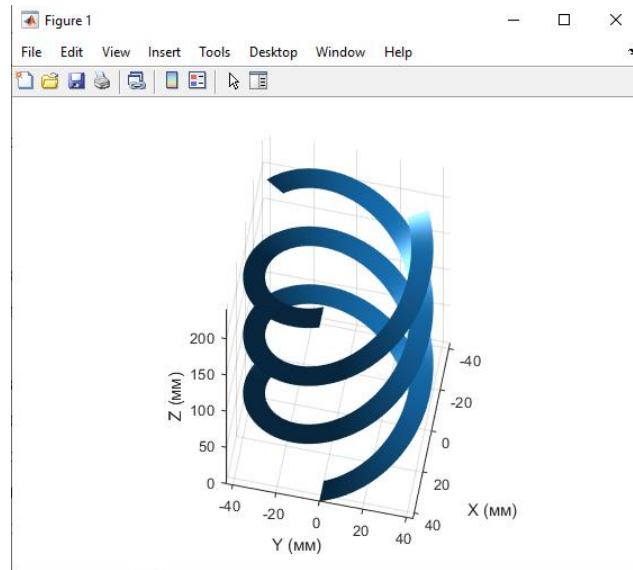


Рисунок 2.10.4 – Тривимірне зображення повного кроку пропелера з трьома лопатями з Matlab вид зверху

Отриману тривимірну модель було візуалізовано в середовищі MATLAB за допомогою функції `surf`. Кольорова палітра, освітлення та параметри камери було налаштовано для кращого сприйняття форми лопатей. В результаті отримано реалістичне представлення повної геометрії гвинта, що дозволяє використати її в подальшому як ескіз для побудови 3D-моделі в CAD-системі та для порівняння аерогідродинамічних параметрів.

2.11. Проектування структури системи керування вертикальним рушійним пристроєм

У попередніх підрозділах було проведено обґрунтовані розрахунки для побудови 3D-моделі вертикального рушійного пристрою, зокрема визначено оптимальні параметри гвинта, двигуна та конструктивних елементів. Наступним кроком є розробка системи керування цим рушієм, яка забезпечить точне регулювання його роботи відповідно до умов зовнішнього середовища та поставлених завдань.

Керування вертикальним рушієм вимагає точного дозування обертів двигуна, що досягається за допомогою електронного регулятора швидкості

(ESC). Цей компонент є центральною ланкою між джерелом живлення, мікроконтролером та самим двигуном. Саме ESC перетворює керуючі сигнали з контролера у змінний струм потрібної частоти та фази для обертання ротора безщіткового двигуна.

Розгляд системи керування доцільно розпочати саме з вибору та опису електронного регулятора швидкості типу Basic ESC, який повністю сумісний з обраним двигуном M200 і забезпечує стабільну роботу в умовах занурення.

Для реалізації ефективного керування обертами обраного безщіткового двигуна моделі M200 було прийнято рішення використати Basic ESC (Electronic Speed Controller) від компанії Blue Robotics. Даний регулятор розроблений спеціально для роботи з підводними двигунами у важких умовах занурення, має високу сумісність з водонепроникними безщітковими моторами та забезпечує точне керування у режимах прямого та зворотного обертання.

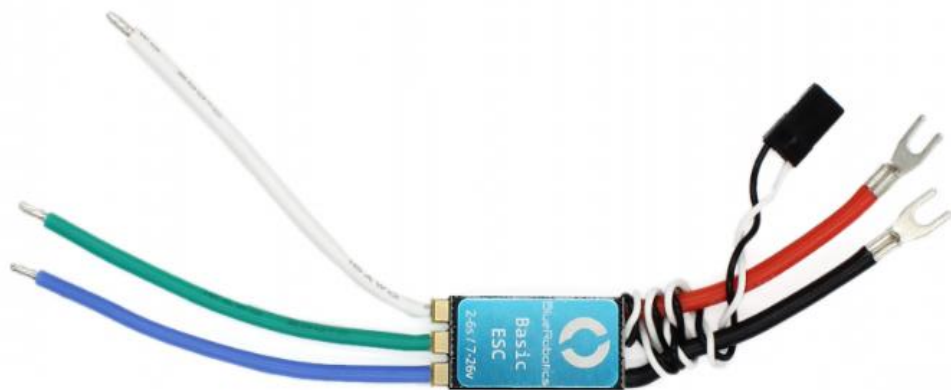


Рисунок 2.11.1 – Простий двонаправлений електронний регулятор швидкості

Основними причинами вибору саме цього ESC є його компактність, стабільність роботи, підтримка широкого діапазону вхідної напруги (7–20 В) та повна сумісність із керуючим сигналом PWM (широтно-імпульсна модуляція), що є стандартом у системах автоматизованого керування. Окрім

того, Basic ESC має герметичний корпус та перевірену на практиці надійність у багатьох підводних проєктах.

Таблиця 2.11.1 – Технічні характеристики Basic ESC

Параметр	Значення
Підтримуваний двигун	M200 motor
Робоча напруга, В	7–20
Максимальний струм, а	до 30 (у піковому режимі)
Сигнал керування, мкс	PWM (1000–2000)
Режими обертання	двостороннє (Forward/Reverse)
Габарити, мм	45×25×10
Маса, г	20
Інтерфейс підключення	три виходи до фаз двигуна, два входи живлення (плюс/мінус), один вхід керуючого сигналу PWM.

Також важливо зазначити, що Basic ESC не потребує активного охолодження при роботі у водному середовищі, оскільки сама вода забезпечує природне охолодження компонента. Це дозволяє уникнути перегріву та підвищує надійність роботи системи в довготривалому режимі.

Завдяки своїй простоті та універсальності, Basic ESC ідеально підходить для побудови базової системи керування вертикальним рушієм, а в разі необхідності розширення системи — легко масштабується до роботи з кількома рушіями.

Після підключення кожного безщіткового двигуна M200 до окремого Basic ESC, виникає потреба в централізованому елементі керування, який формуватиме сигнали керування на основі обчислень та сенсорних даних. Саме цю функцію виконує контролер польоту (або навігаційний контролер).

У контексті проектування системи керування для підводного апарата з маніпулятором та вертикальними рушійми, контролер має вирішувати такі завдання:

- 1) Приймати сигнали з сенсорів (IMU, глибиномір, компас, гіроскоп);
- 2) Обробляти ці сигнали відповідно до закладеного алгоритму стабілізації (наприклад, PID-регулювання);
- 3) Формувати відповідні PWM-сигнали керування для ESC, що, своєю чергою, керують швидкістю обертання рушіїв;
- 4) Забезпечувати двосторонній зв'язок з наземною станцією (через інтерфейси Ethernet, RS485, UART або USB).

Для таких цілей підходять спеціалізовані контролери, які підтримують прошивки типу ArduSub або BlueOS, що розроблені саме для керування підводними апаратами.

Тому наступним логічним етапом є розгляд контролера, сумісного з ArduSub – наприклад, Pixhawk, як одного з найпоширеніших і перевірених варіантів для керування безпілотними системами, включно з підводними.

Pixhawk — це відкритий, модульний та високопродуктивний контролер польоту, який спочатку був створений для безпілотних літальних апаратів, але сьогодні активно застосовується також у підводних автономних та прив'язних апаратах, завдяки сумісності з прошивкою ArduSub (розробленою спеціально для дистанційно керованих підводних апаратів).

Pixhawk виконує функції центрального обчислювального вузла, обробляє сигнали від датчиків, розраховує алгоритми стабілізації, глибинного контролю та передає керуючі сигнали на ESC, які вже напрямую керують моторами.

Таблиця 2.11.2 – Технічні характеристики Pixhawk (версія 2.4.8)

Параметр	Значення
Процесор	32-бітний ARM Cortex M4 з FPU (STM32F427, 168 МГц, 256 КБ SRAM, 2 МБ Flash)
Інтерфейси	UART, I2C, CAN, USB, PWM (8-16 каналів), SPI, ADC
Живлення	5 В (через модуль живлення або USB), підтримка резервного живлення
Розміри	81.5 x 50 x 15.5 мм
Маса	~38 г
Операційна система	NuttX (реального часу)
Прошивка	ArduSub, PX4 або інші
Сумісність	ArduPilot, QGroundControl, BlueOS
Датчики на борту	Акселерометр, гіроскоп, магнітометр, барометр
Розширення	Підключення зовнішніх сенсорів: глибиноміри, GPS, компаси, лідари, IMU, камери тощо

У центрі системи розміщено контролер Pixhawk, який виконує функції обробки вхідних даних від сенсорів та формування керуючих сигналів до виконавчих елементів. Його робота координується з постом керування, розташованим на борту судна-носія або на поверхні, який передає команди та отримує телеметричну інформацію в реальному часі через кабельний канал або бездротове з'єднання.

Pixhawk зчитує дані від блоку сенсорів, до якого можуть входити глибиноміри, акселерометри, гіроскопи, магнітометри, а також датчики температури чи тиску. Ці дані використовуються для визначення просторового положення апарата, оцінки глибини занурення та інших важливих параметрів середовища.

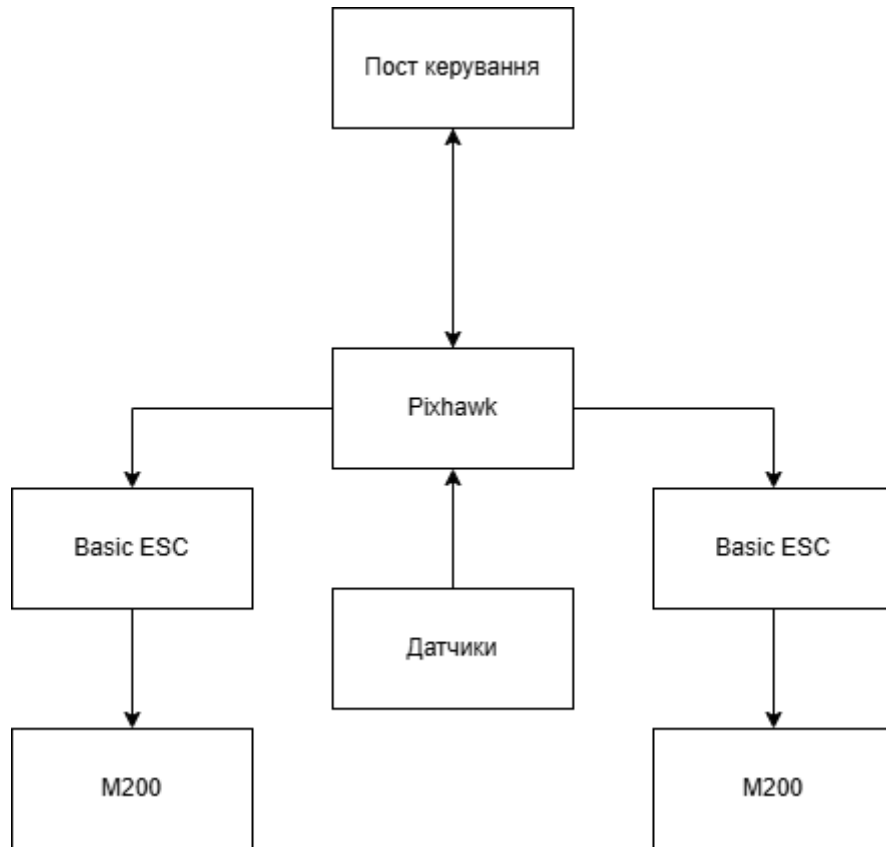


Рисунок 2.11.2 – Функціональна схема структури автоматизованої системи керування вертикальним рушійним пристроєм підводного апарата

На основі отриманих показників, Pixhawk генерує PWM-сигнали, які надсилаються на два окремі модулі керування двигунами — Basic ESC. Кожен із цих модулів відповідає за живлення та управління своїм безщітковим двигуном типу M200, що встановлені у вертикальній конфігурації — один у передній, інший у задній частині корпусу.

Таким чином, система забезпечує точне вертикальне позиціонування апарата, завдяки симетричному впливу обох рушіїв. Синхронізація їхньої роботи гарантує стабільність положення навіть за умов зовнішніх збурень або при виконанні складних маніпуляцій у воді.

Електрично-принципова схема автоматизованої системи керування

На рисунку 2.11.3 представлена електрично-принципова схема інтеграції всіх ключових елементів вертикального рушійного пристрою підводного апарата. Вона ілюструє логіку з'єднання блоку живлення,

електронних регуляторів швидкості (ESC), керуючого контролера Pixhawk та виконавчих елементів — двигунів типу M200. Така структура дозволяє забезпечити точне керування вертикальним положенням апарата завдяки незалежному управлінню двома рушіями.

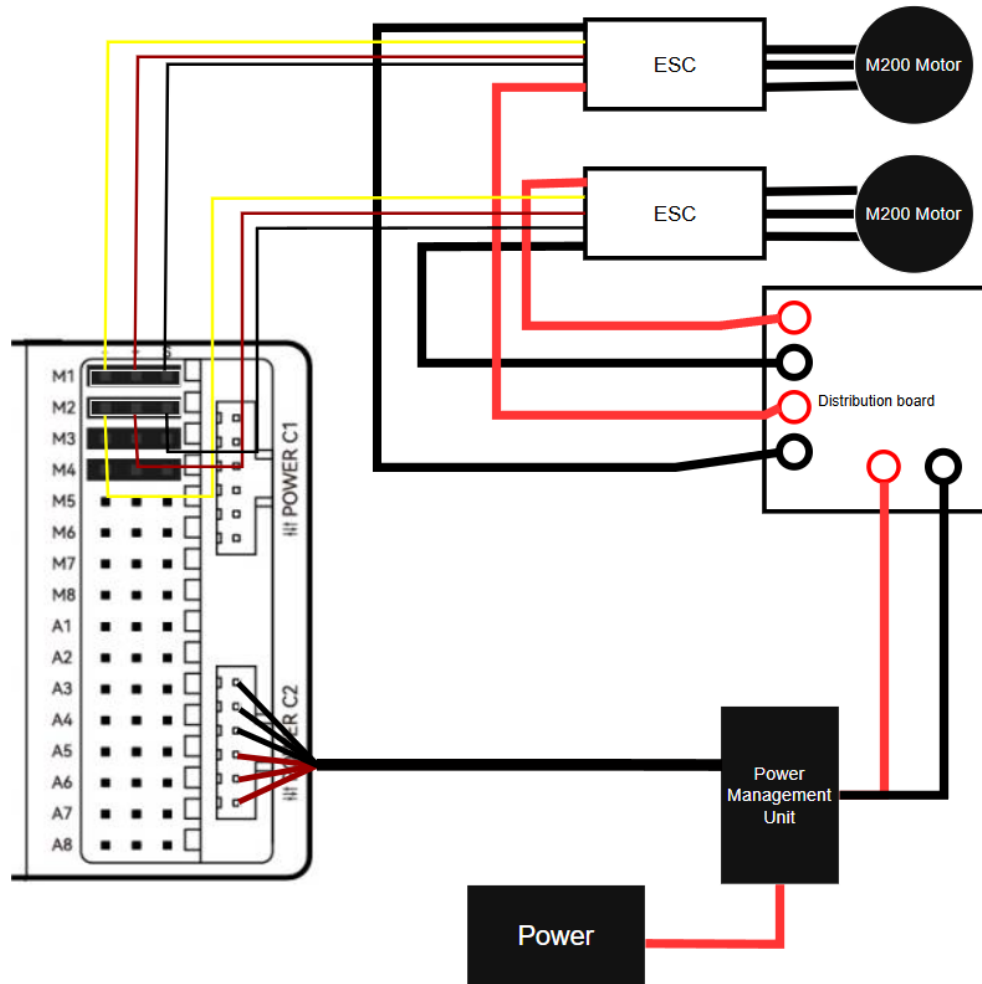


Рисунок 2.11.3 Електрично принципова схема автоматизованої системи керування

Power (джерело живлення)

Джерело живлення системи є початковою ланкою всієї енергетичної структури апарата. Він постачає живлення як для силових компонентів — електродвигунів та ESC, так і для системи керування через стабілізаційний блок. Забезпечення надійного і стабільного джерела живлення є критично важливим для стабільного функціонування всієї автоматизованої системи під час роботи в складному підводному середовищі.

Power Management Unit (PMU)

Цей модуль виконує роль посередника між акумулятором та всією системою керування. Його основна функція — це стабілізація напруги для Pixhawk, а також моніторинг електричних параметрів, таких як напруга та струм, які надалі можуть передаватися до контролера. PMU також захищає систему від перенавантажень і коливань напруги, що особливо важливо при короткочасних пікових навантаженнях під час запуску двигунів. Крім цього, через PMU відбувається передача живлення до розподільчої плати, що живить ESC.

Distribution Board (розподільча плата живлення)

Цей блок служить для оптимального розгалуження силового живлення. Замість того щоб прокладати окремі кабелі від PMU до кожного ESC, застосовується компактна розподільча плата з загальними шинами V+ і GND. Такий підхід дозволяє зменшити кількість проводів, поліпшити організацію внутрішнього простору апарата і забезпечити мінімальні втрати енергії при живленні потужних виконавчих пристроїв. На платі можуть бути встановлені захисні елементи (запобіжники або фільтри), які додатково підвищують надійність.

Pixhawk V6X (керуючий контролер)

Pixhawk є головним обчислювальним і координаційним блоком автоматизованої системи. Він виконує безперервну обробку вхідних даних з датчиків (акселерометри, глибиноміри, IMU тощо), формує керуючі сигнали у вигляді PWM, які надсилаються на відповідні ESC. У даній схемі задіяні виходи M1 та M2, що відповідають за управління двома вертикальними рушіями. Крім цього, Pixhawk забезпечує взаємодію з оператором через пост керування, може зберігати логи, реалізувати алгоритми стабілізації та контролю за глибиною. Робота контролера визначає динамічну поведінку всього підводного комплексу в реальному часі.

ESC (Electronic Speed Controller)

Модулі ESC отримують сигнали від Pixhawk (через PWM), а також потужне живлення з розподільчої плати. Їх основна функція — це перетворення керуючого сигналу у відповідну змінну напругу на трьох фазах, що подаються на безщіткові електродвигуни. ESC контролює частоту обертання, напрямок обертання, а також — у розширеній конфігурації — може надати телеметрію. У схемі реалізовано два незалежні канали ESC для управління симетрично розташованими вертикальними рушіями, що забезпечує точний контроль над положенням апарата у вертикальній площині.

M200 Motor (підводний електродвигун)

Ці двигуни — безпосередні виконавчі пристрої, які здійснюють вертикальне переміщення апарата. Двигуни M200 розроблені спеціально для підводного середовища, мають водозахищену конструкцію, герметичний корпус і не потребують традиційного охолодження — охолоджуються безпосередньо водою. Трифазне живлення, що подається від ESC, забезпечує стабільну тягу, яку можна регулювати з високою точністю. Завдяки симетричному розміщенню (передній і задній край апарата) можна реалізувати не лише вертикальний рух, а й компенсувати момент від маніпулятора або змінного потоку.

Така структура електрично-принципової схеми дозволяє забезпечити надійну, ефективну та керовану систему вертикального позиціонування підводного апарата в реальних умовах експлуатації.

Висновки до другого розділу

У другому розділі було здійснено комплексну розробку автоматизованої системи керування вертикальним рушійним пристроєм самохідного прив'язного підводного апарата з маніпулятором. На початковому етапі було сформовано загальну функціональну структуру системи, яка дозволяє забезпечити керування положенням апарата по осі

глибини із урахуванням змін навколишнього середовища та динамічних впливів від маніпуляцій.

Основою архітектури системи керування було обрано контролер Pixhawk V6X, який забезпечує прийом даних від сенсорів, генерацію сигналів PWM та координацію взаємодії з виконавчими елементами. На основі аналізу конструктивної платформи підводного апарата «Бриз» були адаптовані технічні характеристики до моделі з двома вертикальними рушіями, розташованими симетрично у передній та задній частині корпусу.

Було обґрунтовано вибір безщіткових двигунів M200, спеціально розроблених для підводного середовища. Для оцінки їх ефективності виконано розрахунок тяги, моментів, габаритів та необхідної потужності. На основі параметрів двигуна сформовано технічне завдання на побудову 3D-моделі вертикального рушія, що включає сопло, пропелер, сердечник, носовий конус та допоміжні кріплення.

Особливу увагу приділено графічному моделюванню гвинтової лопаті з використанням середовища MATLAB, де реалізовано побудову спіральної поверхні однієї та трьох лопатей на основі обчисленого кроку гвинта. Це дозволяє не лише візуалізувати геометрію, але й перевірити відповідність теоретичних розрахунків реальній конструкції.

На завершальному етапі було розроблено детальну електрично-принципову схему підключення елементів системи, включно з модулем живлення (PMU), розподільчою платою, ESC-модулями та двигунами. Особливу увагу приділено правильному розведенню живлення, заземленню та ізоляції керуючих сигналів.

У результаті розділу сформовано завершене технічне та функціональне підґрунтя для побудови автоматизованої системи керування, що забезпечить точне вертикальне позиціювання підводного апарата з урахуванням вимог герметичності, надійності та експлуатаційної стабільності.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРТИКАЛЬНОГО РУШІЙНОГО ПРИСТРОЮ ПІДВОДНОГО АПАРАТА

3.1 Розробка та опис 3D-моделі конструкції вертикального рушійного пристрою

У рамках даної магістерської роботи було поставлено завдання створити тривимірну модель конструкції вертикального рушійного пристрою для підводного апарата з маніпулятором. Така модель є необхідною для подальших інженерних розрахунків, включаючи міцнісний аналіз та гідродинамічне дослідження, а також для можливого використання у виробництві чи прототипуванні.

Для побудови 3D-моделі обрано сучасну хмарну CAD-платформу Onshape, яка забезпечує зручне середовище для параметричного моделювання та колективної інженерної роботи. Перевагами використання Onshape є:

- 1) повністю онлайн-доступна робоча область, яка не потребує встановлення локального програмного забезпечення;
- 2) інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє швидко орієнтуватися навіть при роботі з комплексними геометриями;
- 3) можливість створення складальних моделей, об'єднання деталей, додавання залежностей між ними;
- 4) підтримка експорту у формати STL та STEP, що є важливим для подальшої симуляції в SimScale або MATLAB;
- 5) історія змін (feature tree), яка дозволяє гнучко редагувати етапи побудови;
- 6) інструменти вимірювання, симетрії, ескізів, обертання, екструзії, а також підтримка побудови за заданими параметрами.

Моделювання проводилось із урахуванням технічних вимог до рушійного пристрою: компактність, здатність витримувати тиск води на

глибині, гідродинамічність форми, а також наявність захисного сопла і кріплень [20].

Побудова геометрії сопла вертикального рушійного пристрою

Сопло є ключовим елементом конструкції вертикального рушійного пристрою, який виконує одразу декілька функцій. Передусім, воно спрямовує потік води, створений обертанням гвинта, тим самим забезпечуючи ефективне формування реактивної тяги. Крім того, сопло виконує захисну роль, обмежуючи доступ до лопатей гвинта та зменшуючи ймовірність механічного пошкодження як елемента, так і навколишніх об'єктів при маневруванні. Також його геометрія впливає на гідродинамічні характеристики пристрою, сприяючи зменшенню турбулентності та покращенню стабільності потоку.

На початковому етапі побудови була створена циліндрична форма зовнішнього сопла з отворами для кріплення внутрішніх опор. В якості робочої площини для ескізу (Sketch 3) було обрано площину торцевої частини тіла обертання, створеного у попередньому кроці. Основу ескізу складають концентричні кола, що визначають внутрішній та зовнішній діаметри сопла, а також радіальні напрямні лінії під кутом 45° , які формують розташування майбутніх кріплень.

На рисунку 3.1.1 представлено ескіз, що відображає геометричну побудову центральної частини сопла. Задано основні розміри – зовнішній діаметр $\phi 24$ мм, ширина ребер жорсткості – 3 мм, а їхнє рівномірне розміщення забезпечується за допомогою кутових залежностей. Після завершення ескізу була застосована операція витискування (Extrude) на необхідну висоту.

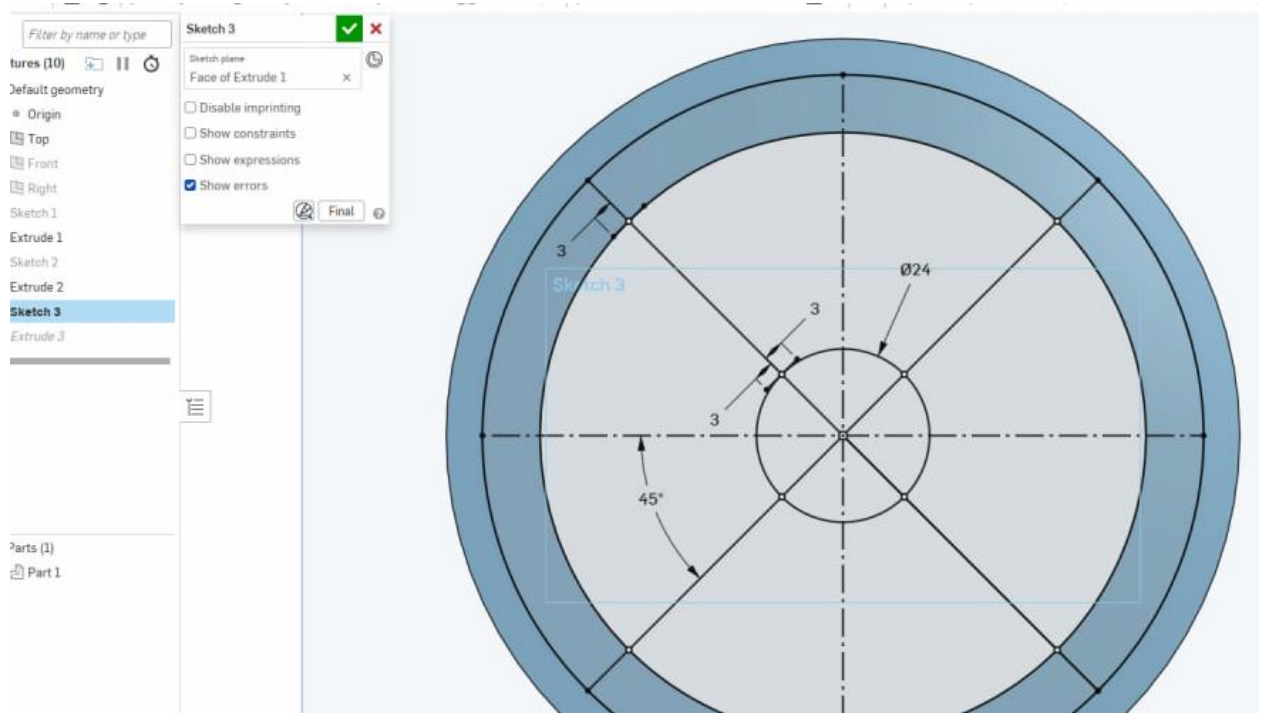


Рисунок 3.1.1 – Ескіз внутрішньої структури сопла в середовищі Onshape

Після створення основної циліндричної частини сопла здійснено побудову внутрішніх елементів, що відіграють як конструктивну, так і функціональну роль. Зокрема, це центральний обтічник, до якого у подальшому буде приєднаний ротор з лопатями, а також чотири ребра жорсткості, що з'єднують цей обтічник із зовнішнім корпусом.

Побудову здійснено в межах Sketch 3, який був попередньо розміщений на торцевій поверхні основного сопла. На цьому етапі були промодельовані ребра жорсткості під кутом 90° між собою, відповідно до вимог симетрії конструкції та з метою забезпечення рівномірного розподілу механічного навантаження під час дії реактивного потоку.

Витискування ребер було виконано з глибиною 6 мм з використанням параметра Symmetric, що дозволило досягти однакової товщини конструктивних елементів у двох протилежних напрямках відносно площини побудови. На рисунку 3.2 продемонстровано вже сформовані об'ємні елементи ребер та центрального вузла.

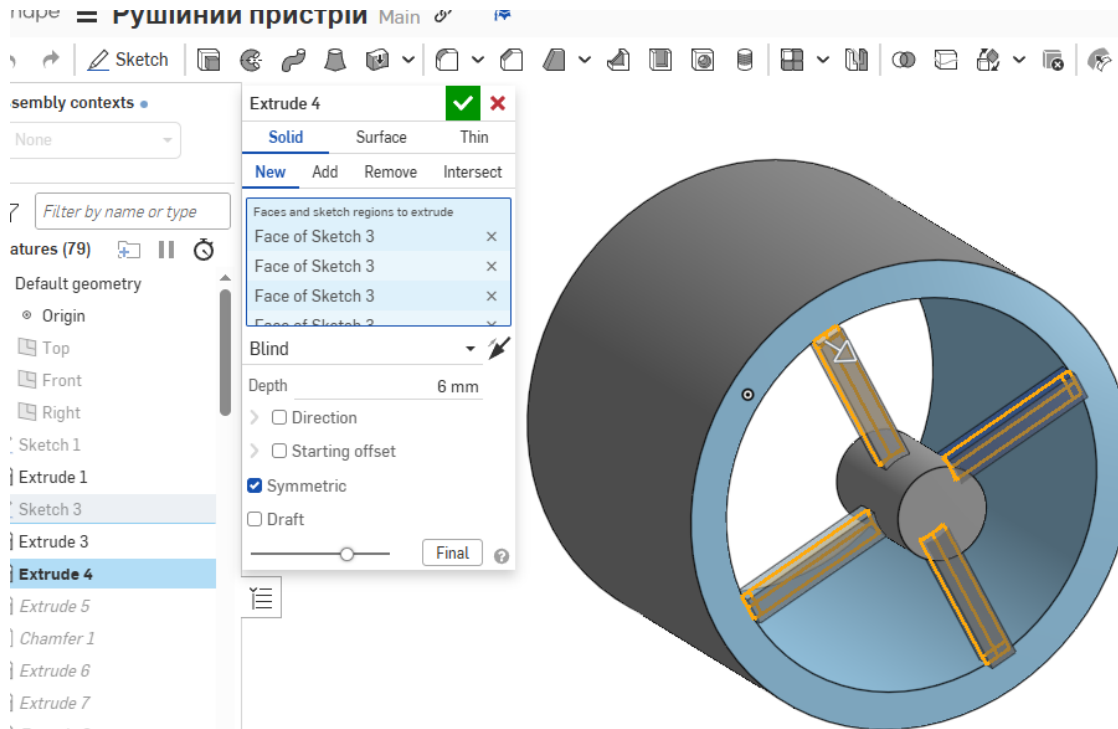


Рисунок 3.1.2 – Моделювання центрального обтічника та ребер жорсткості сопла

Згідно з розрахунками, наведеними у другому розділі, внутрішній діаметр сопла становить 84 мм, а зовнішній – 100 мм, що відповідає оптимальним гідродинамічним характеристикам та обмеженням за габаритами апарата. Таким чином, створена геометрія не лише відображає конструктивну логіку компонування елементів, але й задовольняє вимоги до міцності, жорсткості та ефективності роботи під водою.

Наступним етапом 3D моделювання стало проектування задньої частини сопла, яка виконує важливу конструктивну та функціональну роль. Згідно з розрахунками, саме в цій частині буде закріплено статор двигуна, а також реалізовані елементи для кріплення всього рушійного пристрою до корпусу підводного апарата.

Починаючи з внутрішньої сторони кільця сопла, було змодельовано опорні площадки для кріплення статора. Вони рівномірно розташовані вздовж внутрішнього радіусу, що дозволяє надійно фіксувати статор за допомогою наскрізних отворів. Відстань між опорами, їх форма та положення підібрані з

урахуванням точного центрування двигуна в обтічнику, а також враховано достатню жорсткість з'єднання.

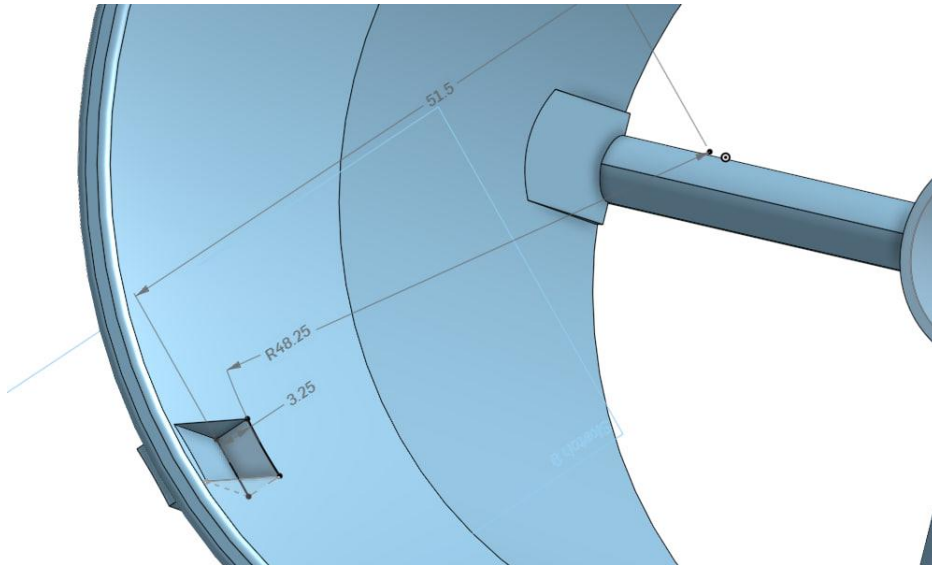


Рисунок 3.1.3 Моделювання площадки для кріплення корпусу статора

Крім цього, на зовнішній частині сопла було створено бокову монтажну платформу — спеціальний вузол для надійного кріплення всього блоку вертикального рушія до несучої конструкції підводного апарата. Даний елемент також містить набір отворів під гвинтове з'єднання, які дозволяють встановити блок на платформу або направляючу раму з максимальною точністю. Як видно з рисунка, дана частина має посилену основу, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження під час роботи пристрою.

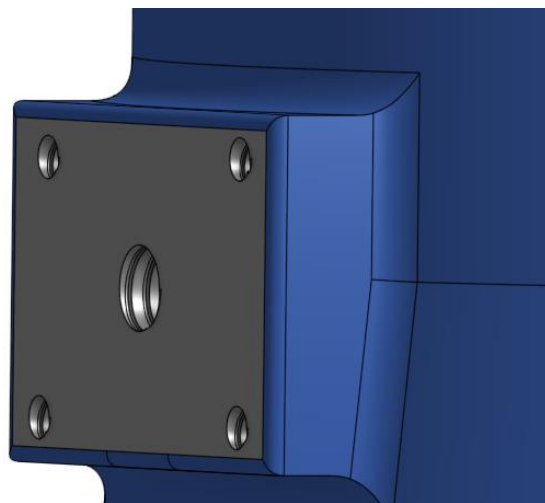


Рисунок 3.1.4 – Зовнішнє кріплення конструкції

Після побудови основних елементів конструкції було виконано фінальні геометричні доопрацювання, що дозволяють забезпечити оптимальні умови роботи пристрою в умовах підводного середовища.

З метою покращення гідродинамічних характеристик було згладжено усі виступаючі кути, зокрема переходи між кільцем сопла, опорними елементами та центральним обтічником. Таке рішення дозволяє мінімізувати опір потоку води та уникнути виникнення турбулентних зон, які можуть негативно вплинути на ефективність роботи рушія.

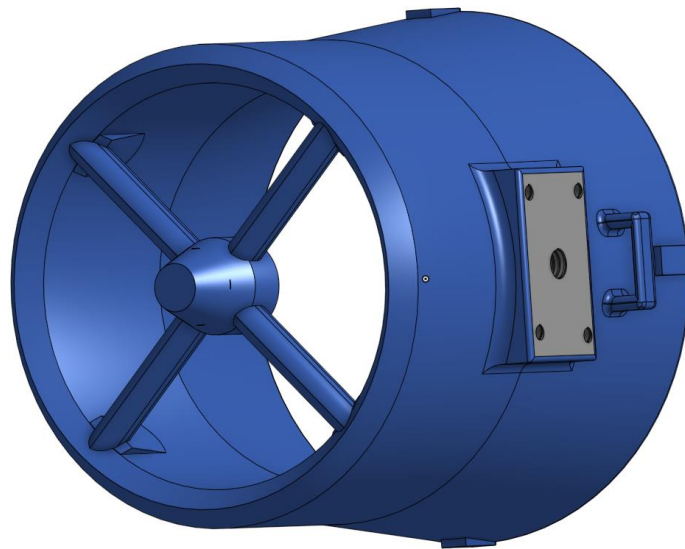


Рисунок 3.1.5 – Модель сопла з адаптованими поверхнями та вузлом кабельного кріплення

Також на задній частині сопла було додано комутаційну петлю — спеціальний елемент, призначений для фіксації силового кабеля, що йтиме від статора до джерела живлення або системи управління. Вона забезпечує зручну організацію прокладання кабелю та запобігає його пошкодженню під час експлуатації апарата. Геометрія петлі спроектована так, щоб вона не створювала зайвого гідравлічного опору та залишалась компактною в межах загального профілю пристрою.

Готова конструкція поєднує міцність, гідродинамічну ефективність та зручність інтеграції в склад більших технічних систем, що підтверджує відповідність розробки інженерним вимогам, зазначеним у другому розділі.

Після завершення моделювання корпусної частини вертикального рушійного пристрою було розпочато побудову 3D-моделі гвинта. Цей елемент виконує ключову функцію створення тяги за рахунок обертального руху і, відповідно, потребує точного формування геометрії, яка забезпечить ефективну роботу під водою. Геометричні параметри гвинта були обрані відповідно до теоретичних розрахунків, наведених у розділі 2.

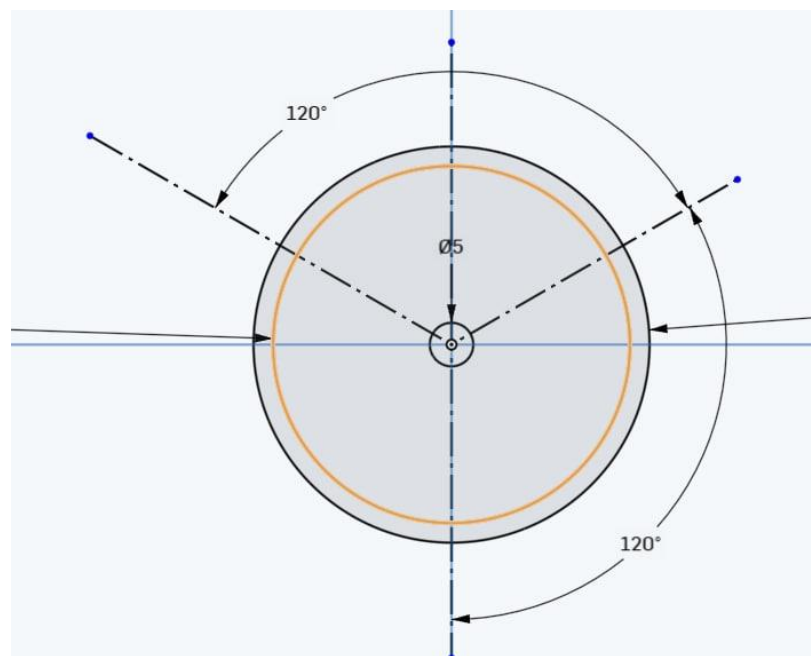


Рисунок 3.1.6 – Побудова лопатей гвинта з рівномірним розміщенням під кутом 120° одна відносно одної

Для забезпечення симетричного навантаження та рівномірного потоку води було обрано конструкцію з трьома лопатями, розміщеними під кутом 120° одна відносно одної. Це рішення дозволяє уникнути небажаних вібрацій, забезпечує баланс і підвищує стабільність руху. У програмі Onshape було побудовано ескіз кола з центром у геометричному центрі гвинта, а далі за допомогою осей симетрії розміщено три напрямні під кутом 120° .

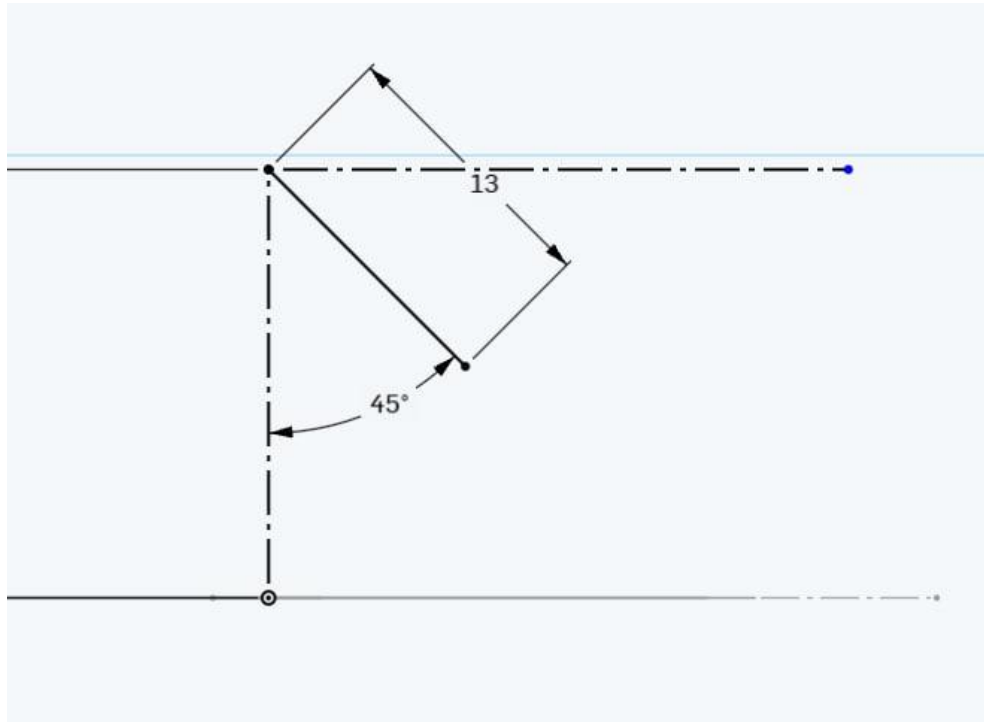


Рисунок 3.1.7 – Визначення кута нахилу лопаті гвинта, встановленого на 45° відповідно до проєктних розрахунків

Форма однієї лопаті моделюється у вигляді прямолінійного елементу, нахиленого до площини обертання під кутом 45° . Такий кут атаки забезпечує необхідне відхилення потоку води та створення тяги. Значення кута також було отримане на основі гідродинамічних розрахунків у попередньому розділі. На Рисунку У показано побудову лопаті гвинта з нахилом 45° відносно осі, що симетрично проходить через центр обертання.

Після завершення побудови геометрії лопатей було змодельовано роторну частину гвинта з урахуванням його посадки на вал двигуна. На рисунку 3.8 представлено повністю зібрану модель гвинта, закріпленого на роторі. Кріплення реалізовано за допомогою умовної посадкової втулки з отворами для гвинтів, що забезпечує надійне з'єднання під час обертання в умовах підводного середовища.

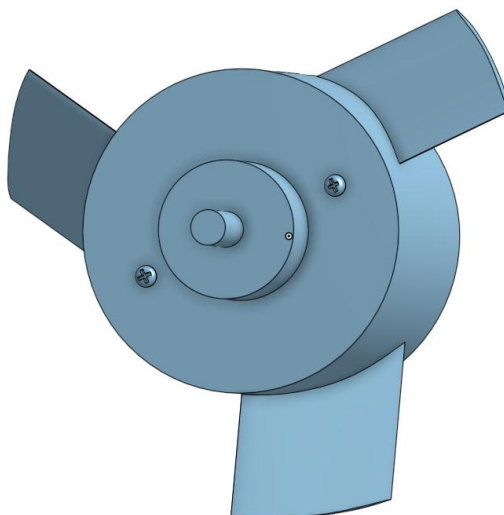


Рисунок 3.1.8 – Змодельований гвинт у зібраному вигляді, закріплений на роторі

Лопаті залишаються під кутом 45° , що відповідає розрахунковим параметрам, і рівномірно розташовані по колу з інтервалом у 120° , що забезпечує симетрію обертання. Форма лопатей вигнута у напрямку потоку, що дозволяє ефективно передавати крутний момент рідини.

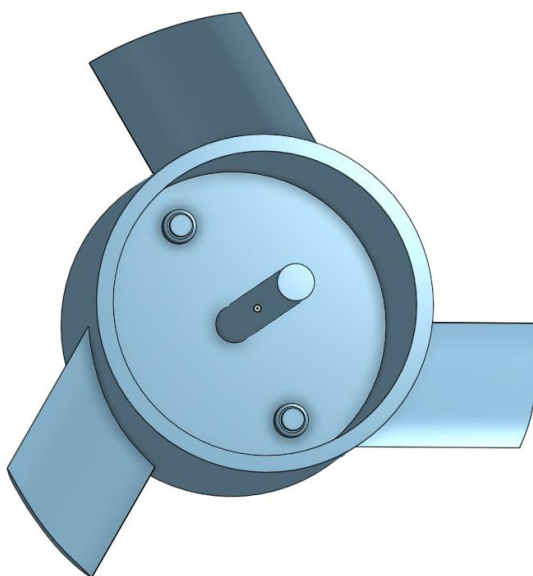


Рисунок 3.1.9 – Вид знизу на роторну частину гвинта з елементами кріплення

На рисунку 3.1.9 представлено нижній вигляд змодельованого вузла зі сторони ротора. Видно кріпильні отвори для гвинтів, центральний отвір під

вал та геометрію посадкового місця. Даний вид дозволяє оцінити точність центрування конструкції, а також проконтролювати осьову симетрію.

Наступним етапом було змодельовано елементи кріплення статора до задньої частини сопла. Конструкція кріплень повинна забезпечувати надійну фіксацію статора в корпусі вертикального рушійного пристрою, враховуючи вплив гідродинамічних навантажень та вібрацій під час роботи.

На рисунку 3.1.10 представлено побудову профілю кріплень, який виконано у вигляді трапецієподібного вирізу з центральним заглибленням. Основою для моделювання слугувала осьова симетрія сопла. Кут нахилу внутрішніх граней кріплення складає 30° , що забезпечує клиноподібну форму посадкового гнізда. Це дозволяє досягти кращої центровки та зменшити можливість зсуву під час роботи.

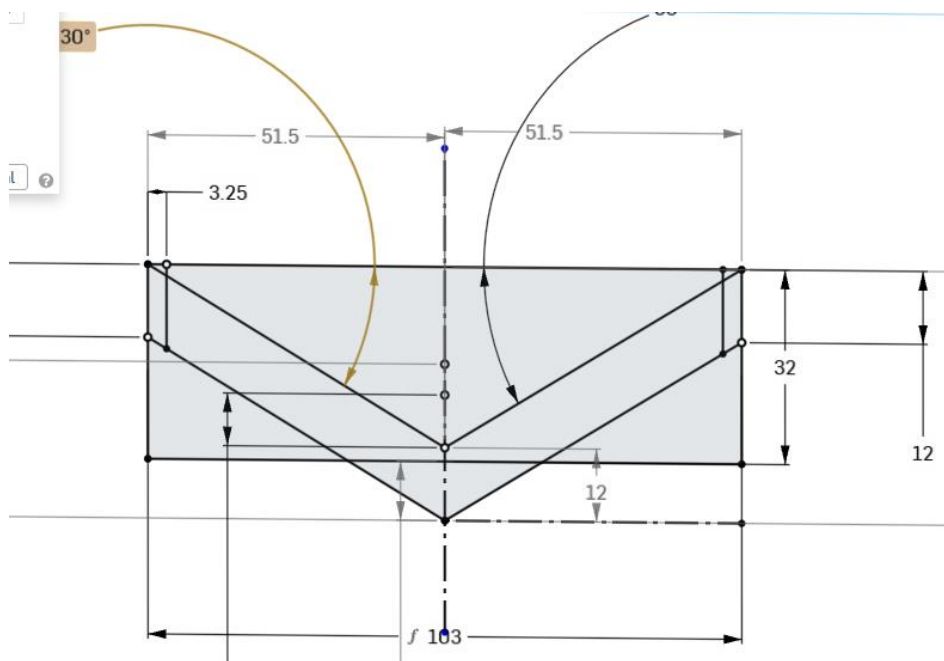


Рисунок 3.1.10 – Ескіз конструкції кріплень для фіксації статора в задній частині сопла

Загальна висота посадкового вузла становить 32 мм, з яких 12 мм відведено під центральну частину для встановлення корпусу статора. Довжина кожної сторони посадкового вирізу становить 51.5 мм, що відповідає

радіальному розміщенню отворів на задній частині сопла. Радіус вирізу — 103 мм — забезпечує відповідність загальній формі сопла.

Наступним кроком стало створення циліндричного корпусу статора та формування задньої частини ротора з обтічником. Ці елементи виконують функцію несучої платформи для кріплення обмоток статора, а також захищають внутрішні вузли двигуна від впливу зовнішнього середовища та потоку води.

На основі побудованого ескізу (Sketch 7) було застосовано операцію "Extrude" (витягування) до циліндричної області з параметром глибини 21 мм у напрямку осі. Така висота вибрана відповідно до габаритів двигуна типу M200, який має довжину 73.6 мм, з урахуванням товщини кріплення і заглиблення обмотки.

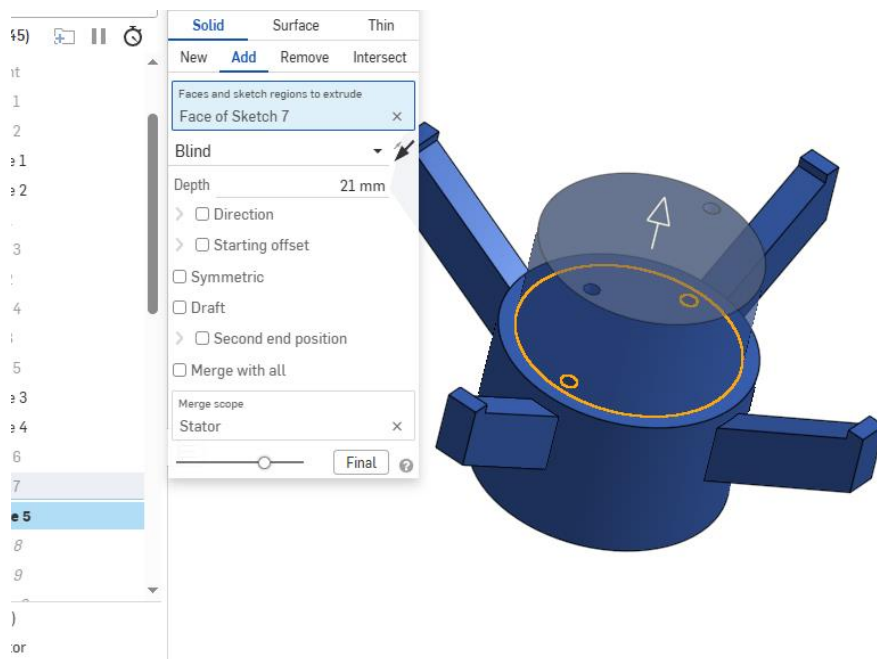


Рисунок 3.1.11 – Витягування корпусу статора та побудова заднього обтічника ротора

Важливим є те, що ця частина була з'єднана з уже змодельованими кріпленнями, створюючи єдину суцільну геометрію. Також на цьому етапі було змодельовано круглі монтажні отвори під кріпильні гвинти — вони видно на зображенні в зоні витягування.

Таким чином, отримана форма забезпечує не лише міцну фіксацію статора, але й покращує гідродинамічні характеристики всієї конструкції завдяки плавному переходу в обтічник, який зменшує опір води.

Завершальним етапом побудови статора стало формування остаточної геометрії з урахуванням розміщення кабелю живлення та герметизації електронної частини.

На рисунку 3.1.12 представлено повністю змодельований корпус статора з обтічником, що охоплює задню частину двигуна. Обтічник виконує дві основні функції: зниження гідродинамічного опору конструкції при русі у воді та захист внутрішніх елементів (ротор, підшипники, ущільнення) від дії зовнішнього середовища.

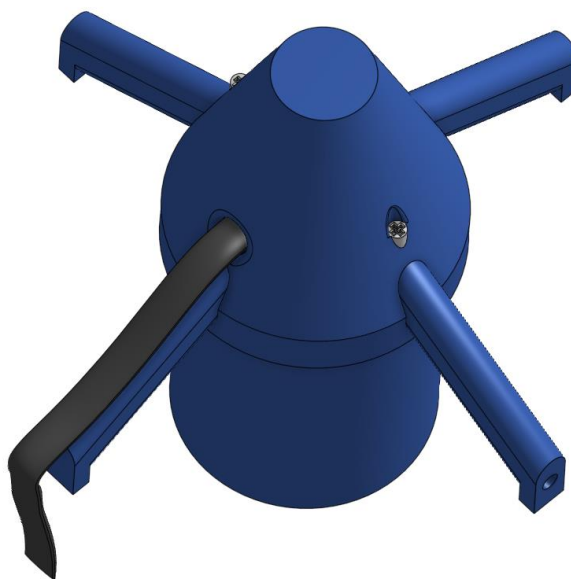


Рисунок 3.1.12 – Змодельований корпус статора з обтічником та виходом кабелю живлення

Особливу увагу приділено створенню отвора для виведення електричного кабелю. Отвір розміщено з нахилом відносно горизонтальної площини, що забезпечує мінімальний опір потоку. Для запобігання проникненню води всередину корпусу у моделі передбачено посадочне місце під ущільнювальну манжету або кабельний гермокомпонент. У моделі

візуалізовано гнучкий кабель, що виходить з отвору та прямує до зовнішньої частини підводного апарата.

Форма та розміри задньої частини корпусу, у тому числі його ребра жорсткості та посадочні отвори, були попередньо визначені на основі технічних розрахунків другого розділу, враховуючи глибину занурення, гідростатичний тиск і вимоги до герметичності.

Завершальним етапом побудови конструкції стало з'єднання усіх змодельованих компонентів вертикального рушійного пристрою в єдину функціональну структуру. Цей процес виконувався в середовищі Onshape, яке, окрім зручних засобів моделювання, також забезпечує ефективні інструменти для складання компонентів у просторі. Збірка стала логічним підсумком виконаних раніше побудов і дала змогу отримати повноцінну 3D-модель, що відтворює реальну конструкцію рушія.



Рисунок 3.1.13 – Збірна 3D-модель вертикального рушійного пристрою, вигляд спереду

На початковому етапі було вставлено сопло як основний несучий елемент, навколо якого формувалась уся геометрія. Всередину нього було точно встановлено ротор з прикріпленим до нього гвинтом, форма якого відповідає параметрам, отриманим у розрахунковій частині. Ротор

закріплюється за допомогою осьового отвору й опори у формі кільця, що є частиною заднього кріплення сопла. Це забезпечує надійне обертання лопатей у центральній площині сопла.

Позаду ротора розміщується корпус статора, який був спроектований як окрема деталь, адаптована до габаритів електричного двигуна, що використовується у системі. Його зовнішній діаметр дозволяє щільне з'єднання із внутрішньою частиною сопла, а довжина підібрана з урахуванням компактності конструкції. У задній частині корпусу було передбачено монтаж обтічника — конічного елемента, який надає конструкції обтічної гідродинамічної форми та приховує виступаючі частини механізму.

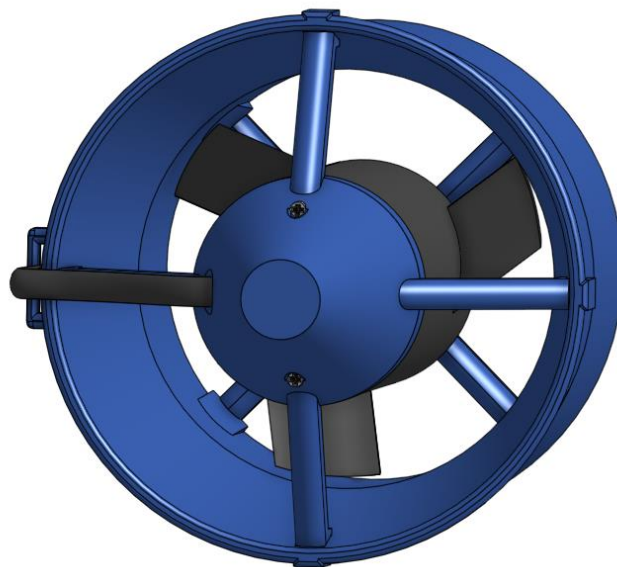


Рисунок 3.1.14 - Збірна 3D-модель вертикального рушійного пристрою, вигляд ззаду

Через спеціальний отвір у верхній частині обтічника передбачено прокладання кабелю живлення, що підводиться до статора. Отвір модифіковано з урахуванням розміщення ущільнювача, який забезпечить герметичність при роботі під водою. Сам кабель, змодельований для візуалізації, виходить із корпусу під плавним кутом і має радіус вигину, що відповідає допустимим конструкційним нормам.

На зовнішній частині сопла додатково передбачено кріплення для монтажу рушія до корпусу підводного апарата. Його форма була підібрана таким чином, щоб забезпечити легкий монтаж і можливість демонтажу в умовах обмеженого доступу. Весь пристрій візуально виглядає компактним, симетричним і готовим до подальшої перевірки та аналізу.

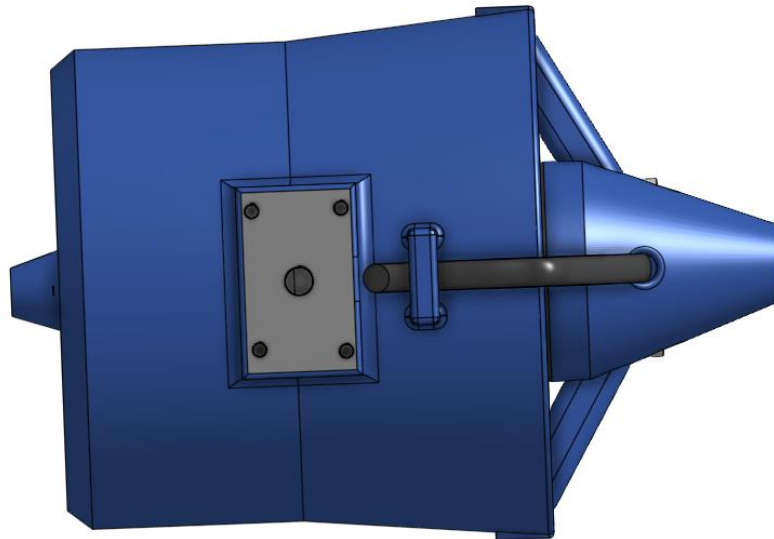


Рисунок 3.1.15 – Збірна 3D-модель вертикального рушійного пристрою, боковий вигляд

Результатом моделювання стала повноцінна тривимірна конструкція, що враховує всі конструктивні особливості, отримані на етапі розрахунків. Його форма і компонування дозволяють перейти до наступного етапу — дослідження міцності та поведінки пристрою в умовах реального середовища [17].

3.2. Статична оцінка міцності змодельованої конструкції

Після завершення побудови 3D-моделі вертикального рушійного пристрою наступним кроком є перевірка її міцності в умовах, наближених до реальної експлуатації. Зважаючи на те, що пристрій призначений для роботи під водою, одним із найважливіших чинників навантаження є гідростатичний тиск, який діє на корпус конструкції під час занурення.

У цьому підрозділі буде розглянуто статичну симуляцію міцності за допомогою сервісу SimScale, зосереджену на основному елементі рушійної системи. Саме ця частина приймає на себе більшість зовнішнього навантаження, зокрема тиск води на глибинах до 50 метрів. Така глибина є характерною для умов експлуатації апарата і створює значний тиск на всі зовнішні поверхні сопла.

Метою аналізу є визначення рівнів механічного напруження, що виникають у конструкції внаслідок дії рівномірного тиску води на зовнішню поверхню, а також оцінка її здатності зберігати цілісність і жорсткість за таких умов. Отримані результати дозволять зробити висновки щодо доцільності обраного матеріалу, геометрії моделі.

З метою перевірки адекватності роботи симулятора перед проведенням основного статичного аналізу було виконано тестову симуляцію тиску води на конструкцію сопла на глибині 50 метрів. Для цього спеціально було обрано матеріал із недостатніми механічними характеристиками, аби оцінити здатність програмного середовища правильно виявляти зони максимальних напружень і візуалізувати деформації під впливом зовнішнього навантаження.

На рисунку 3.2.1 зображено результат такої перевірки. Як видно, симулятор фіксує значні напруження в центральній частині сопла та на елементах кріплення. Найбільш критичні ділянки відмічені червоним кольором — це свідчить про перевищення допустимих меж міцності обраного матеріалу.

У цьому тесті як матеріал корпусу було умовно задано PLA (полілактид) або подібний низькоміцний пластик із модулем пружності близько 2.3–3.5 ГПа та границею міцності на розтяг у межах 40–60 МПа. Такий матеріал за нормальних умов може використовуватись для легких моделей або прототипів, однак для роботи на глибині 50 метрів, де гідростатичний тиск становить приблизно 500 000 Па (0.5 МПа), він є абсолютно непридатним.

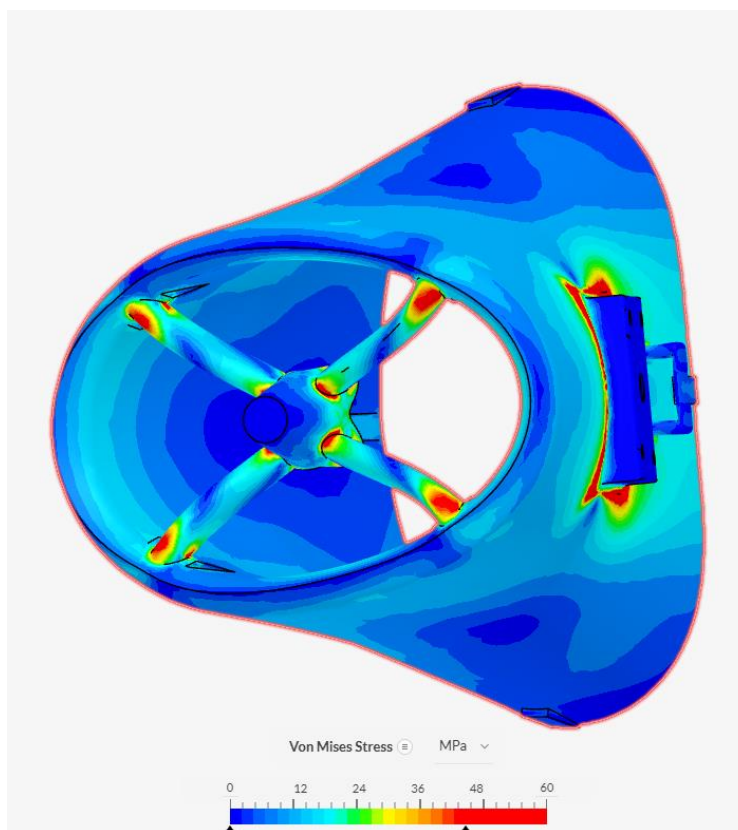


Рисунок 3.2.1 – Візуалізація напружень у соплі при глибинному тиску 50 м для матеріалу з низькими механічними властивостями (PLA)

Ця перевірка підтвердила, що симуляція в середовищі SimScale здатна достовірно показувати поведінку конструкції під дією тиску, а отже, її результати можна використовувати для подальшого інженерного аналізу та обґрунтування вибору матеріалу. Надалі для основного розрахунку буде застосовано матеріал з вищими показниками міцності, такий як Polycarbonate 10% Glass-Filled, що здатен витримати тиск, який виникає на заданій глибині.

Результати симуляції міцності моделі, виготовленої з матеріалу Polycarbonate з 10% скловолокна, потребує особливої уваги до характеру навантаження та властивостей самого матеріалу. У даному випадку об'єкт занурюється на глибину 50 метрів у водне середовище, що створює на його поверхні значне гідростатичне навантаження. Для розрахунку тиску, який чиниться водою на такій глибині, використано фізичне співвідношення:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

де:

P — тиск води, який діє на конструкцію (Па),

ρ — густина води (для морської води в середньому приймається 1025 кг/м³),

g — прискорення вільного падіння (9.81 м/с²),

h — глибина занурення об'єкта (50 м).

Підставивши значення, отримаємо:

$$P = 1025 \cdot 9.81 \cdot 50 \approx 502762.5 \text{ Па} \approx 0.5 \text{ МПа}$$

Саме цей тиск було задано як рівномірне зовнішнє навантаження на поверхню моделі сопла у SimScale.

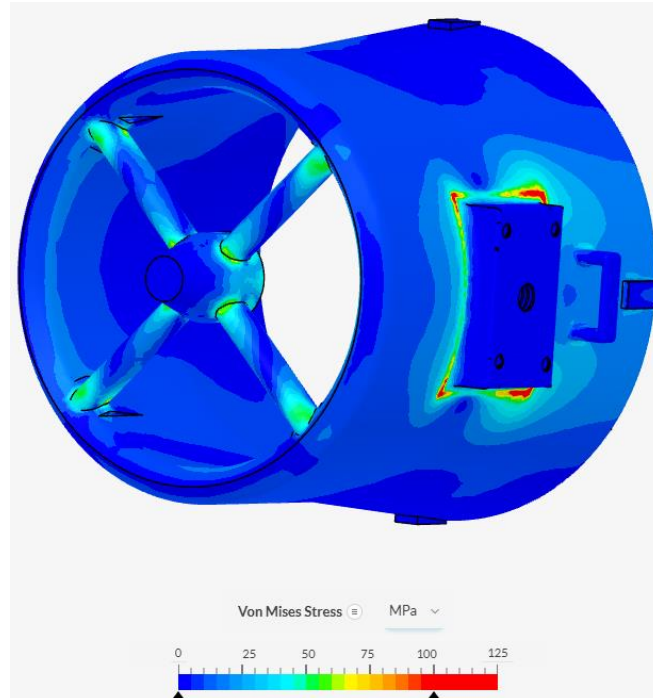


Рисунок 6 – Результати симуляції Von Mises напружень при глибинному тиску 50 м для матеріалу Polycarbonate 10% Glass-Filled

Моделювання виконувалося з урахуванням реальної геометрії об'єкта, включаючи центральну вісь з отвором під статор, внутрішні ребра жорсткості, а також кріплення на зовнішній поверхні. Завдяки цьому вдалося отримати розподіл еквівалентних напружень за критерієм Мізеса по всій поверхні конструкції. Найвищі значення напружень було зафіксовано у зонах кріплення, стику ребер і центральної втулки, а також в районі монтажної основи, яка передає навантаження на корпус. Максимальне напруження в цих точках досягло приблизно 100 МПа, що є граничним значенням для межі міцності даного матеріалу, але не перевищує її.

Polycarbonate, армований скловолокном, відомий своєю високою стійкістю до стискання та деформацій, з типовою межею плинності, яка коливається у межах від 90 до 125 МПа в залежності від складу. Таким чином, результат моделювання демонструє, що конструкція справляється з навантаженням на глибині 50 метрів, знаходячись при цьому на межі допустимих експлуатаційних режимів, що підтверджує ефективність обраного матеріалу, але також підкреслює необхідність точного дотримання технології виготовлення та кріплення для уникнення перевантаження в критичних зонах [7].

3.3 Графічне представлення потоку води в результаті роботи пристрою у MATLAB

Після завершення побудови тривимірної геометричної моделі вертикального рушійного пристрою в середовищі Onshape, наступним етапом стало її перенесення до середовища MATLAB для графічного аналізу. Модель була експортована у форматі STL, який є стандартом для передачі поверхневої геометрії об'єктів у системах комп'ютерного проєктування.

Отриманий STL-файл було завантажено в MATLAB, де його поверхня була зчитана функцією `stlread()` та візуалізована засобами мови програмування MATLAB у вигляді трикутної сітки (`trisurf`). Модель розміщено в просторі з

декартовою системою координат (X , Y , Z), де вісь Z умовно відображає глибину розташування пристрою. Значення Z з від'ємним напрямком символізують, що пристрій знаходиться нижче умовної поверхні води, тобто під водою.

Така підготовка дозволила надалі проводити графічну візуалізацію потоків води, які проходять крізь або оминають корпус пристрою, зображаючи поведінку навколишнього середовища під час його роботи. Хоча це не є повноцінним CFD-аналізом, векторне представлення потоків дозволяє отримати загальне уявлення про характер розподілу течії в зоні впливу рушія.

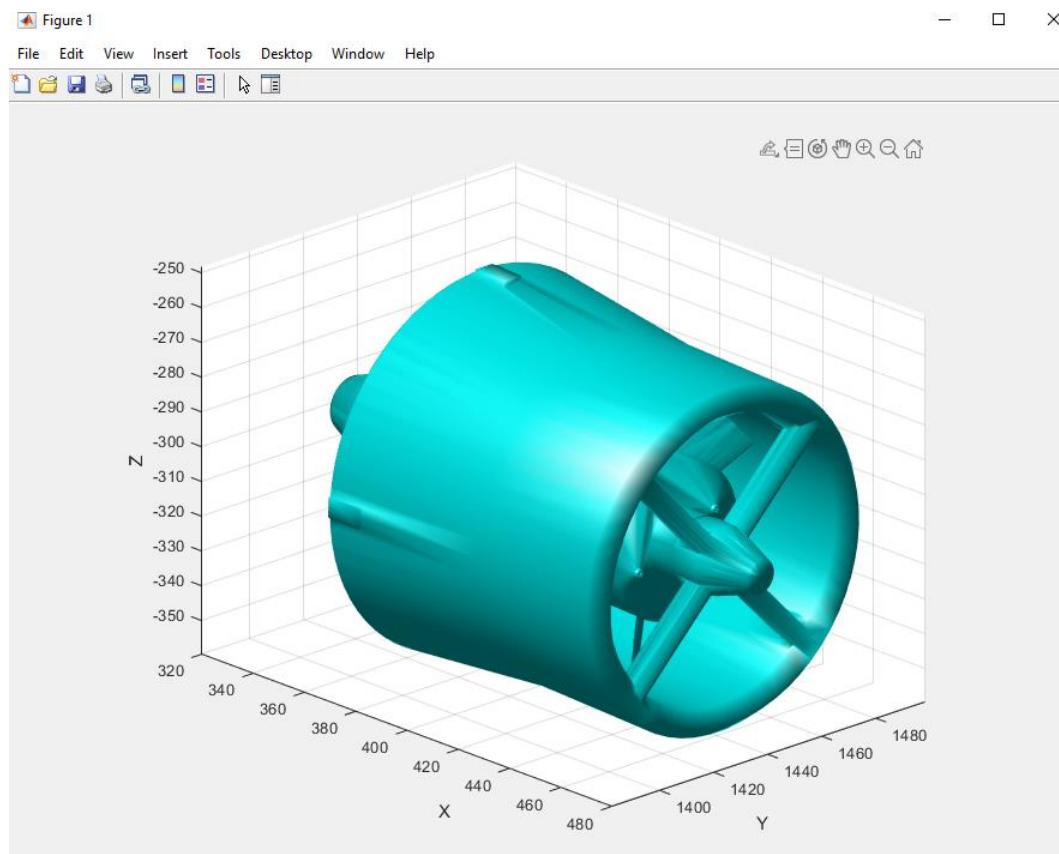


Рисунок 3.3.1– Візуалізація тривимірної моделі вертикального рушійного пристрою в середовищі MATLAB

На рисунку 3.3.2 представлено графічне зображення умовного потоку рідини, який проходить через змодельовану конструкцію вертикального рушійного пристрою. Потік візуалізовано за допомогою стрілок, які було побудовано в середовищі MATLAB з використанням функції `quiver3`. Ця

функція дозволяє у тривимірному просторі відобразити напрям і інтенсивність векторного поля.

У цьому випадку:

1. Сині стрілки позначають потік води, який виходить із сопла пристрою, що є умовною імітація того, як гвинт виштовхує воду вперед.
2. Червоні стрілки позначають потік, що надходить з боку заду моделі, симулюючи втягування води до гвинта.

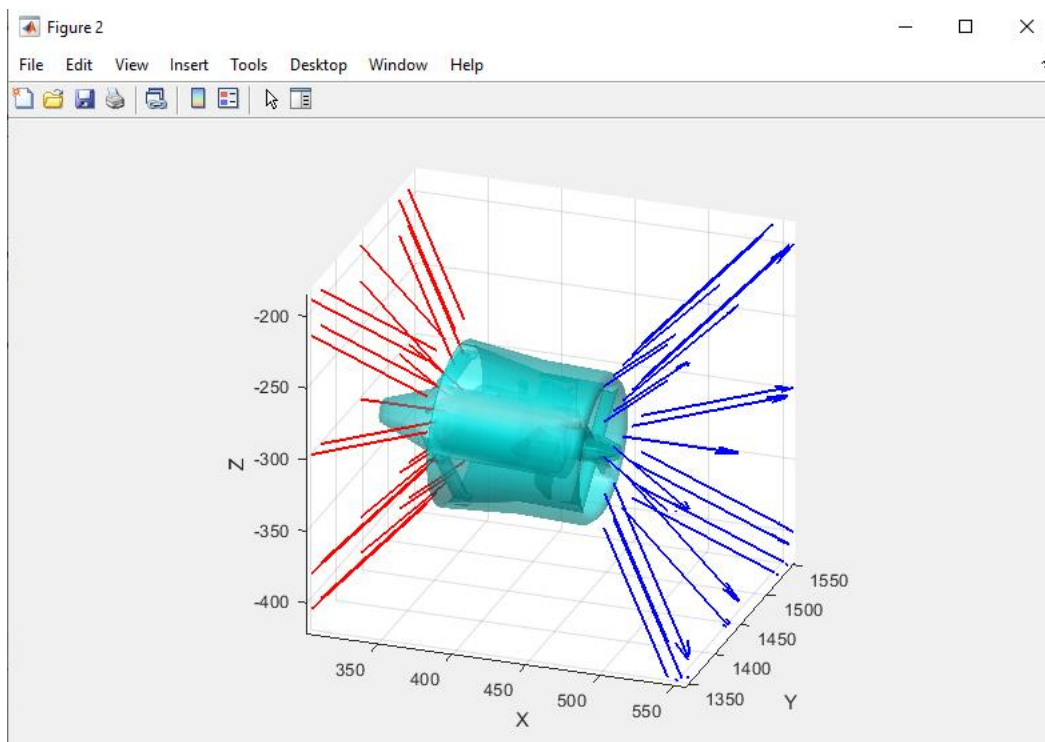


Рисунок 3.3.2 – Візуалізація умовного потоку рідини крізь модель рушія з використанням функції `quiver3` у MATLAB

Потік води умовно подається зліва направо вздовж осі X. Для генерації стрілок було створено сітки (`meshgrid`), які визначають координати початкових точок векторів потоку. Компоненти вектора (u , v , w) задаються таким чином, щоб імітувати обтікання тіла моделі, з урахуванням згинання потоку у вертикальному і горизонтальному напрямках за допомогою функцій `tanh(...)`, що додає плавності та природної форми лініям.

Згущення стрілок у певних областях можна умовно інтерпретувати як зони з вищою швидкістю або концентрацією руху рідини. Наприклад, у

центральної частині потік більш щільний, що відповідає дії гвинта у реальному пристрої — саме тут створюється найбільша тяга.

Цей графік не є CFD-аналізом у класичному сенсі, а лише спрощене представлення потокових ліній, що служить для візуального розуміння напрямку й характеру руху води навколо рушія.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі було повністю реалізовано процес тривимірного моделювання вертикального рушійного пристрою для підводного апарата, починаючи з етапу побудови окремих компонентів і завершуючи їх збиранням в єдину конструкцію. Особливу увагу було приділено геометричним параметрам сопла, гвинта, обтічника та корпусу статора, які були створені відповідно до попередньо розрахованих значень. Усі елементи проектувались у середовищі Onshape, що надало гнучкі можливості для побудови складних форм із точним дотриманням пропорцій.

Після створення моделі було проведено статичну оцінку її міцності з урахуванням дії гідростатичного тиску на глибині 50 метрів. Отримані результати симуляції продемонстрували надійність конструкції при використанні матеріалу типу Polycarbonate 10% Glass-Filled, що підтвердило відповідність моделі вимогам експлуатації в умовах підводного середовища.

Окремо було виконано графічну візуалізацію напрямків умовного потоку рідини у середовищі MATLAB, що дало змогу оцінити загальний характер взаємодії потоку з моделлю. Це дозволило сформулювати уявлення про функціонування рушія у воді та стало завершальним етапом технічного аналізу створеної 3D-моделі.

4 ОРГАНІЗАЦІЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ ЛЮДЕЙ

ВСТУП

Охорона праці є важливою складовою при реалізації проекту «Автоматизована система керування підводним апаратом з маніпулятором». Основне завдання цього напрямку — забезпечити безпечні умови праці та мінімізувати ризики виникнення нещасних випадків або професійних захворювань під час експлуатації підводної техніки та взаємодії з нею.

У межах даного розділу буде розглянуто організаційні аспекти охорони праці на етапі розробки системи керування підводним апаратом з маніпулятором, акцентовано увагу на використанні автоматизованих систем для зниження потенційних загроз, а також на важливості навчання персоналу з питань безпеки. Окрему увагу приділено методам контролю за безпечним виконанням робіт та аналізу ризиків.

Результати проведеного аналізу та відповідні рекомендації спрямовані на поліпшення умов праці та недопущення шкідливого впливу виробничих факторів на працівників.

4.1 Загальні вимоги до охорони праці

Охорона праці є ключовим компонентом процесу створення технологічного підводного апарата. Забезпечення безпеки працівників, які беруть участь у розробці, експлуатації та обслуговуванні таких систем, має базуватися на чітких організаційних і технічних заходах, спрямованих на запобігання травматизму, аваріям і професійним захворюванням [21].

Насамперед, загальні вимоги передбачають створення безпечного виробничого середовища відповідно до встановлених стандартів. Це включає врахування санітарно-гігієнічних умов праці, таких як температурний режим, вологість, рівень шуму, освітлення й вентиляція, що мають відповідати нормативним показникам. Окрім цього, важливо забезпечити використання

сертифікованого обладнання й інструментів, які відповідають критеріям безпеки, а також впровадити регламентовані процедури й правила, покликані мінімізувати ризики під час виконання робіт.

Ключовим елементом загальної безпеки є управління ризиками. Під час створення автоматизованої системи керування підводним апаратом необхідно заздалегідь ідентифікувати всі потенційні загрози, оцінити ймовірність їх реалізації та можливі наслідки, а також розробити ефективні способи зменшення ризиків до прийнятного рівня. Це може включати як конструктивні рішення, так і заходи з технічного обслуговування або навчання персоналу.

Значну роль у забезпеченні охорони праці відіграє дотримання чинних національних і міжнародних стандартів. Під час проєктування необхідно орієнтуватися на нормативні документи, що регулюють вимоги до конструкції апаратів, безпечного вибору матеріалів, технологій і систем керування. Особливу увагу також слід приділяти підготовці персоналу — від інструктажу з охорони праці до практичного навчання взаємодії з обладнанням у надзвичайних ситуаціях.

Усі ці вимоги утворюють цілісну систему, яка дозволяє ефективно організувати безпечну роботу з технологічним підводним апаратом. Їх дотримання — це не лише формальність, а запорука стабільної та надійної експлуатації складної техніки в умовах підвищеної небезпеки.

4.2 Аналіз ризиків та визначення заходів безпеки

Проведення аналізу ризиків є невід'ємною частиною процесу створення безпечних умов праці при розробці та експлуатації технологічного підводного апарата. Цей етап дозволяє заздалегідь виявити потенційно небезпечні чинники, оцінити ступінь їх небезпеки та сформулювати комплекс відповідних заходів, спрямованих на мінімізацію ймовірності виникнення нещасних випадків і зниження можливих негативних наслідків [22].

Першим кроком у такому підході є ідентифікація потенційних небезпек, пов'язаних із функціонуванням автоматизованої системи керування. Це можуть бути як фізичні загрози, пов'язані з використанням механічних або електричних компонентів, так і психологічні чинники — зокрема монотонна діяльність, перевтома, або висока концентрація уваги під час виконання критичних операцій.

Після виявлення таких факторів проводиться оцінка ризиків, що базується на аналізі ймовірності реалізації кожної загрози та її можливих наслідків. Такий аналіз дозволяє виділити найбільш критичні сценарії та визначити їх пріоритетність у подальшому управлінні ризиками. Результати оцінки слугують основою для вибору ефективних технічних та організаційних засобів захисту.

До прикладу, до технічних заходів можуть належати впровадження елементів конструктивного захисту, вдосконалення механізмів кріплення, використання ізоляційних матеріалів або встановлення датчиків контролю. Водночас організаційні заходи передбачають розробку процедур і протоколів дій у разі виникнення аварій, навчання персоналу, регулярні інструктажі, моделювання надзвичайних ситуацій і перевірку рівня готовності до них.

Особливої уваги потребує динамічність ризик-менеджменту. У процесі розробки та подальшої експлуатації апарата можливі зміни умов праці, оновлення обладнання або впровадження нових технологій, що потребують перегляду раніше встановлених заходів безпеки. Тому регулярний моніторинг ситуації, актуалізація ризик-аналізу та вдосконалення захисних заходів є запорукою сталого забезпечення безпечних умов праці на всіх етапах життєвого циклу підводного апарата.

4.3 Автоматизація робочих процесів

Автоматизація робочих процесів виступає потужним інструментом для підвищення рівня безпеки під час експлуатації технологічного підводного

апарата. Використання автоматизованих систем та роботизованих механізмів дозволяє мінімізувати участь людини у рутинних, а подекуди й потенційно небезпечних операціях, що суттєво знижує ризик виникнення нещасних випадків або аварійних ситуацій.

Запровадження автоматизації дає змогу значно зменшити вплив людського фактору, який часто є критичним чинником у виникненні помилок під час роботи з високотехнологічними пристроями. Крім того, автоматизовані системи відзначаються високою точністю та швидкістю виконання поставлених завдань, що не лише покращує ефективність виконання робіт, але й забезпечує стабільність процесів в умовах, де надмірні навантаження або стресові фактори можуть негативно вплинути на працівника.

Особливої важливості набуває автоматизація у ситуаціях, коли завдання потрібно виконати у важкодоступному або небезпечному середовищі, наприклад, на значній глибині або в умовах обмеженої видимості. У таких випадках автоматизовані рішення дозволяють не лише зберегти життя та здоров'я персоналу, а й підтримати безперервність та якість технологічного процесу. Таким чином, інтеграція автоматизованих систем у сферу роботи з підводними апаратами є не лише засобом підвищення продуктивності, а й одним з ключових напрямів у забезпеченні охорони праці.

4.4 Застосування датчиків та систем моніторингу

Інтеграція сучасних датчиків і систем моніторингу у процеси експлуатації підводного технологічного апарата є надзвичайно важливою складовою загальної системи безпеки. Завдяки цим засобам з'являється можливість оперативно відслідковувати параметри середовища та технічного стану обладнання, що дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні ситуації, реагувати на них та запобігати розвитку аварій.

Системи моніторингу дозволяють контролювати фізичні параметри, такі як тиск і температура, безперервно оцінюючи їхню відповідність допустимим

нормам. У разі відхилення показників від заданих меж оператори отримують попередження, що дозволяє оперативно вжити заходів для усунення загроз. Крім цього, важливу роль відіграють датчики, які можуть фіксувати наявність шкідливих газів, зниження рівня кисню або навіть радіаційний фон, що критично важливо при виконанні підводних робіт у несприятливих умовах.

Таким чином, системи моніторингу та датчики створюють основу для превентивної безпеки, забезпечуючи контроль за станом як самого апарата, так і зовнішнього середовища. Їх використання дозволяє своєчасно виявляти несправності, підтримувати стабільну роботу обладнання та, головне, зберігати життя і здоров'я персоналу [23].

4.5 Заходи безпеки при роботі з автоматизованою системою

Забезпечення безпеки персоналу при взаємодії з автоматизованими системами управління є надзвичайно важливою складовою ефективної та стабільної експлуатації технологічного обладнання. Насамперед, необхідно приділити увагу якісній підготовці персоналу. Працівники мають пройти відповідне навчання, що охоплює як принципи роботи з автоматизованою системою, так і особливості її функціонування в умовах підвищеного ризику.

Окрім цього, для зменшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій розробляються детальні інструкції з експлуатації, які включають як порядок дій під час штатної роботи, так і алгоритми реагування на можливі неполадки. Такі документи слугують не лише технічним орієнтиром, але й важливим елементом культури безпеки на підприємстві.

Важливо також передбачити надійне резервне живлення та відповідні технічні рішення, які дозволяють уникнути раптової зупинки або збою в роботі системи в разі знеструмлення чи інших непередбачених ситуацій. Наявність таких захисних заходів гарантує збереження функціональності обладнання та знижує ризики для обслуговуючого персоналу.

4.6 Освіта та кваліфікація персоналу

Одним із ключових чинників безпечної розробки та експлуатації технологічного підводного апарата є належна освіта й високий рівень кваліфікації персоналу. Працівники, які залучені до створення, тестування та обслуговування таких складних систем, повинні не лише мати відповідну технічну підготовку, але й чітке розуміння стандартів безпеки, що регламентують їх діяльність.

Важливо забезпечити формування системи професійного розвитку, яка включає не лише базову фахову підготовку, але й регулярне оновлення знань і навичок згідно з останніми технологічними досягненнями та змінами в нормативній базі. Періодичні перевірки рівня кваліфікації, участь у тематичних тренінгах і навчальних програмах сприяють підтриманню високого рівня обізнаності та впевненості працівників у виконанні своїх обов'язків.

Системний підхід до підготовки кадрів не лише знижує ймовірність помилок, але й сприяє формуванню відповідального ставлення до безпеки праці, що особливо важливо при роботі з підводною технікою, де будь-яка помилка може мати критичні наслідки.

4.7 Тренінги та навчання з питань охорони праці

Постійне підвищення обізнаності працівників у сфері охорони праці є критично важливим під час розробки й експлуатації технологічного підводного апарата. Регулярні навчальні заняття та тренінги дозволяють не лише ознайомити персонал з основними правилами безпеки, але й сформувати чітке розуміння порядку дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

Особливу увагу під час таких занять приділяють правилам роботи з захисним обладнанням, правильному реагуванню на потенційні загрози та ефективній комунікації в умовах підвищеного ризику. Значний ефект дають

імітаційні вправи, які відтворюють реальні умови експлуатації підводної техніки. Завдяки таким практичним тренуванням працівники отримують цінний досвід, що дозволяє діяти впевнено та злагоджено у складних чи нестандартних ситуаціях.

Усі заходи з навчання спрямовані на зменшення ймовірності людських помилок, підвищення рівня технічної готовності та забезпечення високого рівня безпеки при роботі з автоматизованими підводними системами.

4.8 Системи контролю та моніторингу

У процесі розробки та експлуатації технологічного підводного апарата важливу роль відіграють сучасні системи контролю та моніторингу. Їх впровадження забезпечує постійне спостереження за параметрами роботи обладнання, дозволяючи вчасно виявляти потенційні небезпеки або технічні несправності [24].

Завдяки датчикам, що реагують на зміни тиску, температури, рівня кисню або появу шкідливих речовин, вдається створити умови, максимально безпечні для персоналу. Усі зібрані дані систематизуються та аналізуються з метою виявлення закономірностей, які можуть свідчити про виникнення ризикових ситуацій. Такий підхід дозволяє не лише оперативно реагувати на загрози, а й здійснювати профілактичні заходи для попередження інцидентів у майбутньому.

4.9 Аналіз нещасних випадків та заходи щодо їх запобігання

Для забезпечення високого рівня безпеки в процесі розробки технологічного підводного апарата особливу увагу слід приділяти аналізу випадків порушення норм охорони праці, що мали наслідком травмування або загрозу життю персоналу. Вивчення обставин і причин таких інцидентів дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо джерел ризику та виявити недоліки в існуючих процедурах.

Отримані результати аналізу слугують основою для вдосконалення правил безпеки, оновлення інструкцій та процедур, а також для запровадження додаткових інженерних чи організаційних рішень, спрямованих на мінімізацію небезпеки.

Крім того, важливим є регулярне проведення внутрішнього аудиту системи охорони праці — це дає змогу вчасно реагувати на зміни в умовах роботи, забезпечити їх відповідність сучасним стандартам безпеки та запобігти повторенню нещасних випадків. Систематичний підхід до аналізу та профілактики є запорукою стабільної й безпечної роботи в умовах, де ціна помилки може бути дуже високою [25].

Висновки до четвертого розділу

Питання охорони праці займають ключове місце в процесі розробки технологічного підводного апарата, оскільки забезпечення безпеки персоналу є базовою умовою успішного виконання будь-яких інженерних завдань. Зважаючи на специфіку роботи з обладнанням, яке функціонує у складних умовах водного середовища, особливу увагу слід приділяти впровадженню превентивних заходів безпеки на всіх етапах життєвого циклу проєкту — від проєктування до тестування та експлуатації.

Автоматизація процесів управління підводним апаратом дозволяє суттєво знизити рівень впливу людського фактору, а відповідно і ризик виникнення аварійних ситуацій. Застосування датчиків, систем моніторингу та попереджувального контролю створює умови для оперативного реагування на можливі технічні збої або загрози, що виникають у процесі роботи.

Водночас, вирішальне значення має належна професійна підготовка персоналу — працівники повинні не лише володіти необхідними технічними знаннями, а й чітко розуміти специфіку небезпек, пов'язаних з обслуговуванням високотехнологічного обладнання в умовах підвищеного ризику. Проведення навчань, інструктажів та симуляцій дозволяє сформувати

у працівників навички безпечної поведінки в стандартних та аварійних ситуаціях.

Ефективне функціонування систем охорони праці неможливе без постійного моніторингу та аналізу. Виявлення слабких місць у технічних рішеннях, аналіз нещасних випадків, а також адаптація процедур безпеки до нових умов і викликів — усе це дозволяє забезпечити динамічний розвиток системи охорони праці відповідно до вимог часу [27].

Таким чином, охорона праці в розробці підводного апарата є не просто нормативною вимогою, а фундаментальним елементом, що впливає на якість, надійність і безпечність усієї системи. Інтеграція безпекових рішень у всі етапи розробки — від технічного моделювання до практичного використання — є запорукою стабільного і безпечного функціонування підводного комплексу в умовах реальної експлуатації [26].

ВИСНОВКИ

1. У ході дослідження було вивчено основні напрямки підводно-технічних робіт, серед яких особливе значення мають операції зі збору зразків, технічного огляду, точного монтажу, зварювання та обслуговування обладнання. Для виконання таких завдань критично необхідне точне вертикальне позиціонування апарата, що забезпечує стійке положення платформи під час маніпуляцій.

2. У роботі сформовано загальне уявлення про вертикальний рушій як ключовий елемент стабілізації апарата у воді. Його функція полягає у створенні компенсаційної сили, що діє вздовж вертикальної осі, протидіючи зміні глибини в умовах нестабільних потоків чи зміненої маси системи під час маніпуляцій.

3. Проведено порівняльний аналіз існуючих моделей підводних апаратів, включаючи автономні та прив'язні системи. Визначено конструктивні особливості, зокрема конфігурації рушіїв (основні та вертикальні), засоби керування та стабілізації, типи приводів, що застосовуються для точного позиціонування. Оцінено переваги систем з векторним керуванням тягою та роллю вертикального рушія у формуванні стабільного положення.

4. Розроблено загальну структурну схему автоматизованої системи керування, яка охоплює виконавчі елементи, датчики, модуль управління маніпулятором, комунікаційний інтерфейс та обчислювач. Така схема забезпечує ефективну взаємодію між всіма підсистемами апарата.

5. Проведено аналіз конструкції самохідного прив'язного підводного апарата проекту «Бриз» як базової платформи для реалізації системи. Визначено просторові обмеження, особливості монтажу, розташування центра мас, розмірні характеристики, що безпосередньо впливають на параметри рушійної установки.

6. На основі аналізу сформовано розрахункову частину, де визначено габарити, тягові характеристики, швидкість обертання та потужність для вертикального рушія. Враховано обмеження за параметрами двигуна, максимальний гідростатичний тиск та необхідну силу тяги для стабілізації.

7. Розроблено логічну структуру керування вертикальним рушієм, що передбачає електрично-принципову схему системи керування, підбір та опис окремих задіяних елементів системи та їх взаємодія.

8. У середовищі Onshape виконано поетапне моделювання 3D-конструкції вертикального рушійного пристрою, що включає сопло, ротор з гвинтом, статор, ущільнення кабеля, носову частину. Усі деталі розроблені з урахуванням зручності монтажу, обтічності та міцності під дією зовнішніх навантажень.

9. Проведено симуляцію гідростатичного тиску на глибину 50 метрів для корпусу рушія методом кінцевих елементів. Оцінено напружено-деформований стан та встановлено, що при використанні матеріалу Polycarbonate з наповнювачем 10% скловолокна максимальні напруження не перевищують межу міцності, що підтверджує надійність конструкції.

10. Виконано умовне графічне моделювання напрямків потоку води за допомогою MATLAB. За допомогою функцій `quiver3` візуалізовано вхідні та вихідні потоки з урахуванням зміни просторової орієнтації та згущення вектора у зонах більшої сили тяги, що дозволяє наглядно представити ефективність роботи рушія в середовищі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. "Underwater Robotics: Science, Design, and Fabrication" - Richard Lane.
2. "Subsea Engineering Handbook" - Bjørn Åstrand, Knut A. Lefstad, Cornelius Schmitz-Linneweber.
3. "Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms" - Nikola Pinzoli, Matteo Matteucci.
4. "Underwater Robotics: From Design to Implementation" - Gianluca Antonelli, Ivo Almeida, João Almeida.
5. "Introduction to Marine Robotics: Underwater Robots, Vehicles, and Other Technologies" - Saeed B. Niku.
6. "Underwater Robotics: Techniques and Applications" - Gianluca Antonelli.
7. <https://www.matweb.com>(дата звернення: 26.04.25)
8. "Underwater Robotics: Science, Design and Fabrication" - Martin F. Galloway.
9. "Marine Robotics and Applications" - Stefan Williams, Jonathan Roberts.
10. "Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms" - Nikolaus Correll, Bradley Hayes, Springer.
11. "Underwater Robotics: Science, Design, and Fabrication" - автори: Benjamin M. Groves, Ferial El-Hawary.
12. "Ocean Engineering Handbook" - редагована М.М. Bernitsas.
13. "Introduction to Marine Engineering" - автор: D.A. Taylor.
14. "Underwater Robotics: Science, Design, and Fabrication" - автор Річард Лоупіс-Іборра (Richard Lopex-Iborra).
15. "Design and Control of Underwater Manipulator Systems: A Review" - автори С. Нікпай (S. Nikpay), М. Махмуді (M. Mahmudi), М. Расти (M. Rasti).

16. "Development of an Underwater Manipulator System for Subsea Operations" - автори А. Сміт (A. Smith), Д. Джонсон (D. Johnson), К. Вільямс (K. Williams).
17. "Introduction to Solid Modeling Using SolidWorks" - William E. Marti.
18. "Design and Simulation of Underwater Manipulator System using 3D Modeling Software" - Lee S. Chou, Kevin R. Harvey, Emily J. McKenna.
19. "Development and Analysis of 3D Model for Underwater Manipulator" - James Smith, Robert Jones, Sarah Davis.
20. <https://www.onshape.com/en/>(дата звернення 20.04.25)
21. Kohn, James & Friend, Mark & Winterberger, Celeste. (2023). Fundamentals of Occupational Safety and Health / J.P. Kohn, M.A. Friend, C.A. Winterberger.
22. Hughes, Phil & Ferrett, Ed. (2020). Introduction to Health and Safety at Work: for the NEBOSH National General Certificate in Occupational Health and Safety.
23. Brauer, Roger. (2006). The Importance of Safety and Health for Engineers.
24. Gardiner, K. & Harrington, J.M.. (2008). Occupational Hygiene.
25. Goetsch, David. (2023). Occupational Safety and Health for Technologist, Engineers, and Managers / D.L. Goetsch.
26. Конвенція Міжнародної організації праці (МОП) № 155 "Про безпеку та охорону здоров'я праці" (1981 рік). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_050 (дата звернення 17.05.2025).
27. Методичні рекомендації з організації охорони праці на підприємствах. Київ: Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2008. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/80307___80307 (дата звернення 19.05.2025).